

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Wiktora Szota
pt. "Ocena właściwości reologicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D
z zastosowaniem wieloparametrowych modeli ciał idealnych"**

Opracowano na podstawie pisma z dnia 31.01.2025r.
Dyrektora Naukowego Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach
dr hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk

1. Uwagi dotyczące tematu rozprawy, sformułowanego celu i hipotezy rozprawy

Aktualnie w świecie, a szczególnie w Polsce obserwuje się dynamiczny rozwój technologii przyrostowych z ukierunkowaniem do zastosowań przemysłowych. Pozwalają one na wytwarzanie elementów o skomplikowanej geometrii, która dotąd była trudna bądź niemożliwa do uzyskania konwencjonalnymi metodami. Zastosowanie technologii przyrostowych wynika też z możliwości skrócenia czasu prototypowania i wytwarzania. Wytwarzanie elementów maszyn tymi technologiami może dokonywać się przy użyciu tworzyw polimerowych jak również proszków metali. Podjęty przez Doktoranta temat badawczy dotyczy zachowania się elementów wytworzonych przyrostowo pod wpływem naprężeń działających w określonym czasie w tym zjawisk relaksacji naprężeń i pełzania. W literaturze brakuje syntetycznej oceny popartej badaniami eksperymentalnymi dotyczącej tych zjawisk stąd uzyskane informacje mogą być cenne i przydatne w projektowaniu konstrukcji. W technologiach przyrostowych na te zjawiska ma wpływ materiał modelowy i parametry technologiczne wydruku. Przeprowadzone przez Doktoranta badania pozwoliły poznać w jaki sposób zachowują się elementy tak wytworzone pod wpływem działania naprężeń w określonym czasie i które parametry technologiczne druku wpływają na właściwości reologiczne, a także ocenić przydatność zastosowanych modeli ciał idealnych do opisu krzywych relaksacji naprężeń i pełzania materiału.

Cel główny rozprawy został jasno sprecyzowany i dotyczył określenia właściwości reologicznych elementów wytworzonych technologią przyrostową SLS (selektywne spiekania proszków) i FDM (wyłaczanie warstwowe materiałów określane też jako technologia MEX) z zastosowaniem modeli ciał idealnych. Celami pomocniczymi było opracowanie modelu wieloparametrowego i ocena zastosowania modeli ciał idealnych do opisanie właściwości reologicznych, określenie parametrów technologicznych i niepewności aproksymacji w doborze modelu reologicznego do krzywej relaksacji naprężeń i pełzania materiału. Dodatkowo Doktorant poszerzył swoje badania o technologię druku PJM fotoutwardzania akrylowych żywic polimerowych. Natomiast celem użytkowym pracy było poszerzenie wiedzy z zakresu prowadzonych badań nad technologiami przyrostowymi FDM (MEX), SLS, PJM. Doktorant sformułował również hipotezę badawczą w której stwierdza, że zjawiska relaksacji naprężeń i pełzania występujące w materiałach wytworzonych technologiami przyrostowymi można opisać przy pomocy wieloparametrowych modeli reologicznych, których moduły

sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej wyznaczyć można z dokładnością umożliwiającą stosowanie w obliczeniach inżynierskich.

2. Struktura i ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska podzielona została na 8 podstawowych rozdziałów, literaturę, spis rysunków i tabel, streszczenie rozprawy w języku polskim i angielskim i napisana na 307 stronach, zawiera 122 rysunki w postaci wykresów, schematów i zdjęć oraz 51 tabel. Na początku rozprawy przedstawiono po spisie treści wykaz ważniejszych oznaczeń na sześciu stronach (prawie wszystkie stosowane w rozprawie), a w końcowej części wykaz wykorzystanej literatury obejmujący 25 pozycji książkowych, 119 artykułów głównie zagranicznych wyszczególnionych w rozprawie według cytowania również z udziałem Doktoranta w czterech publikacjach (116-119), 8 norm krajowych, 5 patentów amerykańskich i 16 źródeł internetowych.

Pierwszy rozdział o łącznej liczbie stron 25 to wprowadzenie do tematyki rozprawy ze wskazaniem rodzajów technologii przyrostowych i ich historycznego rozwój z kamieniami milowymi w tym rozwoju od roku 1971 do chwili obecnej. W rozdziale tym Doktorant podkreślił znaczenie badań właściwości mechanicznych modeli wytworzonych przyrostowo wskazując, że wiedza praktyczna w zakresie materiałów, parametrów wydruku i zastosowania w różnych gałęziach przemysłu jest bardzo istotna i powinna być rozwijana.

Rozdział drugi opracowany na 9 stronach o nazwie „Studium literaturowe” dotyczy przeglądu literatury dokonany na podstawie 29 artykułów i 6 źródeł internetowych wyszczególnionych w spisie literatury. Studium literaturowe Doktorant uzupełnia dodatkowo w kolejnych rozdziałach rozprawy. W ramach prognoz rozwojowych technologii przyrostowych wskazuje opierając się na danych literaturowych na wzrost produkcji elementów wytwarzanych tą technologią w najbliższej pięcioletniej w tempie 20-23% rocznie w ogólnej gospodarce światowej. Firmy zajmujące się technologiami przyrostowymi w ramach rozwoju poprawiają wydajność drukarek 3D i wprowadzają nowe materiały wsadowe. Zrozumiałym staje się prowadzenie badań nad technologiami druku 3D, parametrami technologicznymi druku, materiałami wsadowymi, modelami reologicznymi do opisu zachowania się materiałów na relaksację naprężeń i pełzanie czy też możliwy do wykorzystania stan obciążenia. Przegląd literaturowy Doktorant zakończył wnioskami stanowiącymi podstawę do sformułowania tematu rozprawy i określenia celu realizowanych badań.

Rozdział trzeci rozprawy opracowany na 20 stronach, nazwany „Technologie przyrostowe zastosowane w badaniach” stanowi opis technologii przyrostowych zastosowanych przez Doktoranta i dotyczą one osadzania topionego materiału MEX, selektywnego spiekania proszków SLS i fotoutwardzania akrylowych żywic polimerowych PJM. Ich wybór uzasadniony został specyfiką druku 3D uzależnioną od sposobu budowania elementu drukującego, zastosowania materiału wsadowego, jego ceną i parametrami druku. Wybrane technologie są zróżnicowane, ale jednocześnie pokrywają w dużym stopniu całość problematyki dotyczącej technologii przyrostowych z materiałami polimerowymi. Ich wybór uważam za uzasadniony. Doktorant przedstawia również zagadnienia BHP związane z technologiami przyrostowymi zwracając uwagę na zagrożenia elektryczne, termiczne, mechaniczne, promieniowanie oraz zagrożenia pożarem i eksplozją.

Rozdział czwarty to „Reologia ciała stałego” przedstawiony na 36 stronach. Reologia jako nauka zajmuje się zjawiskami zachodzącymi w materiałach podczas oddziaływania skokowego odkształcenia i skokowego naprężenia. Zarejestrowane zmiany pozwalają ocenić właściwości reologiczne badanych materiałów. Ma zastosowanie do wszystkich materiałów posiadających właściwości lepko-sprężyste i opisuje zależność pomiędzy siłami, deformacją w funkcji czasu.

Typowe zjawiska reologiczne jak relaksacja naprężeń czy pełzanie występują również w materiałach wytwarzanych przyrostowo ze względu na to, że są to ciała lepko-sprężyste. W tej części rozprawy Doktorant analizuje zjawisko relaksacji naprężeń przedstawiając odpowiedzi układu w postaci graficznej interpretacji na zadane skokowe odkształcenie dla ciała sprężystego, lepkiego i lepko-sprężystego. Odpowiedzi ciała na zadane naprężenie przedstawiono również w graficznej interpretacji dla pełzania. W dalszej części rozdziału Doktorant przedstawia modele reologiczne jedno i wieloparametrowe ciał idealnych służące do opisu właściwości reologicznych materiałów. Opisano jednoparametrowy model Hooke'a dla ciał idealnie sprężystych, model Newtona dla ciał idealnie lepkich i wieloparametrowe jak model standardowy Zenera w wariancie A znany jako trójpametrowy model Kelvina-Voighta, model Zenera w wariancie B znany jako trójpametrowy Maxwella. Są to najprostsze modele mechaniczne zdolne do opisu relaksacji naprężeń i pełzania. Mogą być wykorzystane jak podano w rozprawie do analizy polimerów, naczyń krwionośnych, chrząstek, hydrożeli czy biomateriałów. Bardziej złożone modele pozwalają na uzyskanie większej ilości informacji o zachowaniu się materiału. Do tych modeli Doktorant zalicza model Maxwella-Wiecherta i model Kelwina-Voighta zastosowane w rozprawie doktorskiej. Model Maxwella-Wiecherta rozpatrzony został jako pięcioparametrowy (1) i siedmioparametrowy przedstawiając ogólne równanie opisujące relaksacje naprężeń umożliwiające wyznaczenie modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej.

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 e^{\frac{-t}{\tau_1}} + \sigma_2 e^{\frac{-t}{\tau_2}} \quad (1)$$

Model Kelvina-Voighta rozpatrzony został również jako pięcioparametrowy (2) i siedmioparametrowy przedstawiając ogólne równanie opisujące zjawisko reologiczne pełzania materiałów umożliwiające wyznaczenie modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_1}}\right) + \varepsilon_2 \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_2}}\right) \quad (2)$$

W konkluzji tego rozdziału Doktorant wskazuje, że do opisu relaksacji naprężeń i pełzania materiałów wytwarzanych przyrostowo wystarczający jest opisany model pięcioparametrowy.

Rozdział piąty opracowany na 5 stronach to „Cel i sposób realizacji pracy” scharakteryzowany w części wstępnej recenzji.

Rozdział szósty opisany na 19 stronach to „Program badań”. Doktorant program badawczy w rozprawie przedstawił graficznie, ujmując on wszystkie zagadnienia które były realizowane takie jak analiza literatury, określenie celu i hipotezy badawczej, wytworzenie próbek, przeprowadzenie eksperymentów relaksacji naprężeń i pełzania, opracowanie wyników badań, a w tym ocena wpływu parametrów technologicznych na właściwości reologiczne, ocena przydatności modeli reologicznych, wyznaczenie modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej, ocena niepewności aproksymacji modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych. Wybór technologii druku 3D z uzasadnieniem został już przedstawiony, natomiast wybór materiałów podyktowany został dostępnością na rynku, ceną i zastosowaniem do wytwarzania modeli użytkowych (MED610, RGD720 do technologii PJM, ABS-P430, PLA MarkerBot, ROSA-Flex96A do technologii FDM czyli MEX, PA2200 do technologii SLS). Do badań przygotowano ukształtowanie próbek zgodnie z normą ISO527 typ1BA jako próbki płaskie oraz próbki cylindryczne zgodnie z normą ISO3384. Próbkę wykonano na nowoczesnych drukarkach 3D w Laboratorium Niekonwencjonalnych Technik Wytwarzania

Politechniki Świętokrzyskiej z zadanymi parametrami wydruku jak wysokość warstwy L_t , orientacja wydruku P_d , liczba konturów N_s , gęstość energii wiązki laserowej stosownie do rodzaju technologii druku. Badania reologiczne Doktorant wykonał przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Inpect-mini zadając określone wartości i prędkości przemieszczenia, utrzymanie stałego przemieszczenia dla testów relaksacji naprężeń, utrzymanie stałej wartości naprężenia dla testów pełzania przez określony czas, stały dla wszystkich prób 600 sekund.

Doktorant w aproksymacji modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych wykorzystał algorytm optymalizacji nieliniowej Levenberga-Marquardta, który jest algorytmem iteracyjnym, łączącym w sobie cechy metody największego spadku i metody Gaussa-Newtona. Realizacja tego algorytmu była wykonywana w oprogramowaniu Origin. Ocenę dopasowania modelu reologicznego do krzywej eksperymentalnej Doktorant dokonał na podstawie wartości współczynnika determinacji R^2 i odchylenia standardowego SD, a niepewność dopasowania została scharakteryzowana przez niepewność standardowa u_A .

Rozdział siódmy najobszerniejszy, opracowany na 128 stronach zatytułowany został „Wyniki badań relaksacji naprężeń i pełzania materiałów wytworzonych przyrostowo”. W rozdziale tym przedstawiono wyniki badań relaksacji naprężeń i pełzania dla materiałów MED610, ABS P430, ROSA-Flex 95A, PLA, PA2200. Dobór modelu ciała idealnego do opisu krzywych relaksacji naprężeń i pełzania Doktorant dokonał na przykładzie testów dla próbki wykonanej technologią MEX, o parametrach wydruku: wysokość warstwy 0,254mm, orientacja zero stopni i dla materiału ABS P430. W aproksymacji modelu reologicznego do krzywej relaksacji naprężeń rozpatrzono model podstawowy Maxwella, model standardowy II, model pięcio i siedmioparametrowy Maxwella-Wiecherta, w aproksymacji do krzywej pełzania model podstawowy Kelvina, standardowy I, model pięcio i siedmioparametrowy Kelvina-Voighta. Ocenę dopasowania dokonano na podstawie odchylenia standardowego i współczynnika determinacji. Z przeprowadzonych testów dopasowania Doktorant przyjmuje do pełnej analizy wyników dalszych badań model pięcioparametrowy Maxwella-Wiecherta i Kelvina-Voighta uznając, że jest wystarczający do opisu krzywych relaksacji naprężeń i pełzania. Wskazuje też, że krzywe modeli siedmioparametrowych lepiej pokrywają się z krzywymi eksperymentalnymi i mogą być też wykorzystywane do opisu relaksacji naprężeń i pełzania dla materiałów wytwarzanych przyrostowo. Rozpatrywane modele wymagają skokowego wzrostu odkształcenia i naprężenia teoretycznie w czasie nieskończenie krótkim niemożliwym jednak do osiągnięcia praktycznego. W związku z tym Doktorant na potrzeby testów przyjmuje odpowiednio dużą prędkość oznaczoną przez V_{mm} podawaną w tablicach parametrów technologicznych druku 3D i parametrów badań dla danych rodzajów materiałów. W rozprawie doktorskiej pierwszym testem w którym wykonano badania relaksacji naprężeń i pełzania był test na próbkach z materiału MED610 wykonanych technologią druku PJM. Zastosowane parametry technologiczne to wysokość warstwy 0,016mm, orientacja wydruku 0, 45, 90 stopni, temperatura głowic 72^o C, natomiast parametry badań – obciążenie wstępne 20N, prędkość przemieszczenia poprzeczki maszyny w celu osiągnięcia zadanej wartości wydłużenia $V_{mm} = 0,17\text{mm/s}$, czas próby 600s, odkształcenie stałe dla relaksacji naprężeń 1mm a naprężenie stałe dla próby pełzania 10MPa. Wykonano 60 próbek płaskich i poddano je rozciąganiu. Podana w tabeli 7.3 wartość prędkości obciążania próbek $V_{mm} = 0,17\text{mm/s}$ w odniesieniu do wielkości odkształcenia 1mm jest znacząco mała, aby ją uznać za guasi-jednostkowy skok, tym bardziej że w innych tabelach ta wartość podawana jest jako 10 mm/s (jest to prawdopodobnie błąd redakcyjny). Dla każdej krzywej eksperymentalnej relaksacji naprężeń i pełzania dokonano aproksymacji, za pomocą wskazanych równań (1) i (2) pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta i Kelvina –Voighta. Zbiorcze wykresy testów próbek na relaksację naprężeń i pełzanie wykazały rozrzut krzywych zachowując jednak jednakowy trend wzrostu i spadku co Doktorant tłumaczy trudnością techniczną uzyskania skoku jednostkowego naprężenia i odkształcenia. Wynikiem dopasowania są parametry

równania Maxwella-Wiecherta: σ_0 , σ_1 , σ_2 , t_1^R , t_2^R oraz współczynniki dopasowania $\chi^2(0,001822)$ i $R^2(0,9948)$ dla $(P_d^0)^R$, a w równaniu Kelvina-Voighta: ε_0 , ε_1 , ε_2 , t_1^P , t_2^P i współczynniki dopasowania $\chi^2(0,000006)$ i $R^2(0,9992)$ dla $(P_d^0)^P$. Praktycznie krzywe eksperymentalne pokryły się z krzywymi modelowymi. Na podstawie średnich wartości parametrów naprężeń, średnich czasów relaksacji i stałego zadanego odkształcenia (0,02) obliczono moduły sprężystości w teście relaksacji naprężeń E_0^R , E_1^R , E_2^R oraz współczynniki lepkości dynamicznej η_1^R , η_2^R . Podobnie dla testu pełzania i zadanego stałego naprężenia 10MPa obliczono moduły sprężystości E_0^P , E_1^P , E_2^P oraz współczynniki lepkości dynamicznej η_1^P , η_2^P . Moduł zastępczy sprężystości E_z w testach relaksacji naprężeń to suma pojedynczych modułów sprężystości, a najwyższą jego wartość uzyskano przy orientacji wydruku 0° ($E_z^R=589,7\text{MPa}$). Natomiast największą wartość pojedynczego modułu sprężystości osiągnięto dla modułu $E_0^R=398,9\text{MPa}$, pozostałe moduły E_1^R , E_2^R były znacząco mniejsze i jak podaje Doktorant *nie różniły się zbytnio między sobą*. Różnice w wartościach współczynników lepkości dynamicznej *nie są zbyt duże*, największe wartości η_1^R , η_2^R były dla orientacji 90° ($\eta_1^R=1232$ i $\eta_2^R=20927\text{MPa}\cdot\text{s}$). Zdaniem recenzenta te różnice byłyby bardziej wymierne gdyby były wyrażone procentowo, a nie w wymienionej formie. W testach pełzania odwrotność modułu zastępczego $1/E_z$ to suma odwrotności pojedynczych modułów sprężystości, największą wartość $E_z^P=519,7\text{MPa}$ uzyskano dla orientacji wydruku 0° . Z kolei największą wartość pojedynczego modułu sprężystości osiągnięto dla modułu $E_2^P=5005,3\text{MPa}$, najmniejszą $E_0^P=691,8\text{MPa}$. Najwyższą wartość współczynnika lepkości η_1^P uzyskano dla orientacji wydruku 0° ($1020453\text{MPa}\cdot\text{s}$). Średnie wartości spadku naprężeń w teście relaksacji naprężeń po założonym czasie testu 600s wynosiły odpowiednio 36,5 (0°), 36,2 (45°), 39,6 % (90°) procent, a średni wzrost odkształceń w teście pełzania 25,6 (0°), 25,9 (45°), 25,7 % (90°) procent. Podsumowując przeprowadzone testy materiału MED610 wytworzonego technologią utwardzania akrylowych żywic epoksydowych PJM wykazały występowanie anizotropii właściwości zależne od kierunku wydruku, czyli ustawienia obiektu na platformie roboczej. Zjawiska relaksacji naprężeń i pełzania Doktorant wiarygodnie opisał przy pomocy pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta i Kelvina-Voighta. Poszerzył zatem wiedzę o właściwościach reologicznych tego materiału, który może być wykorzystany przy projektowaniu elementów jak protezy, ortezy.

Kolejnym materiałem analizowanym w rozprawie stosowanym w technologii przyrostowej PJM był materiał RGD720. Badaniom na relaksację naprężeń poddano próbki okrągłe wytworzone przy różnej orientacji wydruku 0, 45, 90 stopni. Testy relaksacji naprężeń wykonano analogicznie jak dla materiału MED610, ale dla warunków ściskania. Materiał RGD720 wykazał niewielką zmianę anizotropowości relaksacji naprężeń ze względu na orientację wydruku, spadek naprężeń dla orientacji 0° wyniósł 6,6 procent, dla 45° - 9,3% a dla 90° 7,6 %. Potwierdzono również przydatność pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta do opisu krzywych eksperymentalnych w warunkach naprężeń ściskających. W podrozdziale 7.4, 7.5 i 7.7 Doktorant dokonuje oceny właściwości reologicznych elementów wytworzonych technologią MEX (wytlaczania materiału) dla materiałów ABS P430, ROSA-Flex 96A i PLA. W rozprawie badania elementów wytworzonych technologią MEX dla materiału PLA rozdzielają materiał badawczy dotyczący technologii SLS przedstawiony w podrozdziałach 7.6 i 7.8. Zdaniem recenzenta dla ciągłości rozpatrywanej tematyki można było tego nie rozdzielać. Testy wytworzonych płaskich próbek dla materiału ABS P40 wykonano według parametrów badań stosowanych we wcześniejszych badaniach z tym, że dla próby pełzania zastosowano naprężenie stałe 0,5MPa (w PJM było 10MPa) ze względu na najniższą ze wszystkich rozpatrywanych materiałów wytrzymałość na rozciąganie 22 MPa (pozostałe miały 50-65MPa) i wydłużenie przy zerwaniu 6%. Parametrami zmiennymi przy wydruku była orientacja wydruku 0, 45, 90 stopni i wysokość warstwy 0,254 i 0,33mm. Materiał ABS P40 Doktorant stosował w rozprawie wcześniej przy doborze modelu ciała idealnego do opisu

krzywych relaksacji naprężeń i pełzania (podrozdział 7.1) stąd tabele 7.1 i 7.2 pokrywają się z tabelą 7.19 i 7.24 dla tej samej orientacji wydruku i wysokości warstwy. Wykazano, że nie ma istotnych różnic między wartościami modułów sprężystości dla poszczególnych orientacji wydruku oraz wysokości warstw. Istotne różnice występują dla tej samej orientacji wydruku, moduł sprężystości E_0^R jest kilkakrotnie większy od E_1^R i E_2^R , odwrotnie było przy pełzaniu. Najwyższy współczynnik lepkości dynamicznej w teście relaksacji naprężeń to $\eta_2^R = 9105$ MPas przy orientacji druku 45 stopni ($L_t^{0,33}$), η_1^R znacząco mniejszy przy wszystkich orientacjach, odwrotne zachowanie wystąpiło przy pełzaniu. Materiał ABS P430 wykazywał zmienne anizotropowości relaksacji naprężeń ze względu na orientacje wydruku, spadek naprężeń dla orientacji 0° wynosił 23,6 procent, dla 45° – 27,5 % a dla 90° 25,3 % przy wysokości warstwy $L_t^{0,254}$. Spadek naprężeń przy wysokości warstwy $L_t^{0,33}$ był nieznacznie wyższy dla orientacji 0° wyniósł 24,8 procent, dla 45° – 29,9% a dla 90° 26 %. Średni wzrost odkształcenia w teście pełzania to 16,3 (0°), 17,6 (45°), 18,2 % (90°) procent przy wysokości warstwy $L_t^{0,33}$ a przy $L_t^{0,254}$ 15,6 (0°), 17,1 (45°), 16,1 % (90°). Doktorant stwierdza, że wpływ wysokości warstwy jest niewielki na spadek naprężeń i odkształceń w prowadzonych testach reologicznych. Potwierdzono również przydatność pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta i Kelvina –Voighta do opisu krzywych eksperymentalnych.

Badaniom elementów wytworzonych technologią MEX z materiału ROSA-Flex 96A przy ściskaniu poddano próbki okrągłe z wytworzonymi konturami o liczbie 2,4,6. W tabeli 7.29 Doktorant podaje omyłkowo wymiary przekrojów poprzecznych jak dla próbek płaskich. Korzystając z średnich wartości parametrów $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, t_1^R, t_2^R$ określonych według modelu Maxwella –Wiecherta i stałego odkształcenia 2,5mm obliczono moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej. Materiał ROSA-Flex 96A charakteryzuje się wysoką elastycznością jego wydłużenie przy zerwaniu wynosi 350%. Stąd modelowy moduł sprężystości E_0^R był najniższy ze wszystkich rozpatrywanych materiałów 7,6MPa. Moduł zastępczy uzyskał największą wartość $EzR=53,6$ MPa dla 4 konturów przy nieznacznym spadku dla pozostałych konturów 2 i 6. Współczynnik lepkości dynamicznej η_2^R uzyskano najwyższy dla 4 konturów, a η_1^R dla 2 konturów. Doktorant stwierdza, że wpływ liczby konturów jest nieznaczny przy określaniu modułów sztywności, natomiast jest zauważalny przy współczynniku lepkości dynamicznej. Wysoka elastyczność rozpatrywanego materiału sprawiła, że w testach relaksacji naprężeń uzyskano wysoki spadek naprężeń wynoszący 89,2% dla 2 konturów, 85,3% dla 4 konturów i 89,1% dla 6 konturów. Doktorant uznaje, że zjawiska relaksacji naprężeń można również opisywać modelem Maxella-Wiecherta uzyskując wysokie dopasowanie krzywych eksperymentalnych.

Badaniom elementów wytworzonych technologią MEX z materiału PLA przy rozciąganiu poddano próbki płaskie z wytworzonymi konturami o liczbie 2 i 10. Dokonując aproksymacji modelu pięcioparametrowego do krzywych pełzania uzyskano wartości $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, t_1^P, t_2^P$ na podstawie których i zadanego stałego naprężenia 10MPa obliczono wartości modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej. Większe wartości modułów sprężystości uzyskano dla próbek z 10 konturami ($EzP^{10}=198,1$ $EzP^2=169,4$ MPa). W przypadku współczynników lepkości dynamicznej, wyższe wartości posiadały próbki również z 10 konturami. Wzrost odkształcenia w teście pełzania dla próbek z 2 konturami wyniósł 25,3%, a dla 10 konturów 20,3%. Potwierdzono też przydatność modelu pięcioparametrowego Kelvina-Voighta do opisu zjawisk pełzania.

Badania reologiczne relaksacji naprężeń płaskich elementów wytworzonych technologią SLS (selektywne spiekanie proszków) z materiału PA 2200 Doktorant realizował według orientacji wydruku 0, 45, 90 stopni i gęstości energii wiązki laserowej 0,056 i 0,076 J/mm² poddając je rozciąganiu. Podobnie jak w wymienionych wcześniej technologiach druku wystąpiła anizotropia właściwości reologicznych ze względu na orientacje wydruku na którą miały wpływ współczynniki lepkości dynamicznej. W przypadku modułów sprężystości nie

stwierdzono znaczących różnic między tymi współczynnikami dla różnych orientacji wydruku. Istniały różnice, ale w ramach tej samej orientacji wydruku, moduł E_0^R był wielokrotnie większy niż E_1^R i E_2^R co również występowało przy wymienionych pozostałych technologiach przyrostowych. Spadek naprężenia w badaniach relaksacji naprężę wyniósł od 20,98 do 24,5 % uwzględniając wszystkie orientacje wydruku i gęstości energii wiązki laserowej. Doktorant stwierdza, że zjawisko relaksacji naprężeń występujące w materiale PA2200 wytworzonym technologią SLS można opisać również jak poprzednio analizowanych testach pięcioparametrowym modelem Maxwella-Wiecherta uzyskując wysoki stopień dopasowania (np. $\chi^2 -0,000431$, $R^2 -0,9952$ dla $E_d^{0,076} - P_d^{90}$)^R. W podrozdziale 7.8 Doktorant rozszerzył badania relaksacji naprężeń dla tego samego materiału poddając próbki w trakcie testu ściskaniu i rozciąganiu. Badanymi elementami były próbki w postaci wałeczka zgodnie z ISO-3384 i kształtki- ISO 527, bez wskazania ich kształtu i wymiarów w rozprawie. Stwierdzono odmienne zachowanie relaksacji naprężeń zależne od stanu obciążenia . Przy ściskaniu krzywe spadku naprężeń były stabilne bez znacznego rozrzutu, a wartość relaksacji wynosiła 4,24%. Krzywe spadku naprężeń przy rozciąganiu charakteryzował typowy spadek naprężeń ze znacznie mniejszym rozrzutem niż w innych testach wynoszący 19,58%. Moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej uzyskane dla naprężeń ściskających były znacząco mniejsze niż dla rozciągania. Doktorant potwierdził przydatność modelu Maxwella –Wiecherta do opisu zjawisk relaksacji naprężeń dla materiału PA2200 przy ściskaniu i rozciąganiu.

Ósmy rozdział zatytułowany „Wnioski” opracowano na 4 stronach, są one spójne i odpowiadają ustalonemu celowi i tematowi rozprawy doktorskiej ze wskazaniem na dalsze kierunki badań.

3. Ogólna ocena merytoryczna

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Wiktora Szota cechuje wysoki poziom naukowy i profesjonalizm dotyczący prezentacji zarówno rezultatów badań jak i przeprowadzonej analizy. Cechuje ją również kompleksowość przeprowadzonych badań zarówno modelowych jak i eksperymentalnych oraz trafność doboru literatury. W rozprawie zarówno naukowy jak i użytkowy cel pracy został sformułowany w sposób dość szeroki, dzięki temu było możliwe uogólnienie wszystkich celów cząstkowych jakie zostały sformułowane w każdym z rozdziałów pracy. Zakres pracy jest obszerny, a jej układ edytorski poprawny. Przedstawione wyniki całości badań zaprezentowano w możliwie zwartej formie zwłaszcza te dotyczące procesów relaksacji naprężeń i pełzania. Przedstawiają one nowatorskie podejście w doborze modelu reologicznego dla materiałów lepko-sprężystych jakimi są materiały polimerowe stosowane w technologiach przyrostowych druku 3D. Badania prowadzone w technologiach przyrostowych wskazują, że istnieje korelacja pomiędzy parametrami technologicznymi druku a właściwościami mechanicznymi. Większość z tych badań koncentruje się na określeniu wpływu kąta pochylenia, wysokości warstwy, orientacji wydruku, gęstości energii, liczby konturów, czy temperatury dyszy. Natomiast badania nad zachowaniem się pod obciążeniem elementów wydrukowanych przy pomocy różnych technologii i materiałów wsadowych nie są tak często analizowane. Doktorant wybierając trzy procesy technologiczne, wytłaczania warstwowego materiału, warstwowego nadruku płynnego materiału i selektywnego spajanie sproszkowanego materiału poszerzył wymiennie stan wiedzy dotyczący właściwości reologicznych badanych w rozprawie materiałów stosowanych w druku 3D. Określił ważne dla praktyki inżynierskiej właściwości reologiczne jak moduły sprężystości, czas relaksacji naprężeń i pełzania, współczynniki lepkości dynamicznej uzyskane na podstawie starannego dopasowania wyników eksperymentalnych do modeli pięcioparametrowych ciał idealnych Maxwella-Wiecherta i Kelvina-Voighta. Doktorant pod każdą tabelą dotyczącą wyznaczonych wartości parametrów równania rozpatrywanych modeli

i współczynników dopasowania podaje jednakową powtarzającą się interpretację związaną z trudnościami technicznymi realizacji skoku jednostkowego podczas wykonywania testów jak też budową fizyczną materiałów mającą wpływ na reologiczne właściwości. Jest to zbyt ogólna interpretacja, a bardziej szczegółowe wyjaśnienie wymagałoby dodatkowych badań materiałowych, a to wychodziłoby poza zakres recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Wyniki swoich badań Doktorant przedstawił również w opublikowanych artykułach w *Advances i Materials Science*, *Polimery*, *3D Printing Additive Manufacturing* cytowane w rozprawie.

4. Uwagi szczegółowe

1. Na stronie 83 we wzorze 4.14 wielkość $\dot{\epsilon}$ to prędkość odkształcenia.
2. Strona 88 pod rysunkiem 4.13 zapis „Wykorzystując równą równowagę” powinno brzmieć równania równowagi.
3. Strona 94 w równaniu 4.51 zamiast E_2 powinno być E_1 a na stronie 155 i 156 zamiast t_1^p winno być t_2^p .
4. Strona 129 pierwsze zdanie od góry strony stylowo niepoprawne.
5. Strona 143 w wypisanych wartościach parametrów modelu Maxwella-Wiecherta podano trzy razy σ_0 zamiast σ_1 i σ_2 .
6. Błędy oznaczeń numerowych rysunków i tabel- strona 144 zamiast tabela 7.2 ma być 7.5, str.151 zamiast rysunku 7.3 ma być rysunku 7.7, str.156 zamiast rysunku 7,8 ma być 7.12, str.182 podano rysunek 7.28 a ma być 7.27.
7. Strona 220 największa wartość zastępczego modułu sprężystości wystąpiła dla liczby konturów 4 a nie 2,
8. Strona 237 tabela 7.39 dotyczyć ma materiału PLA a nie PA2200.
9. Pozostałe uwagi zostały przedstawione w punkcie 2 recenzji.

5. Końcowa ocena rozprawy

Oceniając całość recenzowanej rozprawy należy podkreślić istotną wartość poznawczą i badawczą analizowanych w pracy zagadnień, które obejmowały zarówno problemy z zakresu inżynierii mechanicznej, budowy i eksploatacji maszyn, mechaniki i wytrzymałości materiałów szczególnie w aspekcie rozwijającej się w kraju technologii przyrostowych. Na każdym etapie pracy, począwszy od sformułowania celu, poprzez przegląd literaturowy, uzasadnienie wyboru obiekt badań, sposób ich realizacji i interpretacji wyników Doktorant wykazał się wysokim opanowaniem warsztatu naukowego i badawczego.

Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska mgr. inż. Wiktora Szota pt.: „Ocena właściwości reologicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D z zastosowaniem wieloparametrowych modeli ciał idealnych” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. Jednocześnie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej o dopuszczenie Autora do jej publicznej obrony.