AUTOREFERAT

dr inż. Jerzy Bochnia Politechnika Świętokrzyska Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii

Załącznik nr 2

Kielce 2018

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko

Jerzy Bochnia

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

- Magister inżynier, specjalność technologia maszyn, na kierunku mechanika i budowa maszyn. Praca magisterska pod tytułem "Analiza stanu odkształceń naprężeń w typowych podtłoczeniach wybranych wytłoczek karoseryjnych", promotor – dr inż. Zdzisław Łojek, Wydział Mechaniczny, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, 1978.
- Doktor nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, praca doktorska pod tytułem "Ocena niektórych właściwości mechanicznych wybranych materiałów na podstawie zmian kształtu odcisku stożka", promotor prof. dr hab. inż. Franciszek Rudol, Wydział Mechaniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, 1993.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

- Obecne miejsce zatrudnienia:

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce.

- Historia zatrudnienia:
 - 1985 1987, asystent w Centrum Uczelniano-Przemysłowym w Wyższej Szkole Inżynierskiej w Radomiu a następnie w Instytucie Eksploatacji Pojazdów i Maszyn w Wyższej Szkole Inżynierskiej w Radomiu.
 - 1987 2009, asystent, starszy asystent, kierownik zespołu badawczego, kierownik laboratorium, adiunkt, członek Rady Naukowej w Międzyresortowym Centrum Naukowym Eksploatacji Majątku Trwałego w Radomiu obecnie Instytut Technologii Eksploatacji Państwowy Instytut Badawczy.
 - 2009 obecnie, adiunkt w Katedrze Technologii Mechanicznej i Metrologii na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach.
- 4. Wskazanie osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn 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. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311):

a) tytuł osiągnięcia naukowego:

Moje osiągnięcie naukowe w rozumieniu ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r., art. 16 ust. 2, z późniejszymi zmianami, stanowi monotematyczny cykl publikacji pt.:

"Wybrane właściwości fizyczne materiałów wytwarzanych technologiami przyrostowymi."

b) wykaz prac naukowych dokumentujących osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego.

- A1. Bochnia, J.: Evaluation of relaxation properties of digital materials received by PolyJet Matrix technology, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2018, (lista A MNiSW, liczba punktów w roku wydania: 20, impact factor w roku wydania: 1,361) – mój udział procentowy szacuję na 100 %.
- A2. Bochnia, J.: Wybrane właściwości fizyczne materiałów kształtowanych technologiami przyrostowymi, PL ISSN 1897-2691, PL ISBN 978-83-65719-36-2, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Kielce 2018, (monografia) mój udział procentowy szacuję na 100 %.
- A3. Bochnia, J., Blasiak, S.: Fractional relaxation model of materials obtained with Selective Laser Sintering technology, Rapid Prototyping Journal, <u>https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2017-0236</u>, 2018, (lista A MNiSW, liczba punktów w roku wydania: 30, impact factor w roku wydania 2017: 2.346) – mój udział procentowy szacuję na 60 %.

Mój udział polegał na: przeprowadzeniu analizy literatury dotyczącej tematu artykułu, wykonaniu próbek technologią przyrostową SLS z proszków poliamidowych, opracowaniu i wykonaniu procedury badania relaksacji naprężeń w otrzymanych próbkach, dopasowaniu równania opisującego pięcioparametrowy model Maxwella-Wiecherta do eksperymentalnych danych, opracowaniu wyników badań oraz współredagowaniu artykułu.

- A4. Bochnia J.: Mechanical properties of materials obtained by 3d-printing technology, 23rd International Conference ENGINEERING MECHANICS 2017, Svratka, Czech Republic, Book Series: Engineering Mechanics 2017, pp. 174-177 (materiały konferencyjne indeksowane na WoS) – mój udział procentowy szacuję na 100 %.
- A5. Bochnia J.: Relaxation of materials obtained using polyjet technology, 23rd International Conference ENGINEERING MECHANICS 2017, Svratka, Czech Republic, Book Series: Engineering Mechanics 2017, pp. 178 – 181, (materiały konferencyjne indeksowane na WoS) – mój udział procentowy szacuję na 100 %.
- A6. Adamczak St., Bochnia J.: Estimating the approximation uncertainty for digital materials subjected to stress relaxation tests, Metrology and Measurement Systems, Vol. 23, No. 4, 2016, pp. 545 553, (lista A MNiSW, liczba punktów w roku wydania: 20, impact factor w roku wydania: 1.598) mój udział procentowy szacuję na 60 %. Mój udział polegał na: przeprowadzeniu analizy wiedzy w zakresie badań właściwości reologicznych materiałów wytwarzanych technologiami przyrostowymi, wykonaniu próbek technologią przyrostową z tzw. materiałów cyfrowych, przeprowadzeniu testów relaksacji naprężeń, opracowaniu wyników badań i współredagowaniu artykułu oraz zrealizowaniu procedury przekazania manuskryptu do redakcji.
- A7. Bochnia, J., Blasiak, S.: Anisotrophy of mechanical properties of a material which is shaped incrementally using polyjet technology, in: I. Zolotarev, V. Radolf (Eds.), ENGINEERING MECHANICS 2016, ACAD SCI CZECH REPUBLIC, INST THERMOMECHANICS, DOLEJSKOVA 5, PRAGUE 8, 182 00, CZECH REPUBLIC, 2016, pp. 74 77, (materiały konferencyjne indeksowane na WoS) mój udział procentowy szacuję na 60 %.
 Mój udział polegał na: przeprowadzeniu analizy wiedzy w zakresie tematyki artykułu

Mój udział polegał na: przeprowadzeniu analizy wiedzy w zakresie tematyki artykułu, opracowaniu i wykonaniu procedury statycznej próby rozciągania badanych elementów z uwzględnieniem kierunków wydruku, oszacowaniu niepewności pomiarów

wytrzymałości na rozciąganie, współredagowaniu artykułu oraz przeprowadzeniu procedury przekazania manuskryptu do redakcji.

A8. Adamczak St., Bochnia J., Kaczmarska B.: An analysis of tensile test results to assess the innovation risk for an additive manufacturing technology, Metrology and Measurement Systems, Vol. 22, No. 1, 2015, pp. 127 – 138, (lista A MNiSW, liczba punktów w roku wydania: 20, impact factor w roku wydania: 1.140) – mój udział procentowy szacuję na 40 %.

Mój udział polegał na: przeprowadzeniu analizy wiedzy w zakresie tematyki objętej artykułem, wykonaniu próbek technologią przyrostową z uwzględnieniem kierunków wydruku, opracowaniu procedury i wykonaniu testów statycznej próby rozciągania, opracowaniu wyników badań, współredagowaniu artykułu oraz zrealizowaniu procedury przekazania manuskryptu do redakcji.

A9. Adamczak St., Bochnia J., Kaczmarska B.: Estimating the uncertainty of tensile strength measurment for a photocured material produced by additive manufacturing, Metrology and Measurement Systems, Vol. 21, No. 3, 2014, pp. 553 – 560, (lista A MNiSW, liczba punktów w roku wydania: 15, impact factor w roku wydania: 0.925) – mój udział procentowy szacuję na 33 %.

Mój udział polegał na: przeprowadzeniu analizy wiedzy w zakresie badań właściwości mechanicznych materiałów wytwarzanych technologiami przyrostowymi, wykonaniu próbek technologią PolyJet i testów statycznej próby rozciągania, opracowaniu wyników badań, współredagowaniu artykułu oraz zrealizowaniu procedury przekazania manuskryptu do redakcji.

A10. Kundera C., Bochnia J.: Investigating the stress relaxation of photopolymer O-ring seal models, Rapid Prototyping Journal, Vol. 20, No. 6, 2014, pp. 533 – 540, (lista A MNiSW, liczba punktów w roku wydania: 25, impact factor w roku wydania: 2.031) – mój udział procentowy szacuję na 50 %.

Mój udział polegał na: przeprowadzeniu analizy wiedzy w zakresie stosowania i badań pierścieni typu o-ring, przygotowaniu modeli 3D i modeli fizycznych pierścieni typu oring przy pomocy technologii przyrostowej PolyJet, opracowaniu procedury badań, wykonaniu testów relaksacji naprężeń w pierścieniach obciążonych osiowo i promieniowo, opracowaniu wyników testów oraz współredagowaniu artykułu.

- A11. Adamczak St., Bochnia J., Kundera C.: Stress and strain measurements in static tensile tests, Metrology and Measurement Systems, Vol. 19, No. 3, 2012, pp. 531 540, (lista A MNiSW, liczba punktów w roku wydania: 20, impact factor w roku wydania: 0.982) mój udział procentowy szacuję na 40 %. Mój udział polegał na: przeprowadzeniu analizy wiedzy w zakresie szacowania niepewności pomiarów naprężeń, opracowaniu procedury badań i wykonaniu testów statycznej próby rozciągania, opracowaniu wyników badań, udział w redagowaniu artykułu oraz przeprowadzeniu procedury przekazania manuskryptu do wydawcy.
- A12. Bochnia, J.: Ideal Material Models for Engineering Calculations, in: V. Martsynkovskyy, A. Zahorulko (Eds.), XIIITH INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND ENGINEERING CONFERENCE HERMETIC SEALING, VIBRATION RELIABILITY AND ECOLOGICAL SAFETY OF PUMP AND COMPRESSOR MACHINERY-HERVICON-2011, **SCIENCE** ELSEVIER BV. SARA BURGERHARTSTRAAT 25, PO BOX 211, 1000 AE AMSTERDAM, NETHERLANDS, Vol. 39, 2012, pp. 98 – 110. (materialy konferencyjne indeksowane na WoS) – mój udział procentowy szacuję na 100 %.

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

<u>Uzasadnienie celu i zakresu badań</u>

Materiały inżynierskie są kluczowym komponentem budowy i eksploatacji maszyn. Wraz z rozwojem techniki materiały naturalne np. kamień, drewno zaczęto zastępować materiałami inżynierskimi wymagającymi zastosowania złożonych procesów wytwórczych. Im większe wymagania konstrukcyjne i eksploatacyjne stawiane są elementom maszyn tym większe wymagania jakościowe stawiane są również materiałom inżynierskim. Inżynier projektujący maszynę lub jej element, dobierając materiał rozpatruje jego właściwości fizyczne w tym mechaniczne, właściwości ekonomiczne i estetyczne. Ocena właściwości materiałów wiąże się z przeprowadzeniem odpowiednich badań, określeniem parametrów charakteryzujących materiały i porównaniem ze wskaźnikami objętymi standaryzacją.

W konwencjonalnym ujęciu większość elementów maszyn wytwarza się z półfabrykatów sprzedawanych w postaci prętów o określonym przekroju, płyt, arkuszy, granulatów itp. stosując obróbkę mechaniczną, plastyczną lub np. wtryskiwanie tworzyw lub odlewnictwo. Zwykle właściwości wytworzonych tymi technologiami elementów zasadniczo nie różnią się od właściwości półfabrykatów chyba, że zastosujemy obróbkę cieplną lub chemiczną np. hartowanie, azotowanie itp.

Pojawienie się w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia pierwszych maszyn technologicznych do szybkiego prototypowania zwanych popularnie drukarkami 3D przyczyniło się również do powstania nowej techniki wytwarzania materiałów. Obecnie mówimy o technologiach przyrostowych, przy pomocy których kształtowany jest zarówno element jak i materiał, z którego jest on wykonany. Kształtowanie materiałów ma zatem charakter przyrostowy (warstwa po warstwie). Technologie przyrostowe znane w początkowej fazie swojego rozwoju jako Rapid Prototyping, znajdują coraz szersze zastosowanie w wielu obszarach techniki, od różnych gałęzi przemysłu poprzez wzornictwo, architekture az po medycynę. Technologie przyrostowe zaliczane są do niekonwencjonalnych metod wytwarzania. Coraz częściej używa się ich nie tylko do wytwarzania modeli czy prototypów, ale także gotowych produktów lub półfabrykatów. Stan aktualny i perspektywy rozwoju technologii addytywnych omówione zostały przez niektórych autorów w specjalistycznych czasopismach naukowych, w których zaprezentowano możliwości aplikacji przemysłowych, rozwoju materiałów i zamierzenia projektowe.

Powyżej opisane, krótkie rozważanie skłoniło mnie do podjęcia badań właściwości materiałów otrzymywanych technologiami przyrostowymi. Zwłaszcza, że poprzez całe swoje życie zawodowe, począwszy od pracy magisterskiej dotyczącej analizy stanu odkształceń i naprężeń powstających w procesie technologicznym wytwarzania wybranych wytłoczek karoseryjnych, poprzez pracę konstruktora i technologa w dużym zakładzie przemysłowym, studia doktoranckie, pracę w jednostce badawczo-rozwojowej w tym w laboratorium badań materiałowych oraz pracę doktorską zajmowałem się badaniem właściwości materiałów.

Tematyka badań właściwości mechanicznych materiałów wytwarzanych poprzez przyrostowe kształtowanie podejmowana jest przez różne ośrodki na świecie. Prezentowane wyniki badań dotyczą różnych materiałów polimerowych, ceramicznych, kompozytowych, metalowych oraz wpływu parametrów technologicznych na właściwości mechaniczne tych materiałów. Kształtowanie przyrostowe materiału jest ściśle związane z konkretną technologią i zastosowaną maszyną technologiczną, na przykład w przypadku spiekania laserowego proszków poliamidowych, półfabrykatem jest proszek (ośrodek sypki) zasypywany do podajnika maszyny, zaś gotowy element (ciało stałe) powstaje poprzez nanoszenie proszku warstwa po warstwie i spiekanie laserowe. Element zostaje osadzony na platformie roboczej maszyny. W przypadku technologii PolyJet półfabrykat w postaci ciekłej fotoutwardzalnej żywicy natryskiwany jest na platformę maszyny warstwa po warstwie i utwardzany przy pomocy światła ultrafioletowego. Otrzymany model (ciało stałe) po zdjęciu z platformy i usunięciu materiału podporowego może podlegać dalszej obróbce lub pełnić funkcje użytkowe. W podobny sposób tj. warstwa po warstwie kształtowane są modele (ciała stałe) i osadzane na platformach roboczych maszyn technologicznych (drukarek 3D). Ten sposób powstawania materiałów determinuje ich właściwości, zwłaszcza mechaniczne.

Większość autorów prac z zakresu badań materiałów otrzymywanych technologiami przyrostowymi wskazuje na anizotropowość właściwości mechanicznych. Problemów badawczych jest znacznie więcej, na przykład: metody badań, niepewności pomiarów czy też występowania zjawisk relaksacji. Trzeba tu podkreślić, że spora grupa materiałów otrzymywanych technologiami przyrostowymi to polimery a te jak wiadomo wykazują istotne właściwości reologiczne. Dodatkowe czynniki mające wpływ na właściwości otrzymywanych materiałów występują już na etapie projektowania. Model lub element projektowany jest z zastosowaniem programu CAD i zapisywany w pliku z rozszerzeniem *.stl.* Jest to konieczne z tego względu, że plik z tym rozszerzeniem odczytywany jest przez programy maszyn drukujących. Zapisywanie do pliku *.stl* wymaga określenia parametrów triangulacji tj. tolerancji odchylenia i tolerancji kąta. Od tych parametrów zależy również jakość wydruku, na przykład zbyt duża wartość parametru tolerancji kąta powoduje występowanie tzw. efektu schodkowego w miejscach gdzie występują krzywizny elementu.

Wszystkie wyżej przedstawione problemy zachęciły mnie do badań właściwości mechanicznych i reologicznych materiałów otrzymywanych technologiami przyrostowymi zwłaszcza, że jak wskazuje szerokie studium literatury technologie przyrostowe rozwijają się bardzo szybko, powstają nowe materiały i istnieje duża potrzeba badań w tym zakresie.

Przedmiot badań

Przedmiotem badań są wybrane materiały otrzymywane technologiami przyrostowymi. Jeszcze kilka lat temu producenci półfabrykatów, czyli materiałów modelowych stosowanych w drukarkach 3D podawali w swoich katalogach informacyjnych właściwości mechanicznem, nie rozgraniczając kierunków wydruku. W tym okresie zaczęły ukazywać się artykuły przedstawiające wyniki badań, z których wynikało, że otrzymane technologiami przyrostowymi modele (próbki) wykazują dużą anizotropię. Nie podawano jednak niepewności pomiarów mierzonych wielkości. Również katalogi poszczególnych firm oferujących materiały stosowane w technologiach przyrostowych pomijają również obecnie niepewność pomiarów ograniczając się do podania informacji o wartości nominalnej lub zakresie danego parametru charakteryzującego właściwość materiału np. wytrzymałość na rozciąganie. Badania właściwości mechanicznych materiałów polimerowych otrzymywanych technologiami przyrostowymi prowadzone są najczęściej w oparciu o normy stosowane do tworzyw sztucznych. Większość firm i ośrodków badawczych amerykańskich wykonuje próbki i przeprowadza badania wg ASTM D638. Na rynku europejskim stosowane są natomiast najczęściej normy ISO 527, przy czym próbki do badań wykonywane są wg ISO 527-1. Dlatego też rozpoczynając badania nad materiałami otrzymywanymi technologiami przyrostowymi 3D, najpierw przystąpiłem do oszacowania niepewności pomiarów parametrów otrzymanych w statycznym rozciąganiu próbek wykonanych technologią przyrostową z żywicy fotoutwardzalnej FullCure 720 [A9].

W technologii PolyJet stosowane są mieszaniny różnych związków chemicznych zawierających głównie polimerowe akrylowe żywice foto-utwardzalne, pozwalające na uzyskanie prototypów o różnych właściwościach. Użytkownicy urządzeń posługują się nazwami handlowymi (Fullcure 720, Vero, Tango, DurusWhite). Nie ma klasyfikacji materiałów stosowanych w technologii PolyJet i PolyJet Matrix tak jak np. w przypadku stopów metali, dlatego z konieczności użytkownicy posługują się nazwami handlowymi. Receptury materiałów używanych do budowania modeli technologią przyrostową PolyJet Matrix oraz urządzenia zostały objęte ochroną patentową – około kilkadziesiąt różnych patentów. W pracy **[A2]** podałem na przykładzie jednego z patentów zestawienie ponad dwudziestu różnych związków chemicznych stosowanych w komponowaniu różnych mieszanek stosowanych do budowania modeli technologią przyrostową PolyJet Matrix.

Próbki do badań opisanych w pracy [A9] wykonałem z żywicy fotoutwardzalnej FullCure 720 technologia PolyJet, z zastosowaniem drukarki Connex 350 firmy Objet w ilości 30 szt. Wybrałem typ I próbki wg ASTM D638 o wymiarach: szerokość części roboczej, 13 ± 0.02 mm; długość części roboczej, 57 ± 0.02 mm; szerokość główki do mocowania próbki, 19 ± 0.025 mm; długość całej próbki, $165 \pm$ no max; długość bazy ekstensometru, 50 \pm 0,01 mm; odległość między szczękami, 115 \pm 0,02 mm; promień między główką a częścią roboczą, 76 ± 0.04 mm i grubość, 4 ± 0.4 mm. Model bryłowy próbki narysowałem w programie CAD 3D i zapisałem w pliku cyfrowym z rozszerzeniem .stl stosując parametry triangulacji w opcjach eksportu: rozdzielczość – dostosowana, odchylenie - tolerancja 0,016 mm, kąt - tolerancja 5⁰. Następnie używając programu Objet Studio umieściłem (wirtualnie) modele próbek na platformie roboczej maszyny Connex 350. Próbki wykonałem w trybie Glossy w celu uzyskania gładkiej powierzchni. Po wydrukowaniu, przygotowałem próbki do przeprowadzenia statycznej próby rozciągania. Badanie wykonałem z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej Ispect mini. Niepewność pośrednio zmierzonej wartości wytrzymałości na rozciąganie R_m oszacowałem zgodnie z procedurami opisanymi w pracy [A11] i obliczyłem ze wzoru:

$$u_{R_m} = \sqrt{\left(\frac{1}{\overline{a}_0 \overline{b}_0}\right)^2 u_{F_m}^2 + \left(\frac{-\overline{F}_m}{\overline{a}_0^2 \overline{b}_0}\right)^2 u_{aA}^2 + \left(\frac{-\overline{F}_m}{\overline{a}_0 \overline{b}_0^2}\right)^2 u_{bA}^2}$$
(1)

gdzie: $\overline{F}_m = 2329 \text{ N} - \text{średnia wartość maksymalnej siły rozciągającej,}$

 $u_{F_m} = 15,2$ N – niepewność średniej wartości maksymalnej siły rozciągającej,

 $\overline{a}_0 = 3.97 \text{ mm} - \text{średnia grubość próbek,}$

 $u_{aA} = 0,0021 \text{ mm} - \text{niepewność średniej grubości próbek},$

 $\overline{b}_0 = 13 \text{ mm} - \text{średnia szerokość próbek},$

 $u_{bA} = 0,02 \text{ mm} - \text{niepewność średniej szerokości próbek.}$

Ostatecznie niepewność pomiaru wytrzymałości na rozciąganie zmierzonej pośrednio na podstawie rozciągania trzydziestu próbek wykonanych technologią przyrostową z żywicy

FullCure 720, wyniosła $u_{R_m} = 0,295$ MPa, zaś wartość wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 45,1$ MPa. Z przeprowadzonych badań wynika, że uzyskano dobrą powtarzalność wyników w zakresie maksymalnej siły rozciągającej, natomiast po jej przekroczeniu, w obszarze odkształceń plastycznych próbki pękały przy różnych wydłużeniach. Można stwierdzić, że oszacowana wartość niepewności pomiarów świadczy o dużej powtarzalności wyników w zakresie do osiągnięcia maksymalnej siły rozciągającej.

Badania wytrzymałości na rozciąganie próbek wykonanych z żywicy FullCure 720 tym razem dla trzech kierunków wydruku wykonałem już dla liczności próbek 10 dla każdego kierunku wydruku, co zostało opisane w pracy [A7]. Zastosowano pozostałe parametry i warunki badań jak w pracy [A9], z tym, że modele próbek rozmieszczono (wirtualnie) używając programu Objet Studio na platformie roboczej maszyny Connex 350 w trzech różnych pozycjach zgodnie z ruchem wzdłużnym głowicy drukującej:

- kierunek X próbka boczną stroną umieszczona na platformie roboczej,
- kierunek Y próbka płaską stroną umieszczona na platformie roboczej,
- kierunek Z próbka pionowo umieszczona na platformie roboczej.

Rozmieszczone wirtualnie na platformie roboczej w programie Objet Studio modele próbek przedstawia rysunek 1.



Rys. 1: Rozmieszczenie próbek na platformie roboczej – żywica FullCure 720; a) ustawienie boczne – kierunek X, b) ustawienie powierzchnią płaską – kierunek Y, c) ustawienie pionowe – kierunek Z.

Przykładowe wykresy zbiorcze zmiany siły obciążającej próbki w funkcji przemieszczenia otrzymane bezpośrednio z komputera maszyny testującej przedstawiają rysunki 2, 3 i 4.



Rys. 2: Wykresy rozciągania próbek ustawionych na platformie roboczej boczną stroną w kierunku X.



Rys. 3: Wykresy rozciągania próbek ustawionych na platformie roboczej płaską stroną poziomo w kierunku Y.



Rys. 4: Wykresy rozciągania próbek ustawionych na platformie roboczej pionowo w kierunku Z.

Wartości wytrzymałości na rozciąganie otrzymane w poszczególnych testach oraz niepewności pomiarów zestawiono w tablicy 1

Kierunek ustawienia próbek	Średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie \overline{R}_m [MPa]	Wartość niepewności pomiarów u _{R_m} [MPa]
1	2	3
Х	45,17	0,59
Y	44,28	0,45
Z	37,79	0,66

Tab. 1: Wyniki testów wytrzymałości na rozciąganie.

Z przeprowadzonych badań wynika, że wytrzymałość na rozciąganie R_m próbek wykonywanych w pozycji pionowej jest o 19,5% mniejsza od wytrzymałości próbek wykonanych w kierunku X i 17,2 % mniejsza od wytrzymałości próbek wykonanych w kierunku Y. Pewnym "zaskoczeniem" jest, jak pokazuje to rysunek 4, brak typowego odkształcenia plastycznego. Niepewność pomiarów u_A dla próbek ustawionych na platformie

roboczej pionowo jest o 11,1% większa niż dla próbek wykonanych w kierunku X i o 46% większa niż dla próbek drukowanych w kierunku Y. Jak pokazują wykresy zbiorcze (Rys. 2, 3) rozciągania próbek wykonanych w pozycji poziomej, uzyskano dobrą powtarzalność wyników w zakresie wytrzymałości na rozciąganie, natomiast po jej przekroczeniu, w obszarze odkształceń plastycznych, próbki pękały przy różnych wydłużeniach. Gorsze właściwości wykazały, jak pokazuje to wykres zbiorczy rozciągania (Rys. 4) próbki wykonane w pozycji pionowej. Materiał próbek budowany przyrostowo w kierunku Z (pionowym) nie wykazał właściwości plastycznych, posiadał wytrzymałość na zerwanie mniejszą od materiału próbek budowanych w kierunku poziomym. Również niepewność pomiarów wytrzymałości na rozciąganie próbek pionowych była mniejsza od niepewności próbek budowanych poziomo, co świadczy o większym rozrzucie wyników. Z przeprowadzonych badań wynika, że materiał budowany technologią przyrostową posiada wyraźne właściwości anizotropowe determinowane kierunkami przyrostu warstw.

Podobne właściwości do opisanego powyżej materiału wykazała żvwica fotoutwardzalna VeroWhite. Wyniki jej badań opisane zostały w pracy [A8]. Próbki do badań wykonano technologia PolyJet, z zastosowaniem drukarki Connex 350 firmy Objet. Do statycznej próby rozciągania zastosowałem małe próbki o wymiarach zgodnych z normą ISO 527-1 o następujących wymiarach: szerokość waskiej (roboczej) części próbki 5±0,05 mm, długość wąskiej części 30±0,05 mm, grubość nominalna próbki 4 mm (zalecana przez normę ≥2 mm), szerokość części chwytowej 10±0,5 mm, całkowita długość próbki ≥75 mm. Rozmieszczone wirtualnie na platformie roboczej modele próbek w programie Objet Studio przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Rozmieszczenie próbek na platformie roboczej programu Objet.

Wykresy zbiorcze rozciągania we współrzędnych: naprężenie – odkształcenie przedstawiono na rysunkach 6, 7 i 8.



Rys. 6. *Wykresy rozciągania próbek z materiału Vero White, ustawionych na platformie roboczej boczną stroną w kierunku X, zgodnie z ruchem wzdłużnym głowicy drukującej.*



Rys. 7. *Wykresy rozciągania próbek z materiału Vero White, ustawionych na platformie roboczej płaską stroną w kierunku Y, zgodnie z ruchem wzdłużnym głowicy drukującej.*



Rys. 8. Wykresy rozciągania próbek z materiału Vero Whitem, ustawionych na platformie pionowo w kierunku Z.

Wartość średnia wytrzymałości na rozciąganie oraz niepewność pomiarów dla próbek wykonanych w poszczególnych kierunkach wyniosła:

- dla próbek drukowanych w kierunku X, $\overline{R}_m = 22.6 \pm 0.8$ MPa,

- dla próbek drukowanych w kierunku Y, $\overline{R}_m = 17.9 \pm 1.8$ MPa,

- dla próbek drukowanych w kierunku Z, $\overline{R}_m = 23.7 \pm 0.8$ MPa.

Z przeprowadzonych badań wynika, że próbki wykonywane przy różnych ustawieniach na platformie roboczej różnią się nie tylko wartościami poszczególnych parametrów np. wartościami wytrzymałości na rozciąganie, ale sklasyfikować je można ze względu na przynależność do różnych grup tworzyw. Posługując się przykładem normy ISO-527 można przyjąć, że:

- materiał próbek drukowanych w kierunku X (ustawione bokiem) zalicza się do grupy tworzyw wzmocnionych bez granicy plastyczności,
- materiał próbek drukowanych w kierunku Y (ustawione płasko) zalicza się do grupy tworzyw wzmocnionych z granicą plastyczności,
- materiał próbek drukowanych w kierunku Z (ustawione pionowo) zalicza się do grupy tworzyw kruchych.

Nadmienić należy, że jest to ten sam materiał pod względem chemicznym o nazwie handlowej Vero White, ale ze względu na sposób wykonania tj. kierunek nanoszenia poszczególnych warstw i tym samym sposób naświetlania lampą UV otrzymuje się bryłę materiału o zróżnicowanych właściwościach.

Ponadto z przeprowadzonych badań wynika, że wytrzymałość na rozciąganie R_m próbek wykonywanych w pozycji pionowej jest o 4,6 % większa od wytrzymałości próbek wykonanych w kierunku X i 24,47 % większa od wytrzymałości próbek wykonanych w kierunku Y. Jak pokazuje to rysunek 8, brak typowego odkształcenia plastycznego. Stwierdzono, że największa niepewność pomiarów wytrzymałości na rozciąganie dotyczy próbek drukowanych w kierunku Y, jest ona 118 % większa od niepewności pomiarów wytrzymałości na rozciąganie próbek drukowanych w kierunku X i o 116 % większa od niepewności pomiarów wytrzymałości na rozciąganie próbek drukowanych w kierunku Z. Wyniki te wskazują na wyraźną anizotropię właściwości materiału w odniesieniu do kierunków wydruku. Badanie właściwości wytrzymałościowych oraz szacowanie niepewności otrzymanych wyników ma znaczenie nie tylko w obliczeniach inżynierskich, ale również w ocenie ryzyka innowacyjnego zwłaszcza w procesie wdrażania innowacyjnych technologii, co również wykazano w pracy **[A8]**.

Nieco inne właściwości wykazują materiały wykonane technologią 3D Printing tj. spajanie proszków ceramicznych. Są to materiały kruche, dlatego nie wykonywałem próby rozciągania, ale próbę ściskania, co opisane zostało w pracy **[A4]**. Próbki do badań wykonałem z proszku ceramicznego ZP-150 technologią 3D-Printing, z zastosowaniem drukarki ZPrinter 650 (obecna nazwa ProJet 660) i materiałów firmy 3D Systems. Wykonałem próbki walcowe o wymiarach: wysokość 15 mm i średnica 10 mm. Próbki wydrukowałem w orientacji:

- poziomej, kierunek wydruku X – 20 szt.

- pionowej, kierunek wydruku Z – 20 szt.

Następnie po oczyszczeniu próbek z resztek proszku wybrałem po 10 szt. z każdego kierunku wydruku i utwardziłem środkiem epoksydowym chemoutwardzalnym dwuskładnikowym o nazwie handlowej Z-max. W ten sposób otrzymano cztery serie próbek, po 10 szt. w każdej serii: utwardzone i nieutwardzone wydrukowane poziomo oraz utwardzone i nieutwardzone wydrukowane pionowo. Statyczną próbę ściskania wykonałem z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej Ispekt mini (Hegewald & Peschke MPT GmbH) o zakresie 3 kN, wyposażonej w płaskie talerze do ściskania. Akwizycję danych pomiarowych oraz ustawienie parametrów testu wykonałem przy pomocy programu Labmaster (Version 2.5.3.21), będącym na wyposażeniu maszyny Inspect mini. Przykładowe wykresy zbiorcze naprężenie w funkcji odkształcenia otrzymane bezpośrednio z komputera maszyny testującej przedstawiono na rysunkach 9, 10, 11 i 12.



Rys. 9. Zależność obciążenie-przemieszczenie dla próbek wykonanych z proszku ceramicznego ZP-150, nieutwardzonych o średnicy 10 mm drukowanych w pozycji poziomej – kierunek X.



Rys. 10. Zależność obciążenie-przemieszczenie dla próbek nieutwardzonych wykonanych z proszku ceramicznego ZP-150, o średnicy 10 mm drukowanych w pozycji pionowej – kierunek Z.



Rys. 11. Zależność obciążenie-przemieszczenie dla próbek wykonanych z proszku ceramicznego ZP-150, o średnicy 10 mm drukowanych w pozycji poziomej – kierunek X, utwardzonych środkiem epoksydowym chemoutwardzalnym dwuskładnikowym.



Rys. 12. Zależność obciążenie-przemieszczenie dla próbek wykonanych z proszku ceramicznego ZP-150, utwardzonych o średnicy 10 mm drukowanych w pozycji pionowej – kierunek Z, utwardzonych środkiem epoksydowym chemoutwardzalnym dwuskładnikowym.

Wyniki testów: średnia wytrzymałość na ściskanie $\overline{\sigma}$ i średnie odkształcenie jednostkowe próbek $\overline{\varepsilon}$ przedstawiono w tablicy 2.

Kierunek X		Kier	unek Z
próbki nieutwardzone	próbki utwardzone	próbki nieutwardzone	próbki utwardzone
Średnia wytrzymałość na ściskanie ō[MPa]	Średnia wytrzymałość na ściskanie ♂[MPa]	Średnia wytrzymałość na ściskanie ♂[MPa]	Średnia wytrzymałość na ściskanie ∂[MPa]
$\overline{\sigma}$ = 3,29	$\overline{\sigma}$ = 9,95	$\overline{\sigma}$ = 2,46	$\overline{\sigma}$ = 4,64
Średnie odkształcenie <u> </u> <i> </i>	Średnie odkształcenie <i>ɛ</i> [%]	Średnie odkształcenie <i>ɛ</i> [%]	Średnie odkształcenie ₽[%]
$\overline{\varepsilon} = 8,6$	$\overline{\varepsilon} = 18,6$	$\overline{\varepsilon} = 15,1$	$\overline{\varepsilon} = 20,5$

Tablica. 2. Wyniki statycznej próby ściskania próbek wykonanych technologią 3D-Printing.

Z przeprowadzonych badań wynika, że materiał budowany technologią przyrostową 3D-Printing posiada wyraźne właściwości anizotropowe determinowane sposobem ustawienia

elementu na platformie roboczej maszyny, a tym samym kierunkiem wydruku. Próbki drukowane w kierunku pionowym zarówno nieutwardzone jak i utwardzone żywicą mają odpowiednio mniejszą wytrzymałość na ściskanie niż próbki drukowane w kierunku poziomym. Utwardzenie żywicą zwiększa wytrzymałość na ściskanie od dwóch do około trzech razy. Testy wytrzymałości na ściskanie wykazały duże rozrzuty.

Większość polimerowych materiałów otrzymywanych technologiami przyrostowymi wykazuje właściwości reologiczne, do których należy relaksacja naprężeń. W związku z tym, że materiały te stosowane są do modelowania elementów przenoszących różne naprężenia oraz do modelowania elementów gumo-podobnych postanowiłem przeprowadzić badania relaksacji naprężeń w tych materiałach. Najbardziej przydatne do takich badań okazały się materiały cyfrowe otrzymywane technologią PolyJet Matrix.

Materiały cyfrowe powstają w wyniku zmieszania dwóch materiałów bazowych (żywic) na platformie roboczej maszyny (drukarki 3D). Dozowanie kropel żywic z zastosowaniem odpowiednich głowic jest sterowane cyfrowo – stad nazwa "materiały cyfrowe". Podstawowa linie tworzą materiały bazowe o handlowych nazwach TangoBlackPlus i VeroWhitePlus, które zmieszane ze sobą w różnych proporcjach pozwalają na otrzymanie nowych materiałów o różnych twardościach Shore'a. Grupa materiałów TangoBlack to materiały gumo podobne o wytrzymałości na rozciąganie (wg katalogu producenta) 0,8 – 1,5 MPa dla przykładowo wybranego TangoBlack Plus FLX980, natomiast VeroWhite to grupa materiałów sztywnych o wytrzymałości na rozciąganie 20 - 30 MPa dla przykładowo wybranego Durus White RGD430. Trzeba tu dodać, że właściwości materiałów podawane w katalogach mają charakter orientacyjny. Materiały kształtowane przyrostowo wykazują anizotropię w zależności od ustawienia na platformie roboczej maszyny, czyli od kierunku wydruku, co wcześniej opisywałem. Materiały cyfrowe doskonale nadają się do modelowania takich elementów jak pierścienie uszczelniające, membrany, elementy sprężysto-tłumiące, prowadnice przewodów, modele mięśni i wszelkie inne elementy konstrukcyjne wykonywane z tworzyw polimerowych. Materiały cyfrowe mogą doskonale symulować najbardziej popularne tworzywa np.: akryl, PTFE, ABS, PA, gumy, poliuretany.

Z materiałów cyfrowych (fotopolimery używane w technologii PolyJet MatrixTM) wykonałem modele pierścieni uszczelniających o przekroju okrągłym (oringi) i przeprowadziłem badania ich właściwości relaksacyjnych **[A10]**.

Pierścienie uszczelniające o przekroju kołowym montowane są w zabudowie statycznej lub w zabudowie dla ruchu posuwisto-zwrotnego. Zarówno w zabudowie statycznej jak i w zabudowie przeznaczonej dla ruchu posuwisto zwrotnego pierścienie dociskane są wstępnie pewną siłą w celu zapewnienia szczelności na styku z elementem współpracującym. Dalszy nacisk wywołany jest ciśnieniem medium i pierścień z jeszcze większą siłą dociskany jest do powierzchni uszczelnianej. Niemal w każdej konstrukcji uszczelnienia czołowego występują pierścienie o przekroju kołowym (O-ringi) i spełniają rolę tzw. uszczelnień wtórnych, pomocniczych. Pierścienie te pracują albo w warunkach statycznych lub dynamicznych i wówczas zapewniają szczelność połączenia dla ruchu posuwisto-zwrotnego.

Procedura badań relaksacji pierścieni wraz z wynikami opisane zostały zarówno dla obciążenia osiowego swobodnego (unrestrained axial loading) jak i dla obciążenia promieniowego (restrained radial loading) **[A10]**. W badaniach z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej realizowano obciążenie trzyetapowe. Wszystkie parametry tj. obciążenie, przemieszczenie i czas były rejestrowane, co umożliwiło sporządzenie odpowiednich

wykresów i ich dalszą obróbkę statystyczną. Otrzymane charakterystyki relaksacji opisano przy pomocy określonych funkcji statystycznych, wykorzystując szeregi Prony.

Badając relaksację całego układu pierścień – zabudowa nie można było ocenić relaksacji materiału poszczególnych pierścieni. Dlatego postanowiłem wykonać próbki walcowe, tak aby zapewnić utrzymanie jednoosiowego stanu naprężenia i oszacować relaksację wybranych materiałów cyfrowych.

Relaksacja naprężeń w materiałach polimerowych została opisana w wielu pracach, natomiast nie spotkałem (przynajmniej do momentu, w którym rozpocząłem badania w tym obszarze) wyników badań relaksacji naprężeń dla materiałów otrzymywanych technologiami przyrostowymi. Podkreślić należy, że istnieje wiele prac dotyczących opisu relaksacji, a ściślej zależności zmian naprężenia w funkcji czasu $\sigma = f(t)$ przy pomocy modeli reologicznych zwanych również modelami ciał idealnych. Przedstawiłem również w pracy **[A12]** próbę przypisania modelu standard II do materiałów poliuretanowych. Dla rzeczywistych próbek wykonanych z materiałów poliuretanowych wykonano próbę relaksacji a następnie do równania opisującego model standardowy II podstawiono dane z eksperymentu. Zbudowano układ trzech równań, który pozwolił wyznaczyć współczynniki równania ogólnego. Otrzymano również teoretyczną krzywą relaksacji, która w sporym zakresie pokrywała się z krzywą rzeczywistą. Metoda jednak nie jest uniwersalna i może być zastosowana do modeli zawierających najwyżej trzy parametry. Dlatego w dalszych badaniach zastosowałem inne metody dopasowania.

W różnych pracach dotyczących badań relaksacji materiałów dokonywano prób dopasowania funkcji teoretycznych do eksperymentalnych osiągając zadowalające efekty dla pojedynczych testów. Natomiast w przypadku serii badań zagadnienie jest nieco bardziej skomplikowane i należałoby rozważyć kwestię oszacowania niepewności pomiarów współczynników równań modeli reologicznych, które chcemy przypisać do danego materiału.

Biorąc pod uwagę powyżej opisane problemy, dokonałem próby oszacowania niepewności aproksymacji parametrów otrzymanych w wyniku badań relaksacji. Wyniki zostały zamieszczone w pracy [A6].

Próbki do badań wykonałem z materiałów cyfrowych (żywice fotoutwardzalne) o nazwach handlowych: Vero White, Tango Black plus oraz DM_9850_Shore50, który jest mieszanką Vero White i Tango Black plus, jeden z materiałów pośrednich. Próbki walcowe o wymiarach: średnica D = 10 mm i wysokość H = 15 mm wykonałem technologią przyrostową PolyJet Matrix (z zastosowaniem drukarki Connex 350 firmy Objet (obecnie Stratasys). Rozmieszczone wirtualnie na platformie roboczej modele próbek w programie Objet Studio przedstawia rysunek 13.



Rys.13. Modele próbek rozmieszczone na platformie roboczej w programie Objet Studio.

Do ściskania próbek walcowych zastosowałem płaskie talerze. Próbki umieściłem pojedynczo, centralnie na dolnym talerzu w pozycji pionowej a następnie dosuwałem górny talerz zamocowany w uchwycie poprzeczki maszyny tak, aby zetknął się z płaską powierzchnią próbki. Obciążenie wywołane stykiem nie powinno być większe niż 10 N. Następnie tarowałem (zerowanie) wszystkie wskazania tj, obciążenie, droga, czas i uruchamiałem test. W pierwszym bloku programu zadałem wartość przemieszczenia 1 mm przy prędkości przemieszczenia talerza ściskającego v = 10 m/min. Drugi blok programu obejmował zatrzymanie ruchu talerza i utrzymywanie stałej wartości przemieszczenia 1 mm przez określony czas np. 300 s. W tym czasie następował spadek siły obciążającej i tym samym naprężeń ściskających (relaksacja naprężeń) zapisany w postaci wykresu. Trzeci blok programu to powrót talerza do pozycji wyjściowej (zerowej), w tym czasie nastąpiło odciążenie próbki. Przykładowy wykres całego testu relaksacji przedstawia rysunek 14.

Wykres podzielono na trzy elementy. Pierwszy (1) to możliwie szybki wzrost obciążenia w celu osiągnięcia przemieszczenia 1 mm. Imituje on skok jednostkowy, który teoretycznie odbywa się z nieskończenie dużą prędkością i w realnych warunkach nie jest możliwy do zrealizowania. Na potrzeby testu wykonałem go z odpowiednio dużą prędkością i nazwałem skokiem quasi-jednostkowym (zauważyć można niewielkie nachylenie prostej (1) na rysunku 3). Drugi element to właściwy wykres relaksacji naprężeń (2) tzw. krzywa relaksacji. W dalszej części pracy tylko te krzywe będą przedmiotem analizy dla wszystkich próbek. Trzeci element wykresu to prosta (3) – spadek obciążenia, powrót talerza górnego do położenia wyjściowego (zerowego), czyli zakończenie testu.

Testy relaksacji przeprowadziłem dla dwóch materiałów bazowych Tango Black plus i Vero White oraz materiału DM_9850_Shore50, który jest mieszaniną dwóch materiałów uprzednio wymienionych. Dla każdego materiału wykonałem dziesięć próbek i przeprowadziłem testy relaksacji dla każdej próbki.



Rys. 14. Przykładowy wykres jednego z testów relaksacji, materiał DM_9850. 1 – quasi-jednostkowy skok naprężenia, 2 – krzywa relaksacji, 3 – odciążenie.

Istotnym problemem jest matematyczny opis krzywej relaksacji (2) przy pomocy modelu ciała idealnego tak, aby opis ten miał fizykalne znaczenie. Bardzo często do opisu krzywej relaksacji stosuje się model Maxwella, a nawet modele Maxwella opisywane równaniami różniczkowymi ułamkowego rzędu. Klasyczna krzywa relaksacji opisana jest przez podstawowy model Maxwella będący szeregowym połączeniem modelu Newtona i modelu Hooke'a i wyraża się równaniem:

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{\frac{-t}{t_1}} \tag{2}$$

gdzie: σ_0 – początkowa wartość naprężenia dla czasu t = 0,

 t_1 – czas relaksacji.

Czas relaksacji definiowany jest, jako stosunek cech materiałowych obu składowych ośrodków prostych tj. ciała Newtona i Hooke'a i wynosi:

$$t_1 = \frac{\mu_1}{E_1} \tag{3}$$

gdzie: μ_l – współczynnik lepkości,

 E_1 – moduł sprężystości.

Równanie opisujące podstawowy model Maxwella nie zawsze wystarcza do aproksymacji krzywej relaksacji otrzymanej doświadczalnie, dlatego stosuje się bardziej złożone modele. Ogólny model Maxwella zwany często w literaturze, jako model Wiecherta przedstawiono na rysunku 15. Model ten składa się z n podstawowych modeli Maxwella połączonych równolegle i modelu ciała Hooke'a. E_0 , E_1 , E_2 ... E_n – są to moduły elastyczności, natomiast μ_1 , μ_2 , ... μ_n – są to współczynniki lepkości modeli podstawowych. Równanie opisujące ten model jest następujące:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left(\sum_{i=1}^n E_i e^{\frac{-t}{t_i}} + E_0 \right)$$
(4)

gdzie: ε_0 – zadane przemieszczenie,

n – liczba modeli podstawowych,

i – oznaczenie numeru kolejnego modelu.

Dla n = 1 równanie (4) przybierze postać:

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 e^{\frac{t}{t_1}}$$
⁽⁵⁾

Natomiast dla n = 2, tj. dwa podstawowe modele Maxwella i model Hooke'a połączone równolegle, równanie (4) jest następujące:

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 e^{\frac{-t}{t_1}} + \sigma_2 e^{\frac{-t}{t_2}}$$
(6)

gdzie: t1 i t2 – czasy relaksacji poszczególnych modeli:



Rys. 15. Ogólny model Maxwella (model Wiecherta).

Dopasowania (*ang. fitting*) równania (6) do eksperymentalnych krzywych relaksacji naprężeń przeprowadziłem metodą Levenberga-Marquardta z zastosowaniem programu komputerowego Origin. Przykładowy wynik dopasowania przedstawia rysunek 16 **[A2]**.



Rys. 16. Dopasowanie pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta do eksperymentalnej krzywej relaksacji naprężeń, 1 – krzywa relaksacji naprężeń dla przykładowej próbki z materiału DM_9850_Shore50, 2 - krzywa aproksymacji wg równania (6) dla pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta.

Na rysunku 17 przedstawiono eksperymentalną krzywą relaksacji (2) z rysunku 14 wraz z krzywymi otrzymanymi w wyniku aproksymacji przy pomocy równań (2, 5 i 6).



Rys. 17. Eksperymentalna krzywa relaksacji naprężeń i krzywe aproksymacji. 1 – krzywa relaksacji naprężeń dla próbki nr 1 z materiału DM_9850, 2 – krzywa aproksymacji wg równania (2) dla podstawowego modelu Maxwella, 3 – krzywa aproksymacji wg równania (5) dla modelu Maxwella i Hooke'a połączonych równolegle, 4 – krzywa aproksymacji wg równania (6) dla dwóch modeli Maxwella i modelu Hooke'a połączonych równolegle (pięcioparametrowy model Maxwella-Wiecherta).

Z oceny jakościowej rysunku 16 wynika prosty wniosek: najlepsze dopasowanie krzywej aproksymacji do krzywej rzeczywistej (eksperymentalnej) otrzymano stosując pięcioparametrowy model Maxwella-Wiecherta opisany równaniem (6). Aby ocenić przydatność tego równania i dopasowania pod względem ilościowym wykonano serie testów relaksacji naprężeń i oszacowano niepewność aproksymacji współczynników w równaniu (6) oraz standardowe odchylenie. Zbiorcze wyniki testów relaksacji naprężeń dla badanych materiałów cyfrowych przedstawiono na rysunku 18a, b i c.



b)



Rys. 18. Zbiorcze wykresy testów relaksacji materiałów cyfrowych, a) VeroWhite, b) DM_9850_Shore50, c) Tango Black plus.

Dla każdej eksperymentalnej krzywej relaksacji dokonano aproksymacji przy pomocy równania (6) określając wartości parametrów σ_0 , σ_1 , σ_2 , t_1 , t_2 oraz wartości testów Chi² i R². Dopasowanie równania (6) do poszczególnych wyników uzyskanych z eksperymentu, zostało przeprowadzone z zastosowaniem programu Origin. Wyniki przedstawiono w tablicy 3.

Tablica 3. Średnie wartości parametrów otrzymanych krzywych relaksacji naprężeń.

Rodzaj materiału	σ ₀ [MPa]	σ ₁ [MPa]	σ ₂ [MPa]	t ₁ [s]	t ₂ [s]
VeroWhite	16,580	2,350	6,201	22,1	383,7
DM_9850_Shore50	0,129	0,024	0,009	0,8	26,4
TangoBlack Plus	0,078	0,008	0,002	0,8	25,8

Niepewność standardowa obliczana metodą typu A wyniosła:

$$u_{A} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \bar{x})^{2}}$$
(8)

W związku z tym, że liczność próby była mniejsza od trzydziestu (n = 10) oszacowano niepewność rozszerzoną, stosując rozkład Studenta.

$$u_{CA} = k_p u_A \tag{9}$$

gdzie: k_p – współczynnik rozszerzenia, który przyjmuje wartość 2 dla poziomu ufności p = 0.95

Wyniki obliczeń niepewności pomiarów zestawiono w tablicy 4.

Tablica 4. Wyniki obliczeń standardowego odchylenia i niepewności aproksymacji.

Podzoj motoriolu	Niepewność aproksymacji u _A					
Kodzaj materiatu	u _{σ0} [MPa]	u _{σ1} [MPa]	u _{o2} [MPa]	u _{t1} [s]	u _{t2} [s]	
Vero White	1,094	0,106	0,310	0,6	16,8	
DM_9850	0,0026	0,0008	0,0004	0,02	1,3	
Tango Black Plus	0,0012	0,0002	0,0002	0,1	5,1	

Z zawartych w tablicy 4 wartości niepewności aproksymacji i standardowego odchylenia wynika – a są to małe wartości, że dopasowanie równania (6) do krzywych

eksperymentalnych jest właściwe. Małe wartości niepewności obliczone dla poszczególnych parametrów krzywych relaksacji wynikają z tego, że parametry te, jak pokazują wzory (3) i (4) zależą od właściwości materiałowych takich jak moduły elastyczności i współczynniki lepkości reprezentowane w równaniu (6) przez parametry σ_1 , σ_2 , t_1 , t_2 . Natomiast rozrzut krzywych pokazany na rysunku 17 wynika raczej z trudności technicznej, z realizacją skoku jednostkowego podczas wykonywania testów relaksacji naprężeń. Ma to również wpływ na wyższe wartości niepewności pomiarów parametru σ_0 . Największa niepewność pomiarów parametru σ_0 dotyczy materiału VeroWhite, który posiada większą twardość i wytrzymałość oraz jest mniej plastyczny niż pozostałe dwa materiały. W trakcie prowadzenia eksperymentu pojawia się naprężenie wstępne w momencie styku talerza dociskającego z powierzchnią próbki. Naprężenie to jest inne dla każdej próbki i istotnie przyczynia się do powstania większej niepewności pomiarów parametru σ_0 . Dopiero obliczenie niepewności aproksymacji daje pełny obraz przydatności dopasowania krzywych aproksymacji do krzywych otrzymanych eksperymentalnie.

Problem relaksacji naprężeń w materiałach kształtowanych przyrostowo i wynik dopasowania do krzywej relaksacji modelu pięcioparametrowego, opisanego równaniem (6), dla próbki prostokątnej poddanej naprężeniom rozciągającym zaprezentowałem również w pracy **[A5].** Otrzymałem bardzo dobre dopasowanie uzyskując współczynnik zgodności χ^2 (Chi²) = 0,00002 i współczynnik determinacji R² = 0,99923. Otrzymany wynik zachęcił mnie do prowadzenia dalszych badań w tym obszarze.

Testy relaksacji naprężeń przeprowadzono dla próbek wykonanych z materiałów cyfrowych (żywice fotoutwardzalne) o nazwach handlowych: DM_8515_Grey35 i DM_9895_Shore95, które są mieszanką materiałów bazowych Vero White i Tango Black plus **[A1]**. Zastosowano pionowe i poziome ustawienie próbek na platformie roboczej, które przedstawia rysunek 19.



Rys. 19. Rozmieszczenie próbek na platformie roboczej maszyny drukującej Connex 350.

Do aproksymacji eksperymentalnej krzywej relaksacji naprężeń zastosowano pięcioparametrowy model Maxwella-Wiecherta opisany równaniem (6). Zbiorcze wyniki testów relaksacji badanych materiałów cyfrowych przedstawiono na rysunkach 20 ÷ 23.



Rys. 20. *Eksperymentalne krzywe relaksacji materiału DM_8515_Grey35 dla próbek drukowanych pionowo.*



Rys. 21. *Eksperymentalne krzywe relaksacji materiału DM_8515_Grey35 dla próbek drukowanych poziomo.*



Rys. 22. *Eksperymentalne krzywe relaksacji materiału cyfrowego DM_9895_Shore95 dla próbek drukowanych pionowo.*



Rys. 23. *Eksperymentalne krzywe relaksacji materiału cyfrowego DM_9895_Shore95 dla próbek drukowanych poziomo.*

Wyniki obliczeń niepewności aproksymacji współczynników σ_0 , σ_1 , σ_2 , t_1 , t_2 zestawiono w tablicy 5.

Dedrei meteriale	Niepewność aproksymacji u _A						
Kodzaj materialu	u _{σ0} [MPa]	u _{o1} [MPa]	u _{o2} [MPa]	u _{t1} [s]	u _{t2} [s]		
DM_8515Grey35 pionowe	0,328	0,064	0,201	0,3	4,6		
DM_8515Grey35 poziome	0,397	0,087	0,158	0,3	6,0		
DM_9895Shore95 pionowe	0,013	0,039	0,014	0,0	0,1		
DM_9895Shore95 poziome	0,010	0,052	0,061	0,02	0,5		

Tablica 5. Wyniki obliczeń niepewności aproksymacji.

Z zawartych w tablicy 5 wartości niepewności aproksymacji wynika, że osiągnięto dobre dopasowanie równania (6) do krzywych eksperymentalnych. Małe wartości niepewności obliczone dla poszczególnych współczynników równań krzywych relaksacji wynikają z tego, że współczynniki te, jak pokazują wzory (4) i (7) zależą od właściwości materiałowych takich jak moduły elastyczności i współczynniki lepkości reprezentowane w równaniu (6) przez σ_{I} , σ_{2} , t_{I} , t_{2} .

Obliczenie modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej, daje pełny obraz zastosowanego w dopasowaniu modelu. W tym celu przekształcono równanie (6) do postaci opisującej pięcioparametrowy model Maxwella-Wicherta z uwzględnieniem wszystkich parametrów tego modelu:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E_0 + \varepsilon_0 E_1 e^{\frac{-E_1 t}{\mu_1}} + \varepsilon_0 E_2 e^{\frac{-E_2 t}{\mu_2}}$$
(10)

gdzie:

$$\varepsilon_0 = \frac{H - H_0}{H_0} \tag{11}$$

Przy czym: H_0 – początkowa wysokość próbki, bez obciążenia, H – po zadaniu obciążenia.

Obliczone wartości wszystkich parametrów zastosowanego do aproksymacji modelu Maxwella-Wicherta zestawiono w tablicy 6.

Rodzaj materiału	E ₀ [MPa]	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	µ1 [MPa·s]	µ2 [MPa⋅s]
DM_8515Grey35 pionowe	249,704	36,615	96,57	812,853	36320
DM_8515Grey35 poziome	233,669	30,45	68,055	621,18	23970
DM_9895Shore95 pionowe	9,21	18,15	7,425	18,15	151,47
DM_9895Shore95 poziome	13,335	30,3	8,04	21,21	194,568

Tablica 6. Wartości parametrów zastosowanego do opisu relaksacji modelu Maxwella-Wiecherta dla przebadanych materiałów.

Opis eksperymentalnych krzywych relaksacji przy pomocy przyjętego modelu ma duże znaczenie z uwagi na fizykalny charakter otrzymanych parametrów. Rozszerza to również możliwości modelowania materiałów dla założonych właściwości relaksacyjnych, a ściślej dla założonych parametrów przyjętego modelu reologicznego opisującego dany materiał.

Badania wykazały dodatkowo anizotropię właściwości z uwagi na kierunek wydruku, czyli ustawienie obiektu na platformie roboczej maszyny drukującej. Widać różnicę otrzymanych średnich wartości parametrów modelu dla próbek drukowanych pionowo i drukowanych poziomo.

Model Maxwella-Wiecherta wyrażony równaniem różniczkowym ułamkowego rzędu zastosowano do opisu relaksacji naprężeń w próbkach wykonanych technologią selektywnego spiekania laserowego SLS (Selective Laser Sintering) z proszku poliamidowego PA 2200 **[A3].** Próbki o wymiarach: średnica D = 20 mm i wysokość H = 20 mm wykonano stosując grubość warstwy 0,1 mm i moc lasera 21 W. Dotychczasowe badania wykazały, że aby mieć pełniejszy obraz właściwości mechanicznych materiałów kształtowanych przyrostowo należy stosować kilka ustawień próbek na platformie roboczej maszyny drukującej. W tym przypadku zastosowałem trzy kierunki ustawienia próbek na platformie roboczej.

Równanie ogólne ułamkowego rzędu opisujące pięcioparametrowy model Maxwella-Wiecherta jest następujące **[A3]**:

$$\sigma^{\alpha}(t) + \frac{a_2}{a_1}\sigma^{\beta}(t) + \frac{1}{a_1}\sigma(t) = \frac{1}{a_1}\left(q_2\varepsilon_0\delta(t) + q_1\varepsilon_0\frac{d}{dt}(\delta(t)) + E_0\varepsilon_0H(t)\right)$$
(12)

gdzie: $\alpha i \beta$ – współczynniki określające rząd równania, przy czym $\alpha > \beta$

Rozwiązanie tego równania poszerzyło możliwości opisu eksperymentalnych krzywych relaksacji w stosunku do klasycznego modelu pięcioparametrowego Maxwella-Wiecherta, co przedstawia rysunek 24.

Jak pokazuje rys. 24 zmiana wartości współczynnika α wpływa na promień krzywizny krzywej relaksacji, natomiast zmiana wartości współczynnika β wywołuje translację części krzywej opadającej do przesuniętej asymptoty.



Rys. 24. Teoretyczne krzywe relaksacji dla modelu klasycznego opisanego równaniem (6) oraz krzywe dla modelu ułamkowego rzędu: a) z różnymi współczynnikami α, b) z różnymi współczynnikami β.

W szczególnym przypadku dla współczynników $\alpha = 2$ and $\beta = 1$ mamy rozwiązanie w postaci równania (6). Wpływ wartości współczynników α i β na kształt krzywej relaksacji zastosowano do charakterystyki anizotropii właściwości otrzymanych próbek.

Wprowadzając współczynnik korekcji κ dla kierunku wydruku XZ i YZ oraz zmieniając współczynniki α i β , które zebrano w tablicy 7, przeprowadzono próbę dopasowania wyników do wykresu bazowego. Wynik dopasowania przedstawiono na rysunku 25.

Tablica 7. Zestawienie współczynników ułamkowych α i β oraz współczynnika korekcyjnego dla poszczególnych kierunków wydruku.

	K	α	eta
XY BASE	1	2.000	1.000
XZ	1.155	1.935	0.973
YZ	1.200	1.975	0.984



Rys. 25. Dopasowanie krzywych do wykresu bazowego.

Na podstawie rys. 25 i danych zawartych w tablicy 7 stwierdzić można, że równania ułamkowego rzędu mogą być przydatne do opisu właściwości materiałów wytwarzanych technologiami przyrostowymi, w tym przypadku technologią SLS. Materiały wytwarzane tymi technologiami wykazują anizotropię właściwości w zależności od kierunków wydruku. Współczynniki α i β oraz κ charakteryzują tą anizotropię.

Dla klasycznego równania opisującego pięcioparametrowy model Maxwella-Wiecherta (współczynniki $\alpha = 2$ and $\beta = 1$) otrzymane krzywe relaksacji aproksymowano stosując równanie (10). Przykładowy wynik aproksymacji przedstawia rysunek 25.



Rys. 26. Wynik testu relaksacji wraz z dopasowaną krzywą dla próbki wydrukowanej w kierunku XZ. 1 – eksperymentalna krzywa relaksacji, 2 – krzywa relaksacji aproksymowana równaniem (10).

Dla każdej eksperymentalnej krzywej relaksacji dokonałem aproksymacji przy pomocy równania (10) określając wartości parametrów E_0 , E_1 , E_2 , t_1 , t_2 oraz wartości współczynników Chi^2 i R^2 . Wyniki tych działań przedstawia 8.

Oznaczenie							
testu / kierunku	F. [MDa]	E. [MDa]	t. [c]	E. [MDa]	t. [c]	Chi ²	\mathbf{P}^2
ustawienia	\mathbf{L}_0 [IVII a]		ι _] [8]		t ₂ [8]	Cill	К
na platformie							
XZ	96.168	3.654	371	3.815	6772	0.00003	0.99173
YZ	93.270	3.176	200	2.870	4099	0.00001	0.99245
XY	111.204	2.612	251	3.098	7047	$4.7536 \cdot 10^{-6}$	0.99763

Tablica 8. Parametry otrzymanych krzywych relaksacji dla próbek wykonanych z PA 2200.

Z dyskusji nad wzorem (10) wynika, że dla czasu t = 0 naprężenie wynosi:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left(E_0 + E_1 + E_2 \right) \tag{12}$$

Przyjmując, że:

$$E_{s} = E_{0} + E_{1} + E_{2} \tag{13}$$

naprężenie dla czasu t = 0 wynosi:

$$\sigma(t_0) = \sigma_s = \varepsilon_0 E_s \tag{14}$$

gdzie: E_S – moduł zastępczy sprężystości.

Zaś dla czasu $t \rightarrow \infty$ granicą wyrażenia (10) jest:

$$\sigma(t_{\infty}) = \sigma_0 = \varepsilon_0 E_0 \tag{15}$$

Zestawienie wartości zastępczych modułów sprężystości i naprężeń dla czasów t = 0 i $t \rightarrow \infty$ dla poszczególnych próbek na podstawie przeprowadzonych prób relaksacji przedstawia tablica 9.

Tablica 9. Wartości zastępczych modułów sprężystości i naprężeń dla czasów t = 0 i t $\rightarrow \infty$.Oznaczenie testuE_S [MPa] σ_S [MPa] σ_0 [MPa]

Oznaczenie testu	E _S [MPa]	σ _s [MPa]	σ ₀ [MPa]
XZ	103.637	5.182	4.808
YZ	99.316	4.966	4.663
XY	116.914	5.846	5.560

Mając wartości czasów relaksacji i modułów sprężystości obliczyłem wartości współczynników μ_1 i μ_2 dla poszczególnych próbek. Wyniki po zaokrągleniu do liczb całkowitych zestawiono w tablicy 10.

Tablica 10. Wartości współczynników μ_1 i μ_2 obliczone dla poszczególnych testów.

Oznaczenie testu / kierunku ustawienia na platformie roboczej	μ_l [MPa·s]	μ ₂ [MPa·s]
XZ	1356	25835
YZ	635	11764
XY	656	21831

Dla lepszego zobrazowania otrzymanych wyników charakteryzujących właściwości badanego materiału sporządziłem wykres pokazany na rysunku 27.



Rys. 27. Wartości modułów sprężystości i wartości współczynników lepkości dynamicznej dla poszczególnych testów – kierunków wydruku.

Z przeprowadzonych testów relaksacji naprężeń w próbkach poliamidowych oraz wyników aproksymacji parametrów zastosowanego modelu Maxwella-Wiecherta drugiego rzędu wynika, że materiały kształtowane technologiami przyrostowymi SLS wykazują anizotropię właściwości w zależności od kierunków wydruku.

Porównując wartości modułów sprężystości zapisanych w tablicy 9 oraz przedstawionych na rysunku 27 stwierdzić można, że nie ma istotnych (znaczących) różnic między tymi współczynnikami dla poszczególnych kierunków wydruku. Są istotne różnice, ale w ramach tego samego kierunku wydruku np. moduł E_0 jest wielokrotnie większy niż moduły E_1 i E_2 . Można, zatem stwierdzić, że w zakresie właściwości sprężystych materiał wytworzony technologią SLS jest quasi izotropowy. Na anizotropię właściwości badanego materiału mają wpływ współczynniki lepkości dynamicznej a ściśle, co pokazuje rysunek 27, współczynnik μ_2 .

Zastosowany w powyższym przypadku do opisu relaksacji pięcioparametrowy model Maxwela-Wiecherta, dobrze charakteryzuje właściwości materiału kształtowanego technologią SLS, dla poszczególnych kierunków wydruku i umożliwia oszacowanie modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej

Wyniki badań właściwości mechanicznych materiałów otrzymywanych technologiami przyrostowymi, które dotychczas prowadziłem, postanowiłem zawrzeć w formie syntetycznej w monografii **[A2]**, która zawiera trzy zasadnicze części:

- charakterystykę czterech technologii przyrostowych, które stosowane są w Laboratorium Niekonwencjonalnych Technologii Wytwarzania i Laboratorium Inżynierii Odwrotnej w Katedrze Technologii Mechanicznej i Metrologii Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach,
- opis statycznych prób rozciągania i ściskania próbek wykonanych przyrostowo wraz z prezentacją wszystkich wykresów rozciągania i ściskania oraz oszacowaniem niepewności pomiarów wytrzymałości na rozciąganie, która jest podstawowym parametrem charakteryzującym właściwości mechaniczne materiałów,
- procedurę budowy wieloparametrowych modeli ciał idealnych wraz z równaniami je opisującymi, prezentację wyników badań właściwości reologicznych próbek kształtowanych przyrostowo technologią PolyJet Matrix i SLS, opis otrzymanych eksperymentalnie krzywych relaksacji i pełzania za pomocą modeli ciał idealnych oraz oszacowanie wartości parametrów tych modeli, takich jak moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej, z określoną dokładnością.

W monografii **[A2]**, zawarłem głównie wyniki badań własnych, ale odniosłem się również do kilkudziesięciu różnych aktualnych publikacji innych autorów, co wykazałem w bibliografii.

Wnioski z przeprowadzonych badań opisanych zarówno w czasopismach naukowych jak i w monografii przedstawiam poniżej.

Podsumowanie i wnioski ogólne

W pracy badawczej zajmowałem się głównie badaniem właściwości mechanicznych materiałów, aczkolwiek wiele lat mojego życia zawodowego poświęciłem również pracom związanym z budową aparatury badawczej, zwłaszcza w ramach projektów badawczych wymienionych w p. 5.5.b niniejszego referatu. Powyżej omówiłem tylko te wyniki, które dotyczą niektórych materiałów kształtowanych technologiami przyrostowymi 3D. Główny cel badań to poznanie właściwości tych innowacyjnych materiałów, które jeszcze nie zostały dość dobrze rozpoznane i opisane oraz próba teoretyczo-eksperymentalnego szacowania współczynników równań wieloparametrowych modeli ciał idealnych zastosowanych do opisu ciał rzeczywistych.

Wnioski szczegółowe dotyczące omówionych powyżej zagadnień zostały zaprezentowane w poszczególnych artykułach stanowiących monotematyczny cykl publikacji naukowych, których wykaz przedstawiłem na wstępie referatu. Dlatego poniżej przedstawiam jedynie końcowe ogólne konkluzje.

- 1. Wszystkie materiały kształtowane przyrostowo z zastosowaniem technologii druku 3D wykazują anizotropię właściwości mechanicznych. Wykazałem to zwłaszcza w pracach [A2, A4, A7, A8, A9,]. Ocenę właściwości mechanicznych badanych materiałów dokonałem na podstawie statycznej próby rozciągania zwracając szczególną uwagę na wytrzymałość na rozciąganie R_m, jako parametr mający istotne znaczenie w obliczeniach inżynierskich. Dlatego też zająłem się szacowaniem niepewności pomiarów tego parametru posługując się metodami stosowanymi w badaniach wytrzymałości metali, które jako współautor opisałem w pracy [A11]. Chciałbym podkreślić, że oszacowane wartości niepewności pomiarów wytrzymałości na rozciąganie, jako funkcji kilku zmiennych, zasadniczo nie różnią się od wartości niepewności pomiarów otrzymywanych w badaniach próbek metalowych, które poznałem w swojej kilkuletniej praktyce kierując laboratorium badań materiałowych w Instytucie Technologii Eksploatacji. Zaobserwowałem ponadto, że po przekroczeniu maksymalnej siły rozciągającej próbki pękają przy różnych wartościach odkształcenia plastycznego. Rozrzut jest na tyle duży, że nie zajmowałem się jego analizą ilościową poprzestając na jakościowej ocenie wykresów rozciągania. W jednym przypadku, dla żywicy fotoutwardzalnej Vero White zaobserwowałem umocnienie materiału próbek ustawionych na platformie roboczej płaską stroną w kierunku Y, zgodnie z ruchem wzdłużnym głowicy drukującej [A8].
- 2. Charakteryzując dany materiał wytwarzany technologią przyrostową 3D należy wykonywać badania właściwości, zwłaszcza statyczną próbę rozciągania lub ściskania dla próbek kształtowanych przynajmniej w trzech podstawowych kierunkach wydruku. Słowo "przynajmniej" użyte powyżej nie jest przypadkowe, ponieważ niektórzy autorzy prezentują dodatkowo wyniki badań właściwości mechanicznych dla próbek ustawianych na platformie roboczej pod pewnym kątem do płaszczyzny platformy np. pod katem 45°. Zwykle do badań właściwości mechanicznych materiałów kształtowanych przyrostowo używa się próbek płaskich o przekroju prostokątnym, które można w danym kierunku wydruku umieścić płaską (szerszą powierzchnią) równolegle do platformy roboczej lub bokiem (węższą powierzchnią), co może mieć wpływ na końcowy wynik badania. Dlatego w swoich artykułach zawsze w opisie metody definiuję kierunki wydruku.

- 3. Zasadne wydaje się podawanie w raportach z badań dla materiałów kształtowanych przyrostowo nie tylko wyników w postaci wartości poszczególnych parametrów, ale również pełnych wykresów rozciągania lub ściskania gdyż dopiero wtedy uzyskujemy pełną informację o badanym materiale. Wykresy rozciągania są podstawą oceny jakościowej wyników badań, co wydaje się być zasadne zwłaszcza w przypadku materiałów kształtowanych przyrostowo. Pokazałem to wyraźnie w pracy [A8], gdzie ten sam materiał w zależności od kierunków wydruku wykazuje właściwości materiału kruchego (kierunek Z pionowo ustawione próbki), plastycznego (kierunek X) i plastycznego z umocnieniem (kierunek Y).
- 4. Z dużą dokładnością można oszacować parametry pięcioparametrowego modelu Maxwella Wiecherta opisującego krzywą relaksacji badanych materiałów [A1, A3, A5, A8], co pozwala stosować ten model do celów praktycznych związanych z różnymi obliczeniami inżynierskimi. Dobór modelu reologicznego opisującego relaksację danego materiału i oszacowanie jego parametrów z odpowiednią niepewnością pomiarów, to jeden z trudniejszych problemów, który opisałem w pracach [A2, A5, A6]. Oszacowanie parametrów modelu reologicznego, w odniesieniu do konkretnego materiału, ale i również kierunku wydruku, z odpowiednio małymi wartościami niepewności pomiarów, umożliwia praktyczne zastosowanie takiego modelu na przykład w obliczeniach inżynierskich.

Propozycja dalszych badań

Dalsze badania determinowane są wynikami dotychczas przeprowadzonych badań i bieżącymi potrzebami. Proponuję kontynuację badań właściwości fizycznych innowacyjnych materiałów kształtowanych przyrostowo. Przeprowadziłem już dalsze statyczne próby rozciągania próbek wykonanych z tworzywa ABS otrzymanych technologią FDM oraz próbek poliamidowych kształtowanych technologią SLS. Przeprowadziłem próby relaksacji i pełzania dla tych materiałów. Przeprowadziłem również próby relaksacji i pełzania dla kilku różnych fotoutwardzalnych materiałów cyfrowych. Obecnie opracowuję wyniki tych badań i przygotowuję dalsze publikacje.

Zamierzam również dalej kontynuować prace nad zastosowaniem wieloparametrowych modeli ciał idealnych do opisu relaksacji i pełzania ciał rzeczywistych. Próbki wytwarzane technologiami przyrostowymi SA w tym zakresie "wdzięcznym" materiałem badawczym.

Technologie przyrostowe 3D stają się częścią procesu produkcyjnego i w związku z tym potrzebna jest wiedza o materiałach wytwarzanych tymi technologiami, zwłaszcza w zakresie właściwości fizycznych.

- 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo badawczych.
- 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
 - Blasiak, S., Kundera, C., Bochnia, J.: A Numerical Analysis of the Temperature Distributions in Face Sealing Rings, in: V. Martsynkovskyy, A. Zahorulko (Eds.), XIIITH INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND ENGINEERING CONFERENCE HERMETIC SEALING, VIBRATION RELIABILITY AND ECOLOGICAL SAFETY OF PUMP AND COMPRESSOR MACHINERY-HERVICON-2011, ELSEVIER SCIENCE BV, SARA BURGERHARTSTRAAT 25, PO BOX 211, 1000 AE AMSTERDAM, NETHERLANDS, 2012, pp. 366–378. (materiały konferencyjne indeksowane na WoS), mój udział procentowy szacuję na 30 %.
- 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

- Kaczmarska B., Gierulski W., Bochnia J.: Ocena gotowości technologii jako element procesu komercjalizacji w książce Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji, Tom: 1, (2015), pp: 104-115.
- Błasiak, S., Kundera, C., Bochnia, J.: *Model sterowania uszczelnieniem bezstykowym przy zastosowaniu sztucznej sieci neuronowej*: Postępy Automatyki i Robotyki, KAiR PAN (2012), pp. 261–269.
- 3. Błasiak, S., Bochnia, J.: *Reverse engineering in maintenance and manufacturing processes*: Selected Problems of Mechanical Engineering and Maintenance M29 (2012), pp. 43–51.
- 4. Kundera Cz., Bochnia J.: *Tests of PTFE composites for sealing rings of contacting face seals*, w książce: Scientific Basis of Modern Technologies: Experience and Prospects, (2011), pp: 429-439.

b) Materiały z konferencji międzynarodowych (zarejestrowane w Web of Science)

- 1. Bochnia J.: *Mechanical properties of materials obtained by 3d-printing technology*, 23rd International Conference ENGINEERING MECHANICS 2017, Svratka, Czech Republic, Book Series: Engineering Mechanics 2017, pp. 174-177.
- Bochnia J.: *Relaxation of materials obtained using polyjet technology*, 23rd International Conference ENGINEERING MECHANICS 2017, Svratka, Czech Republic, Book Series: Engineering Mechanics 2017, pp. 178 – 181.
- Bochnia, J., Blasiak, S.: Anisotrophy of mechanical properties of a material which is shaped incrementally using polyjet technology, in: I. Zolotarev, V. Radolf (Eds.), ENGINEERING MECHANICS 2016, ACAD SCI CZECH REPUBLIC, INST THERMOMECHANICS, DOLEJSKOVA 5, PRAGUE 8, 182 00, CZECH REPUBLIC, 2016, pp. 74 – 77.

- 4. Blasiak, S., Kundera, C., Bochnia, J.: A Numerical Analysis of the Temperature Distributions in Face Sealing Rings, in: V. Martsynkovskyy, A. Zahorulko (Eds.), XIIITH INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND ENGINEERING CONFERENCE HERMETIC SEALING, VIBRATION RELIABILITY AND ECOLOGICAL SAFETY OF PUMP AND COMPRESSOR MACHINERY-HERVICON-2011, ELSEVIER SCIENCE BV, SARA BURGERHARTSTRAAT 25, PO BOX 211, 1000 AE AMSTERDAM, NETHERLANDS, 2012, pp. 366–378.
- 5. Bochnia, J.: Ideal Material Models for Engineering Calculations, in: V. Martsynkovskyy, A. Zahorulko (Eds.), XIIITH INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND ENGINEERING CONFERENCE HERMETIC SEALING, VIBRATION RELIABILITY AND ECOLOGICAL SAFETY OF PUMP AND COMPRESSOR MACHINERY-HERVICON-2011, ELSEVIER SCIENCE BV, SARA BURGERHARTSTRAAT 25, PO BOX 211, 1000 AE AMSTERDAM, NETHERLANDS, Vol. 39, 2012, pp. 98 – 110.

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

- Kozior T., Bochnia J.: *Problems of the compensation of centrifugal force in lathe chucks*, Journal of Machine Construction and Maintenance. Problemy Eksploatacji, Tom: 2, pp. 45-51.
- Karaś J., Bochnia J., Stępień A.: *Eksploatacja emulsyjnych cieczy chłodząco-smarujących w obróbce ściernej*, Przegląd Mechaniczny, Zeszyt: 1, (2015), pp. 26-29.
- Adamczak St., Bochnia J., Kaczmarska B.: Badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek kształtowanych przyrostowo z materiału fotoutwardzalnego, Mechanik, Tom: 87, Zeszyt: 8-9, (2014), pp. 26-38.
- 4. Bochnia J., Kozior T.: *Methods of prototyping process using modern additive technologies*, Solid State Phenomena, Tom: 223, (2015), pp. 199-208.
- Adamczak St., Błasiak S., Bochnia J., *Pomiary wielkości geometrycznych modeli kształtowanych przyrostowo z zastosowaniem skanera 3D*, Mechanik, Tom: 87, Zeszyt: 8-9, (2014), pp. 17-25.
- 6. Bochnia J.: *Problemy obliczeń wytrzymałościowych rurociągów gazowych*, Instal Zeszyt: 9, (2011), pp. 52-54.
- Bochnia J., Osiecki J.W.: Model dynamiki uszczelnienia czołowego uwzględniający właściwości reologiczne pierścienia ślizgowego, Problemy Eksploatacji 2, (2004), pp. 63-73.
- 8. Kundera Cz., Bochnia J.: *Modelowanie eksperymentalne aktywnego uszczelnienia czołowego*. Hydraulika i Pneumatyka 6, (2004) pp. 29-30.
- 9. Bochnia J., Matecki K.: *Szacowanie niepewności pomiarów w statycznej próbie rozciągania*. Problemy Eksploatacji 1, (2003), 65-76.
- Bochnia J.: Wyznaczanie modułu Younga na podstawie statycznych prób wciskania stożka, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Vol.22 nr 2, Poznań (2002), pp. 41-48.

- 11. Bochnia J., Matecki K.: *Statyczna próba rozciągania w świetle normy PN-EN* 10002-1+AC1. Problemy Eksploatacji 3, (2002), pp. 127-136.
- Bochnia J.: Model dynamiczny uszczelnienia czołowego z pierścieniem ślizgowym o nieliniowej sprężystości, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Nr 197, z. 60, Rzeszów (2002), pp. 27-33.
- 13. Bochnia J., Matecki K.: *Wyznaczanie parametrów pracy pierścieni ślizgowych modeli uszczelnień czołowych w warunkach dolnego stanu granicznego*, Tribologia, 5, (2002), pp. 1341-1351.
- 14. Bochnia J., Kundera Cz., Matecki K., *Moduł uszczelnienia czołowego z zamiennymi pierścieniami ślizgowymi*, Tribologia, nr 3, (2001), pp. 247-257.
- 15. Bochnia J., Osuch-Słomka E., Matecki K.: *Możliwość zastosowania nylonów konstrukcyjnych na pierścienie ślizgowe uszczelnień czołowych*, Problemy Eksploatacji 2, (2001), pp. 39-49.
- 16. Bochnia J., Kundera Cz.: *Model konstrukcyjny uszczelnienia modułowego i jego weryfikacja eksperymentalna*, Problemy Eksploatacji 2, (2001), pp. 27-39.
- Bochnia J., Giesko T., Majcher A., Matecki K., Rogowska R., Samborski T., Wójcicki T.,: *Metoda i Urządzenie do pomiaru kąta zwilżania i napięć międzyfazowych*, Problemy Eksploatacji 2, (2001), pp.15-27.
- Osuch-Słomka E., Rogowska R., Bochnia J., Matecki K.: Badania wybranych fizykochemicznych, tribologicznych i mechanicznych właściwości materiałów stosowanych na elementy uszczelnień mechanicznych, Problemy Eksploatacji 1, (2001), pp. 71-81.
- 19. Bochnia J., Matecki K.: *Stanowisko SUM-01 do badania mechanicznych uszczelnień czołowych*, Problemy Eksploatacji 4, (1999), pp. 275-283.
- 20. Bochnia J.: Wyznaczanie i analiza charakterystyk wciskania wgłębników w materiał. Problemy Eksploatacji 1, (1999), pp.19-29.
- 21. Bochnia J., Kundera Cz.: *Materiały kompozytowe PTFE optymalizacja składu i właściwości mechaniczne,* Maszyny Górnicze nr 5/76, (1998), pp. 17-23.
- 22. Bochnia J., Kundera Cz.: *Materiały kompozytowe na pierścienie uszczelniające*, Sterowanie i Napęd Hydrauliczny, nr 2, (1995).

d) publikacje w materiałach konferencyjnych

- 1. Bochnia J.: *Modelowanie właściwości mechanicznych materiałów w obliczeniach inżynierskich*, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Zeszyt: 13, (2009), pp. 50-55.
- 2. Bochnia J.: *Wpływ właściwości mechanicznych materiału uszczelnienia na parametry jego pracy*, XII międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna HERVICON 2008, Zeszyty Naukowe PŚk, Tom 1, z. 10, Kielce (2008), pp. 219-229.
- Kundera Cz., Bochnia J.: Research on composite materials applied for sliding constructional elements, 9th International Scientific Conference -NEW WAYS IN MANUFACTURING ENGINEERING, Prešov, Slovak Republic (2008), pp. 19 – 21.
- 4. Bochnia J.: Uszczelnienie czołowe jako obiekt badań interdyscyplinarnych, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Zeszyt: 83, (2005), pp. 81-88.

- 5. Kundera Cz., Bochnia J.: *Tests of materials for sealing rings of mechanical seals*, NEW WAYS IN MANUFACTURING ENGINEERING, Prešov, Slovak Republic (2004), pp. 239-242.
- Bochnia J., Matecki K., Kundera Cz.: Głowica do pomiaru sił dociskających oraz momentu tarcia w badaniach modeli uszczelnień czołowych. X Międzynarodowa Konferencja "Uszczelnienia i Technika Uszczelniania Maszyn i Urządzeń", Wrocław (2004), pp. 338-344.
- Bochnia J., Osiecki J.: Model of dynamics of a face seals with consideration of the visco-elastic properties of the sliding ring, 7th Conference on Dynamical Systems Theory and Applications. Łódź (2003), pp. 525-534.
- 8. Bochnia J.: *Wpływ właściwości mechanicznych pierścienia ślizgowego na dynamikę uszczelnieia czołowego*, I Polsko-Ukraińska Konferencja Naukowo-Techniczna "Współczesne technologie wytwarzania oraz modelowania", Chmielnickij-Satanów, Ukraina, (2003).
- Kundera Cz., Bochnia J., Matecki K.: Dynamic behavior of noncontacting face seals – comparison of design configurations, 10-th International Conference HERVICON-2002, tom 1, Sumy State (2002), pp 173-186.
- 10. Matecki K., Kundera Cz., Bochnia J.: *Method of testing work parameters of sealing rings*, 10-th International Conference HERVICON-2002, ISBN 966-7668-84-3, tom 1, Sumy State (2002), pp. 216-233.
- 11. Bochnia J.: *Dynamic model of head sealing with consideration of different material properties of a flexible ring*, 10-th International Conference HERVICON-2002, ISBN 966-7668-84-3, tom 1, Sumy State (2002), pp. 131-140.
- 12. Bochnia J., Matecki K.: *Badania parametrów pracy pierścieni ślizgowych uszczelnień czołowych na stanowisku SUM-1*, IX Międzynarodowa Konferencja Uszczelnienia i Technika Uszczelniania Maszyn i Urządzeń, Wrocław Polanica ISBN 83-87982-70-9, (2001), pp. 201-208.
- 13. Bochnia J, Matecki K.: Zagadnienie stanu granicznego w badaniach modeli uszczelnień czołowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej nr 74, Kielce (2001), pp. 25-34.
- Bochnia J.: Model dynamiczny uszczelnienia czołowego stykowego z uwzględnieniem różnych właściwości materiałowych pierścienia podatnego, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej - Mechanika 74, PL ISSN 0239-4979, Kielce (2001), pp. 17-24.
- Bochnia J., Kundera Cz.: Model dynamiczny uszczelnienia czołowego z uwzględnieniem właściwości sprężysto tłumiących pierścienia podatnego, X Konferencja Cylinder 2000 Badanie, Konstrukcja, Wytwarzanie i Eksploatacja Układów Hydraulicznych. Szczyrk (2000),
- Bochnia J., Kundera Cz.: *Model dynamiczny uszczelnienia czołowego z regulowanymi parametrami*, Materiały XVII Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Dydaktycznej Teorii Maszyn i Mechanizmów, Warszawa – Jachranka, (2000), pp. 331 – 337.
- 17. Bochnia J., Matecki K.: *Stanowisko do badania uszczelnień mechanicznych czołowych*, IX Konferencja Cylinder 99 "Badanie, konstrukcja, wytwarzanie, eksploatacja układów hydraulicznych", Zakopane, (1999), pp. 17-23.
- Bochnia J.: Method of estimate mechanical materials property on the basis the local strain, 4-th International Symposium of Ukrainian Mechanical Engineers in Lviv. 19-21 May, (1999),
- 19. Bochnia J.: *PTFE composite materials for sliding rings of seals*, Hervicon-99, Tom 1, Sumy Ukraina (1999), pp. 280-286,
- 20. Kundera Cz., Bochnia J.: *Wpływ podatnej obudowy pierścienia na dynamikę stykowego uszczelnienia czołowego*, VIII Międzynarodowa Konferencja -

Uszczelnienia i technika uszczelniania w maszynach i urządzeniach, Wrocław - Polanica, (1998),

- 21. Bochnia J., Kundera Cz.: *Badania materiałów kompozytowych na bazie PTFE*. Mechanika nr 55, Politechnika Świętokrzyska, Kielce (1995),
- 22. Bochnia J.: *Metoda oceny właściwości mechanicznych materiałów na podstawie ich lokalnego odkształcenia*. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej nr 55, Kielce (1995).

e) Udzielone patenty międzynarodowe i krajowe:

- 1. Bochnia J., Kozior T.: Uchwyt tokarski z kompensacją skutków siły odśrodkowej, (2018), PL 230620 B1
- 2. Bochnia J., Kozior T.: Uchwyt, zwłaszcza do mocowania magnesów stałych podczas badania sił oddziaływania pomiędzy magnesami, (2017), P.415790.
- 3. Bochnia J., Kozior T.: *Trzpień tokarski*, (2016), PL 224846 B1.
- 4. Bochnia J., Kozior T.: Trzpień tokarski, (2015), PL 221661 B1.
- 5. Bochnia J., Kozior T.: Trzpień tokarski nastawny, (2015), PL 222445 B1.
- 6. Błasiak Sł., Bochnia J., Łaski P., Takosoglu J.: *Mechaniczne uszczelnienie obrotowe*, 2014, PL 220034 B1.
- 7. Kundera Cz., Bochnia J., Matecki K.: *Głowica pomiarowa do badania parametrów pracy uszczelnienia czołowego*, (2013), PL 214216 B1.
- 8. Bochnia J., Matecki K.: *Głowica do pomiaru sił dociskających oraz momentu tarcia, zwłaszcza w skojarzeniu ciernym pierścieni ślizgowych uszczelnień czołowych,* (2010), PL 206039 B1.
- 9. Kundera Cz., Bochnia J., Matecki K.: *Głowica pomiarowa do badania parametrów pracy bezstykowego uszczelnienia czołowego*, (2009), PL 205295 B1.
- 10. Kundera Cz., Bochnia J.: Podwójne uszczelnienie czołowe, (2009), PL 205433 B1.
- 11. Bochnia J., Kundera Cz., Matecki K.: *Modułowe uszczelnienie mechaniczne stykowe do maszyn wirnikowych*, (2008). PL 199534.

Rodzaj artykułu/autorstwo	Indywidualny	Współautorstwo
Artykuły z listy A	1	6
Artykuły z listy B	3	19
Materiały z konferencji międzynarodowej (zarejestrowane w Web of Science)	3	2
Artykuły w czasopismach spoza listy A i B	10	14
Rozdziały w monografiach	-	4
Razem	17	45

f) tabela zbiorcza publikacji po uzyskaniu stopnia doktora

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

Sumaryczny *impact factor* publikacji zgodnie z rokiem wydania wynosi 10,357.

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

- a) liczba cytowań prac w bazie Web of Science, całkowita liczba cytowań: 79, liczba cytowań bez autocytowań: 68.
- b) Indeks Hirscha, Indeks Hirscha publikacji: h-index=7.
- c) raport cytowań na podstawie danych ze strony internetowej <u>http://apps.webofknowledge.com/</u> na dzień 06.11.2018.

Results found:	10
Sum of the Times Cited:	79
Sum of Times Cited without selfcitations:	68
Citing Articles:	57
Citing Articles without selfcitations:	51
Average Citations per Item:	7,9
h-index:	7



Rys. 18. Statystyki w portalu Web of Science (06 listopada 2018).

5.5. Kierowanie międzynarodowymi lub krajowymi projektami badawczymi lub udział w takich projektach

a) kierowanie lub udział w międzynarodowych projektach badawczych

N/D

b) kierowanie lub udział w krajowych projektach badawczych

Kierowanie projektami badawczymi

- Projekt: Badania właściwości mechanicznych wybranych materiałów i pomiary wielkości geometrycznych modeli otrzymywanych innowacyjnymi technologiami przyrostowymi, grant w ramach projektu "Perspektywy RSI Świętokrzyskie – IV etap" nr: WND – POKL.08.02.02 – 26 – 001/12 - Program Operacyjny Kapitał Ludzki, Priorytet VIII, Działanie 8.2 Transfer wiedzy, Poddziałanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji, Politechnika Świętokrzyska, (2014), (Kierownik projektu).
- Projekt: 8T07C 055 21, Opracowanie i badania modelu uszczelnienia czołowego ze sterowanymi parametrami pracy, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom. (2003), (Kierownik projektu).
- 3. Projekt: 7T08C 039 99C/4322: *Opracowanie metody i prototypu aparatury do badania energii powierzchniowej materiałów konstrukcyjnych*, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom, (2001), (Kierownik projektu).
- Projekt: nr 7 T07B 033 14: Opracowanie i badania uniwersalnego modułu uszczelniającego do maszyn wirnikowych, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom, (2000), (Kierownik projektu).
- 5. Kierowanie projektami badawczymi w ramach prac statutowych finansowanych przez MNiSW:
 - a) Inspekcja geometrii wybranych modeli 3D z zastosowaniem inżynierii odwrotnej i badania właściwości mechanicznych materiałów otrzymywanych technologiami przyrostowymi, Politechnika Świętokrzyska, (2017).
 - b) Projekt 01.0.09.00/2.01.01.01.0012 MNSP.MKTM.15.003, Badania właściwości mechanicznych wybranych materiałów i pomiary wielkości geometrycznych modeli otrzymywanych technologiami przyrostowym, Politechnika Świętokrzyska, (2015 2016).
 - c) Projekt 1.41/7.07, Badania właściwości modeli i materiałów otrzymywanych w technologii 3D-Printing i PolyJet, Politechnika Świętokrzyska, (2013).
 - d) Projekt 1.41/7.05, Badania właściwości mechanicznych materiałów otrzymywanych w technologiach przyrostowych, Politechnika Świętokrzyska, (2012).
 - e) Projekt 1.41 / 8.52, Modelowanie właściwości mechanicznych materiałów w obliczeniach inżynierskich, Politechnika Świętokrzyska, (2011-2010).
 - f) Wpływ właściwości mechanicznych materiałów na bezpieczeństwo techniczne elementów maszyn i urządzeń, Instytut Technologii Eksploatacji PIB, Radom, (2006).

- g) Opracowanie metody sterowania parametrami pracy mechanicznego uszczelnienia czołowego z uwzględnieniem standardowych modeli regulacji, Instytut Technologii Eksploatacji PiB, Radom, (2005).
- h) Badania wybranych fizykochemicznych, tribologicznych i mechanicznych właściwości materiałów stosowanych na elementy uszczelnień czołowych, Instytut Technologii Eksploatacji - PiB, Radom, (2000).

Współudział w realizacji projektów badawczych

- 1. *Samocentrujący uchwyt szczękowy z kompensacją negatywnych skutków siły odśrodkowej*, Projekt w ramach Programu Inkubator Innowacyjności +, POIR.P.17.001.01/1.02.02.02.0001, zadanie 1.1.4.2: Prowadzenie prac przedwdrożeniowych, w tym dodatkowych testów laboratoryjnych lub dostosowania wynalazku do potrzeb zainteresowanego nabywcy (Grant nr 4/2017), (2017), (Wykonawca).
- N N502 4498 33: Teoretyczno-eksperymentalne metody modyfikacji powierzchni roboczych uszczelnień hydro- i gazodynamicznych, Politechnika Świętokrzyska, (2010), (Wykonawca).
- 3. 8T07B 017 20: *Opracowanie modelu i przeprowadzenie eksperymentalnych badań aktywnego uszczelnienia czołowego bezstykowego*, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, (2004), (Wykonawca).
- ROW-II-137/200: Wdrożenie do produkcji technologii nanoszenia ekologicznych powłok bezchromowych na elementy aluminiowe, ITGiS-BEFA, Radom, (2007), (Wykonawca – kierowanie fazą b+r).
- ROW-313-2003: Uruchomienie produkcji szlifierko-polerki do mechanicznego przygotowania powierzchni ciał stałych, OBR Prebot-PRONAR, Radom, (2005), (Wykonawca – kierowanie fazą b+r).
- 6. ROW-235-2003: *Opracowanie technologii przygotowania powierzchni elementów stalowych i żeliwnych do nanoszenia ochronnych powłok proszkowych metodą elektrostatyczną*, OBR Prebot-BEFA, Radom, (2004), (Wykonawca kierowanie fazą b+r).

5.6. Międzynarodowe lub krajowe nagrody za działalność naukową:

a. Nagrody międzynarodowe

1. Światowe Targi Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS Eureka'2001 – srebrny medal za urządzenie do pomiaru kąta zwilżania i napięć międzyfazowych (praca zespołowa), (2001).

b. Nagrody krajowe

- 1. Złota Odznaka Honorowa SIMP, (2013).
- 2. Srebrna Odznaka Honorowa SIMP, (2010).

a. Inne nagrody

- 1. Wyróżnienie nagrodą specjalną w Ogólnopolskim Konkursie Student-Wynalazca za współautorstwo cyklu rozwiązań pt. "Trzpień tokarski" i "Uchwyt tokarski z kompensacją skutków siły odśrodkowej" P.408388, P.418088, (2018).
- 2. Nagroda za wynalazek "Trzpień tokarski" w konkursie NOWATOR organizowanym przez Staropolską Izbę Przemysłowo-Handlową w Kielcach, (2015).
- 3. Zespołowa nagroda II stopnia Rektora Politechniki Świętokrzyskiej za publikacje w znaczących czasopismach i patenty, (2012)

5.7. Wygłaszanie referatów na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych

a) wygłaszanie referatów na konferencjach międzynarodowych:

Po uzyskaniu stopnia doktora wygłosiłem 7 referatów na międzynarodowych konferencjach naukowych i przedstawiłem jeden artykuł podczas sesji plakatowych.

b) wygłaszanie referatów na konferencjach krajowych:

Po uzyskaniu stopnia doktora wygłosiłem 9 referatów na krajowych konferencjach naukowych oraz jeden referat na posiedzeniu Komitetu Budowy Maszyn PAN.

5.8. Udział w komitetach organizacyjnych i naukowych krajowych międzynarodowych konferencji naukowych N/D

- 5.9. Udział w konsorcjach i sieciach badawczych N/D
- 5.10. Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism $\rm N/\rm D$
- 5.11. Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych

Członek Zarządu Oddziału Radomskiego Stowarzyszenia Inżynierów Mechaników Polskich.

5.12. Charakterystyka dorobku dydaktycznego

Realizowane ćwiczenia, zajęcia laboratoryjne i projektowe

- 1. Procesy Produkcyjne wykłady dla kierunków Zarządzanie i Inżynieria Produkcji oraz Logistyka, studia stacjonarne i niestacjonarne.
- 2. Przyrządy i Uchwyty Obróbkowe wykłady i projektowanie dla kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, studia stacjonarne i niestacjonarne.
- 3. Maszyny Technologiczne laboratorium dla kierunku Inżynieria Bezpieczeństwa, studia stacjonarne.
- 4. Technologia Budowy Maszyn projekt dla kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, studia stacjonarne i niestacjonarne.
- 5. Podstawy Inżynierii Odwrotnej wykłady, projektowanie i laboratorium dla kierunku Wzornictwo Przemysłowe studia stacjonarne.

- 6. Przyrządy i Uchwyty Obróbkowe 15 godz. wykładu (II stopień) dla kierunku Mechanika i Budowa Maszyn studia stacjonarne
- 7. Obrabiarki Specjalizowane II projekt dla kierunku Mechanika i Budowa Maszyn studia niestacjonarne.
- 8. Techniki wytwarzania II laboratorium, dla kierunków Mechanika i Budowa Maszyn i Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, studia stacjonarne i niestacjonarne.
- 9. Komputerowe wspomaganie procesów technologicznych laboratorium, dla kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, studia stacjonarne i niestacjonarne.
- 10. Szybkie prototypowanie w budowie maszyn laboratorium i projektowanie, dla kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, studia stacjonarne i niestacjonarne.
- 11. CAD/CAM laboratorium i projektowanie dla kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, studia stacjonarne i niestacjonarne.
- 12. Prace dyplomowe magisterskie promotorstwo na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, studia stacjonarne i niestacjonarne.
- 13. Prace dyplomowe inżynierskie promotorstwo Mechanika i Budowa Maszyn, studia stacjonarne i niestacjonarne.

5.13. Osiągnięcia dydaktyczne w zakresie popularyzacji nauki

Osiągnięcia dydaktyczne:

- 1. Opracowanie wykładów z przedmiotu: Procesy Produkcyjne.
- 2. Opracowania wykładów z przedmiotu Przyrządy i Uchwyty Obróbkowe.
- 3. Opracowanie wykładów z przedmiotu Inżynieria Odwrotna.
- 4. Opracowanie wybranych instrukcji laboratoryjnych z przedmiotów: Techniki Wytwarzania II, Technologia Budowy Maszyn, Szybkie Prototypowanie w Budowie Maszyn.

Opracowania programów nauczania (sylabusy) następujących modułów:

- 1. Procesy Produkcyjne
- 2. Przyrządy i Uchwyty Obróbkowe

5.14. Opieka naukowa nad studentami

Promotorstwo prac dyplomowych:

W latach 2009-2018 byłem promotorem 51 prac magisterskich i inżynierskich na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn.

5.15. Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego

Współpraca z mgr inż. Tomaszem Koziorem – doktorantem, która zaowocowała wspólnymi publikacjami i uzyskanymi patentami.

5.16. Staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich

W pracy dydaktycznej i naukowej wykorzystuję swoje ponad 20-letnie doświadczenie pracy w przemyśle i w państwowym instytucie badawczym, w tym 5 lat kierowania akredytowanym przez PCA laboratorium badań materiałowych. Ta forma pracy w pewnym zakresie rekompensuje brak formalnych staży.

5.17. Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie

Ekspertyza w zakresie bezpieczeństwa przemysłowego. Analiza merytoryczna aktualności aktów wykonawczych obligatoryjnie przypisanych Ministerstwu Gospodarki, (2008), współautorstwo ekspertyzy wykonanej dla ówczesnego Ministerstwa Gospodarki.

5.18. Udział w zespołach eksperckich i konkursowych

Uczestnictwo w zespołach eksperckich przy pracach związanych z realizacją programu LABIN - Wsparcie aparaturowe innowacyjnych laboratoriów naukowobadawczych Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Program Operacyjny Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013, Oś priorytetowa I Nowoczesna Gospodarka, Działanie I.3.

5.19. Recenzowanie publikacji krajowych i zagranicznych

Recenzja artykułów dla następujących czasopism:

- 1. Trzy artykuły dla Rapid Prototyping Journal.
- 2. Jeden artykuł dla Metrology and Measurements Systems.
- 3. Cztery artykuły dla czasopisma Tribologia.
- 4. Pięć artykułów dla czasopisma Mechanik.

Kielce dn. 06.11.2018

podpis