

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Wiktor Szot

OCENA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNYCH ELEMENTÓW WYTWARZANYCH TECHNOLOGIĄ DRUKU 3D Z ZASTOSOWANIEM WIELOPARAMETROWYCH MODELI CIAŁ IDEALNYCH

Promotor: dr hab. inż. Jerzy Bochnia, prof. PŚk

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Paweł Zmarzły, prof. PŚk

Kielce 2025

"Wiara i rozum są jak dwa skrzydła, na których duch ludzki unosi się ku kontemplacji prawdy" Jan Paweł II, Fides et Ratio I

Dr. hab. prof. PŚk Jerzemu Bochni serdecznie dziękuję za poświęcony czas i cenne uwagi otrzymane podczas pisania rozprawy doktorskiej. Dr. hab. prof. PŚk Pawłowi Zmarzłemu wyrażam wdzięczność za wszelkie wskazówki i możliwość konsultacji. Dziękuję moim Rodzicom za wspieranie mnie podczas pisania rozprawy doktorskiej. Podziękowanie kieruję też do wszystkich osób, dzięki którym ta rozprawa powstała.

Spis Treści

Sp	Spis Treści7					
SP	PIS WA	ŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ i AKRONIMÓW	9			
1.	Przedmowa					
	1.1.	Wprowadzenie	_ 15			
	1.2.	Rys historyczny i rodzaje technologii przyrostowych	_ 16			
	1.3.	Rola badań właściwości mechanicznych modeli wytwarzanych przyrostowo	_ 34			
2.	Studium literaturowe					
	2.1.	Technologie przyrostowe – prognozy rozwoju	_ 40			
	2.2.	Reologia w technologiach przyrostowych – aktualny stan	_ 42			
3.	Tech	nologie przyrostowe zastosowane w badaniach	_49			
	3.1.	Bezpieczeństwo i higiena pracy z technologiami przyrostowymi	_ 49			
	3.2.	Wytłaczanie warstwowe materiału MEX	_ 55			
	3.3.	Selektywne spiekanie proszków SLS	_ 59			
	3.4.	Fotoutwardzanie akrylowych żywic polimerowych PJ	_ 64			
4.	Reologia ciała stałego		_70			
	4.1.	Relaksacja naprężeń	_ 71			
	4.2.	Pełzanie	_ 76			
	4.3.	Modele reologiczne	_ 80			
	4.4.	Model Maxwella-Wiecherta	_ 89			
	4.5.	Model Kelvina-Voighta	_ 97			
5.	CEL I	SPOSÓB REALIZACJI PRACY	106			
	5.1.	Cel pracy	106			
	5.2.	Hipoteza badawcza	108			
	5.3.	Sposób realizacji celów pracy	108			

6.	Program badań					
	6.1.	Kształt próbek i zastosowane parametry technologiczne				
	6.2.	Aparatura i materiały użyte do wytworzenia próbek	116			
	6.3.	Aparatura badawcza	_ 119			
	6.4.	Algorytm Levenberga – Marquardta	_ 122			
	6.5.	Ocena dopasowania modelu reologicznego do krzywej eksperymentalnej _	124			
7.	Wyn	iki badań relaksacji naprężeń i pełzania materiałów wytwarz	anych			
pr	zyros	:owo	_128			
	7.1.	Dobór modelu ciała idealnego do opisu krzywej relaksacji lub pełzania	128			
	7.2.	Materiał MED610	139			
	7.3.	Materiał RGD720	163			
	7.4.	Materiał ABS P430	175			
	7.5.	Materiał ROSA-Flex 96A	_ 209			
	7.6.	Materiał PA2200	_ 220			
	7.7.	Materiał PLA	237			
	7.8.	Zestawienie naprężeń relaksacyjnych ściskających i rozciągających	_ 246			
8.	Wnie	oski	_256			
Lit	eratu	ra	_260			
SP	SPIS RYSUNKÓW SPIS TABE <u>L</u>					
SP						
St	Streszczenie Rozprawy Doktorskiej					
Su	Summary of Doctoral Dissertation					

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ i AKRONIMÓW

Akronimy

- ABS akrylonitryl-butadien-styren,
- ASTM Amerykańskie Stowarzyszenie Badań i Materiałów,
- BHP bezpieczeństwo i higiena pracy,
- BJ spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem,
- DED ukierunkowane stapianie dostarczonego materiału,
- DLP metoda polimeryzacji ciekłej żywicy za pomocą światła projektora,
- DMLS metoda selektywnego przetapiania laserowego proszków metali,
- DOD metoda selektywnego osadzania i utwardzania kropel materiału,
- EBAM metoda topienia proszków metali wiązką elektronów,
- EBM metoda topienia proszków metali wiązką elektronów,
- EN Norma Europejska,
- FDM/FFF metoda osadzania topionego materiału,
- HA kwas hialuronowy,
- HDPE polietylen o dużej gęstości,
- HIPS polistyren o wysokiej udarności,
- IR promieniowanie podczerwone,
- IRP metoda szybkiego prototypowania atramentowego,
- ISO Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna,
- LCP polimer ciekłokrystaliczny,
- LDPE polietylen o niskiej gęstości,
- LENS metoda stapiania sproszkowanego materiału wiązką lasera,
- LM automatyczny system cięcia laminatów,

LOM – metoda wycinania warstw modelu w arkuszach folii lub papieru i ich sklejania,

MD - metoda osadzania metalu,

MEX - wytłaczanie warstwowe materiału,

MJT - warstwowy nadruk płynnego materiału,

MJM - metoda utwardzania żywic fotopolimerowych światłem UV,

MJF – metoda osadzania środków wiążących w warstwie materiału proszkowego,

NPJ - metoda rozpylania nanocząstek materiału na ciecz,

PA – poliamid inaczej nazywany Nylon,

PAI – poli(amidoimid),

PBF - selektywne spajanie sproszkowanego materiału,

PBI – poli(benz imidazol),

PC - poliwęglan,

PCL – polikaprolakton,

PEEK – poli(eteroeteroketon),

PEI – polietylenimina,

PETG - politereftalan etylenu z domieszką glikolu,

PI – poliimid,

PJM - fotoutwardzanie akrylowych żywic fotopolimerowych,

PLA – polilaktyd, polikwas mlekowy,

PN – Polska Norma,

POM – polioksymetylen,

PP – polipropylen,

PPE – poli(eter p-fenylenowy),

PPO – poli(tlenek p-fenylenu),

PPS – poli(siarczek fenylenu),

PS – polistyren,

PSU – polisulfon,

PU - poliuretan,

PVA – poli(alkohol winylowy),

PVC - poli(chlorek winylu),

SAN - żywica styrenowo-akrylonitrylowa,

SCS – system tworzenia brył,

SDL - metoda laminowania selektywnego,

SGC - metoda utwardzania podłoża stałego,

SL - laminacja warstwowa przekrojów,

SLA-metoda stereolitografii,

SLM - metoda selektywnego topienia laserowego,

SLS – metoda selektywnego spiekania proszków,

SOUP - laserowa drukarka ultrafioletowa do obiektów stałych,

TPU - poliuretan termoplastyczny,

UC – metoda wycinania warstw modelu w arkuszach folii i ich łączenie wibracjami ultradźwiękowymi,

UHMWPE - polietylen o ultra wysokiej masie cząsteczkowej,

UV - promieniowanie ultrafioletowe,

VPP – fotopolimeryzacja objętościowa.

Oznaczenia

Agl_t – tolerancja kątowa, °,

a – grubość próbki, mm,

b – szerokość próbki, mm,

 CH_t – tolerancja cięciwy, mm,

 $\sigma(t)$ – krzywa relaksacji naprężeń,

 $\varepsilon(t)$ – krzywa pełzania,

- Chi² współczynniki testu zgodności (współczynnik dopasowania),
- R² współczynniki determinacji (współczynnik dopasowania),

Dirac(t) – funkcja Diraca,

- E moduł sprężystości,
- E_d gęstość energii, J/mm²,

 $E_0, E_1, E_2, E0, E1, E2 - moduły sprężystości, MPa,$

 E_0^R , E_1^R , E_2^R , E0R, E1R, E2R – moduły sprężystości dla relaksacji naprężeń, MPa,

 E_0^P , E_1^P , E_2^P , E0P, E1P, E2P – moduły sprężystości dla pełzania, MPa,

 E_z^R – moduł zastępczy dla relaksacji naprężeń, MPa,

 E_z^P - moduł zastępczy dla pełzania, MPa

 F_p – obciążenie wstępne, N,

H(t) – funkcja Heviside'a,

Ns – liczba konturów (shells),

n -liczba pomiarów w serii,

 P_d – orientacja wydruku, °,

p – liczba,

p% – procent liczby, %,

S – pole przekroju próbki, mm²,

SD – odchylenie standardowe,

t – czas, s,

 t_1^R , t_2^R – czasy relaksacji, s,

 t_1^P , t_2^P – czasy retardacji, s,

u_A – niepewność typu A,

 u_{C} – niepewność całkowita,

 v_{mm} – prędkość przemieszczenia poprzeczki maszyny w celu osiągnięcia zadanej wartości wydłużenia, mm/s,

L_t – wysokość warstwy, mm,

 x_i – wyniki kolejnych pomiarów (obserwacji) w serii,

 σ – naprężenie, Pa,

 σ_B – naprężenie dla modelu B,

 σ_C – naprężenie ściskające,

 σ_A – naprężenie dla modelu A,

 $\sigma_{const.}$ – naprężenie stałe, MPa,

 σ_T – naprężenie rozciągające,

 σ_{tn} – wartość naprężenia dla $t \rightarrow \infty$, MPa,

 σ_0 – naprężenie początkowe,

 ε – odkształcenie,

 ε_{t0} – odkształcenie początkowe,

 ε_0 – odkształcenie jednostkowe początkowe,

 ε_{tn} , ε_{EZ} – wartość odkształcenia dla $t \rightarrow \infty$,

 ε_A – odkształcenie dla modelu A,

 ε_B – odkształcenie dla modelu B,

 $\varepsilon_{const.}$ – odkształcenie stałe, mm,

 η – współczynnik lepkości dynamicznej, MPa·s,

 η_1 , η_2 – współczynniki lepkości dynamicznej, MPa·s,

 $\eta_1^R, \eta_2^R, \eta_1 R, \eta_2 R$ – współczynniki lepkości dynamicznej dla relaksacji naprężeń, MPa·s,

 $\eta_1^P, \eta_2^P, \eta_1 P, \eta_2 P$ – współczynniki lepkości dynamicznej dla pełzania, MPa·s, R_{σ} – relaksacja naprężeń po założonym czasie ekspozycji, MPa,

- R_{ε} pełzanie po założonym czasie eskpozycji, %,
- $\Pi_{\sigma}, \Gamma_{\varepsilon}$ operatory różniczkowe

1. Przedmowa

1.1. Wprowadzenie

W ciągu ostatnich kilku lat nastąpił dynamiczny rozwój technologii przyrostowych w kierunku zastosowań dla przemysłu. Druk 3D należy do koncepcji Przemysłu 4.0 (Industry 4.0). Coraz popularniejsze korzystanie z technologii przyrostowych jest spowodowane potrzebą skrócenia czasu prototypowania i wytwarzania. Dodatkowo druk 3D pozwala na wytwarzania elementów o skomplikowanej geometrii, która dotąd była trudna lub niemożliwa do uzyskania konwencjonalnymi metodami.

Reologia może odnosić się zarówno do cieczy jak i do ciała stałego. Właściwości reologiczne informują o zachowaniu się ciała stałego pod wpływem naprężeń w pewnym czasie. Wyróżniamy dwa zjawiska: relaksację naprężeń i pełzanie materiału. Oba mogą być negatywne, ponieważ prowadzą do uszkodzeń części maszyn lub innych elementów. na które działają naprężenia przez pewien czas. W związku z tym konstruktorzy starają się tak projektować elementy, aby unikać występowania tych zjawisk. Niestety czasem nie da się tego uniknąć, dlatego tak ważne jest poznanie charakterystyki zjawisk: relaksacji naprężeń i pełzania materiału. W technologiach przyrostowych mają na nie wpływ, m.in. materiał modelowy i parametry technologiczne wydruku. Do opisu krzywych (relaksacji naprężeń i pełzania materiału), które są wynikiem testów reologicznych, stosuje się modele reologiczne Maxwella-Wiecherta (relaksacja naprężeń) i Kelvina-Voighta (pełzanie materiału). W wyniku dopasowania modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych otrzymuje się jego parametry. Na podstawie parametrów równań modeli reologicznych wylicza się moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej, które z kolei można zastosować w obliczeniach inżynierskich.

Badania przedstawione w niniejszej pracy pozwalają: poznać zachowanie się modeli wytwarzanych wybranymi technologiami pod wpływem naprężeń w czasie dziesięciu minut oraz określić, które parametry technologiczne wpływają na właściwości reologiczne modeli wytwarzanych przyrostowo, a także ocenić przydatność zastosowania modeli reologicznych do opisu krzywych relaksacji naprężeń i pełzania materiału.

Jak pokazuje analiza literatury i karty charakterystyk materiałów stosowanych w technologiach przyrostowych, zagadnienie właściwości reologicznych w technologiach druku 3D znajduje się w początkowej fazie badań. Istnieje także potrzeba dalszych, bardziej szczegółowych badań, które pozwolą na lepsze zrozumienie dwóch zjawisk relaksacji naprężeń i pełzania w materiałach wytwarzanych przyrostowo.

1.2. Rys historyczny i rodzaje technologii przyrostowych

Druk 3D, odgrywa coraz większą rolę w procesach projektowania, prototypowania i produkcji, zmieniając dotychczasowe podejście do wytwarzania. Aby zrozumieć istotę i potencjał tych technologii, warto przyjrzeć się ich historycznym korzeniom, charakterystyce poszczególnych technik oraz terminologii.

Terminy używane do określenia produkcji przyrostowej ewoluowały wraz z jej rozwojem.

Wśród nich znajdują się [1,2]:

- "produkcja stacjonarna" (desktop manufacturing) prawdopodobnie pierwsza nazwa technologii przyrostowej zgodna z nazwami pojawiającymi się w latach 80. np. "komputer stacjonarny" (desktop computer),
- "szybkie wytwarzanie narzędzi" (rapid tooling) nazwa pojawiła się w momencie, gdy zaczęto stosować technologie przyrostowe do wytwarzania matryc, narzędzi i form,
- "szybkie prototypowanie" (rapid prototyping) termin, którym opisywane są obiekty tworzone metodą druku 3D; obecnie technologie przyrostowe umożliwiają wytwarzanie modeli nie tylko jako prototypów,
- "druk 3D" (3D Printing) pierwsza nazwa opisująca modele wytwarzane metodą warstwa po warstwie; nazwę łączy się ze słowem "niskobudżetowy" (low-cost), tworząc wyrażenie "niskobudżetowy druk 3D" (low-cost 3D Printing), które często wykorzystuje się do opisu drukarek 3D stosowanych przez użytkowników domowych lub półprofesjonalnych,
- "technologia przyrostowa" (additive manufacturing) aktualnie stosowany termin, który opisuje technologie w sposób ogólny; bardzo często stosuję się go w odniesieniu do zastosowań związanych z wysokowydajnymi drukarkami 3D o charakterze profesjonalnym i przemysłowym.

Wytwarzanie przyrostowe wydaje się technologią współczesną i zaawansowaną, jednak jej elementów można by dopatrzeć się w procesach zachodzących w środowisku naturalnym, czy też w samych organizmach żywych [B1,B2]. Przykładem mogą być formacje skalne, które powstawały poprzez nakładanie warstw mułu, a następnie były kształtowane przez wiatr, deszcz i korzenie roślin [B1]. Niektóre organizmy żywe, zwane mięczakami, budują swoje muszle, dodając węglan wapnia do jej zewnętrznej warstwy [B1]. Zachodząca krystalizacja powoduje, że skorupa staje się większa i szersza [B1]. Wymienione powyżej procesy naturalne mogły stać się inspiracją dla człowieka do opracowania nowej technologii produkcyjnej, którą jest druk 3D [B1,B2].

Można uznać, że historię technologii przyrostowej rozpoczął w 1971 roku PierreA. L. Ciraud, opisując koncepcje budowy modelu o dowolnej geometrii z wykorzystaniem proszku i źródła energii [W1]. Dało to podwaliny do obecnie znanej technologii selektywnego spiekania proszku. Dziesięć lat później japoński projektant samochodów Hideo Kodama zgłosił wniosek patentowy dotyczący technologii polegającej na utwardzaniu warstw żywicy wiązką światła UV [3,W1]. Patent ten nie został jednak opublikowany z braku środków finansowych [W1]. W związku z tym można wskazać z chronologicznego punktu widzenia następujące kamienie milowe w genezie druku 3D [1,3,4]:

W roku 1984 Charles W. Hull złożył wniosek patentowy dotyczący pierwszej technologii druku 3D - stereolitografii (rysunek 1.1) [P1]. Na rysunku 1.1 przedstawiono wybrane elementy schematu pierwszej drukarki 3D. Poszczególne numery odnoszą się do elementów lub części opisanych szczegółowo w dokumentacji patentowej wynalazku.

Hullowi udało się wydrukować filiżankę na pierwszej drukarce 3D, czyli SLA-1.



Rys. 1.1. Schemat pierwszej drukarki 3D w technologii SLA opracowanej przez Hulla [P1]

Technologia stereolitografii polega na wytworzeniu wzoru przekroju poprzecznego obiektu, który ma być ukształtowany na powierzchni płynnego ośrodka. Płynny ośrodek powinien być zdolny do zmiany stanu fizycznego na stały w odpowiedzi na stymulację przez oddziaływanie promieniowania, bombardowanie cząsteczkami lub chemiczna reakcję [5,6]. Wytworzone wzory przekroju poprzecznego obiektu łączą się ze sobą, tworząc gotowy model bryłowy [5,6]. Opracowanie tego procesu uznaje się za początek technologii druku 3D. Zaś późniejsze przyznanie patentu Hullowi zainicjowało powstanie największej firmy W technologii przyrostowej - 3D Systems oraz branżę druku 3D [W1].

Na podstawie prac wynalazcy opartych na polimeryzacji opracowano inne koncepcje [1]:

- a. laserowej drukarki ultrafioletowej do obiektów stałych (Solid Object Ultraviolet Laser Printer, SOUP) wykonanej przez firmę CMET w 1990 roku,
- b. utwardzania podłoża stałego (Solid Ground Curing, SGC) opracowane przez firmę Cubital w 1991 roku,
- c. szybkiego prototypowania atramentowego (Inkjet Rapid Prototyping, IRP) polegającego na natryskiwania kropla po kropli fotopolimeru, który następnie jest utwardzany za pomocą światła ultrafioletowego. Metodę opracowała firmę Object Geometric w 2000 roku. Aktualnie metoda ta nosi nazwę fotoutwardzanie ciekłych żywic polimerowych (PolyJet),
- d. systemu tworzenia brył (Solid Creation System, SCS), która polega na utwardzaniu żywicy za pomocą światła UV. Metodę opracowały firmy SONY i D-MEC w 1990 roku.
- W roku 1986 Carl R. Deckard naukowiec z Uniwersytetu w Teksasie opracował drukarkę 3D i metodę do selektywnego spiekania warstw proszku (rysunek 1.2) [P2]. Na rysunku 1.2 przedstawiono wybrane elementy schematu pierwszej drukarki 3D w technologii SLS. Poszczególne numery odnoszą się do elementów lub części opisanych szczegółowo w dokumentacji patentowej wynalazku.



Rys. 1.2. Schemat pierwszej drukarki 3D w technologii selektywnego spiekania proszków opracowanej przez Deckarda [P2]

Metoda polega na takim skierowaniu promienia lasera na warstwę proszku, aby wytworzyć spiekaną warstwę w granicach przekroju poprzecznego modelu [B3]. Proces ten był pierwszym krokiem w rozwoju technologii przyrostowej opartej na selektywnym spiekaniu. W oparciu o metodę Deckarda opracowano inne procesy [1]:

a. selektywne przetapianie laserowe proszków metali (Direct Metal Laser Sintering, DMLS) - metoda oparta na selektywnym spiekaniu proszku metalu przy użyciu wiązki lasera, przy czym pojedyncze ziarna nie są w pełni stopione. Dwie firmy RPI i EOS w 1994 roku opracowały metodę szybkiego prototypowania wykorzystywaną do produkcji części z wykorzystaniem proszków metali.

- b. selektywne topienie laserowe (Selective Laser Melting, SLM) metoda polegająca na całkowitym selektywnym stapianiu proszków metali.
- W 1987 roku firma 3D Systems wyprodukowała pierwszą komercyjną drukarkę w technologii stereolitografii o nazwie SLA-1 [3].
- W 1988 roku Michael Feygin i jego zespół opracował metodę druku 3D polegającą na formowaniu obiektu trójwymiarowego poprzez nakładanie na siebie laminatów o odpowiedniej wysokości i kształcie (rysunek 1.3) [P3].

Na rysunku 1.3 przedstawiono wybrane elementy schematu drukarki 3D. Poszczególne numery odnoszą się do elementów lub części opisanych szczegółowo w dokumentacji patentowej wynalazku.

Odpowiedni kształt laminatu uzyskiwano dzięki automatycznemu systemowi cięcia laminatów (Laminated Manufacturing, LM).



Rys. 1.3. Schemat pierwszej drukarki 3D w technologii łączenia warstw laminatu opracowanej przez Feygina i jego zespół [P3]

Metoda polega na łączeniu warstw laminatu celem uzyskania ostatecznego modelu bryłowego [7]. Na podstawie metody Feygina i jego zespołu opracowano inne procesy [1] – laminowanie selektywne (Selective Deposition Lamination, SDL). Dr Conor i Fintan MacCormack w 2003 roku opisali proces polegający na cięciu arkuszów papieru, a następnie ich klejeniu w celu otrzymania gotowego obiektu bryłowego.

 W 1989 roku Scott S. i Lisa Crump opracowali metodę druku 3D i drukarkę 3D wytwarzającą obiekt bryłowy poprzez nakładanie materiału wypływającego z dyszy dozującej na element podstawy w kontrolowanym tempie [P4]. Technologię tę nazwano osadzaniem topionego materiału (Fused Deposition Modeling, FDM) (rysunek 1.4) [P4]. Na rysunku 1.4 przedstawiono wybrane elementy schematu drukarki 3D w technologii FDM. Poszczególne numery odnoszą się do elementów lub części opisanych szczegółowo w dokumentacji patentowej wynalazku.



Rys. 1.4. Schemat pierwszej drukarki 3D w technologii osadzania topionego materiału opracowanej przez małżeństwo Crump [P4]

Metoda ta stanowi początek udostępniania technologii druku 3D dla użytkowników domowych i półprofesjonalnych. A stało się to możliwe dzięki założeniu przez małżeństwo Crump w tym samym roku firmy Stratasys [W1].

Wspomniana powyżej metoda wytwarzania przyrostowego przyczyniła się do opracowania innych procesów [1]:

- a. osadzania metalu (Metal Deposition, MD), który polega na nakładaniu strumienia proszku metalu lub drutu metalowego na inny materiał będący metalem, ceramiką lub tworzywem sztucznym,
- b. osadzania topionego materiału (Fused Filament Fabrication, FFF)
 metoda identyczna jak w przypadku technologii FDM.Nazwa "Fused Filament Fabrication" została utworzona przez społeczność "RepRap", którą założył w 2004 roku na stronie internetowej "RepRap.org" Adrian Bowyer - pracownik Uniwersytetu w Bath.
- W 1989 roku Emanuel M. Sachs i jego zespół opracowali metodę druku 3D polegającą na budowaniu modelu bryłowego poprzez układanie warstwy sypkiego materiału porowatego w ograniczonym obszarze, a następnie osadzanie materiału wiążącego na wybrane miejsca warstwy proszku (rysunek 1.5) [P5]. Na rysunku 1.5 przedstawiono wybrane elementy schematu drukarki 3D. Poszczególne numery odnoszą się do elementów lub części opisanych szczegółowo w dokumentacji patentowej wynalazku. Niezwiązany materiał w postaci proszku jest usuwany.



Rys. 1.5. Schemat pierwszej drukarki 3D w technologii łączenia cząstek proszku z użyciem lepiszcza [P5]

Nakładanie materiału wiążącego odbywa się z wykorzystaniem wtrysków konwencjonalnej drukarki 2D. Na podstawie prac Sachsa i jego zespołu powstało [1]:

- a. "ModelMaker" i "Pattern Master" metody opisane przez firmę Solidscape, a polegające na nakładaniu warstwy wosku. Następnie znajdujący się nadmiar materiału na warstwie wosku jest usuwany za pomocą poziomego frezu.
- "ProMetal" proces opracowany przez oddział firmy Extruder Honey, a służący do wytwarzania form wtryskowych i matryc. Metoda polega na natryskiwaniu płynnego spoiwa na proszek metalu.

- c. utwardzanie żywic fotopolimerowych światłem UV (MultiJet Modeling System, MJM) - metoda polegająca na natryskiwaniu na platformę roboczą drukarki warstwy żywicy światłoczułej, a następnie utwardzanie jej za pomocą światła UV. Proces ten został opracowany przez 3D System w 1999 roku.
- W 1990 roku pierwszy raz zastosowano druk 3D w medycynie do wytwarzania spersonalizowanych implantów stomatologicznych i protez [W2, W3].
- W 1992 roku firma Stratasys wypuszcza na rynek amerykański pierwszą drukarkę w technologii FDM o nazwie "3D Modeler" [W1].
- W 1992 roku firma DTM prezentuje pierwszą komercyjną drukarkę w technologii SLS o nazwie "Sinterstation 2000" [W4].
- W 1994 roku firma Electro Optical System przedstawia pierwszą komercyjną drukarkę do metalu o nazwie "EOSINT M160" [W4].

Aktualne procesy wytwarzania przyrostowego opierają się o wyżej wymienione metody lub połączenia tych metod, czego przykładem jest technologia PJM, która łączy stereolitografię i metodę natryskiwania [7,8].

Obecnie technologia przyrostowa jest powszechnie stosowana na świecie. Powszechność druku 3D przyczyniła się do powstania dużej ilości terminów z nią związanych. W związku z tym Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna opracowała normę PN/EN/ISO/ASTM 52900:2017-06: Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Podstawy i słownictwo, w której sklasyfikowano i zdefiniowano terminy i technologie druku 3D [N1]. Technologie przyrostowe mogą być różnie klasyfikowane, m.in. ze względu na rodzaj materiału wejściowego czy też stan skupienia materiału [N1]. Najbardziej efektywnym i ujętym w normie [N1] jest podział ze względu na rodzaj procesu (rysunek 1.6).



Rys. 1.6. Ogólna klasyfikacja procesów przyrostowych i używanych w nich materiałów

Podstawowe rodzaje procesów występujących w druku 3D to [2,5,9,B2,N1,N2]:

 fotopolimeryzacja objętościowa (Vat Photopolymerization, VPP) – proces polegający na utwardzaniu żywicy fotopolimerowej, umieszczonej w pojemniku w stanie płynnym, przez światło o określonej długości fali, w wyniku czego powstaje wzór przekroju poprzecznego modelu. Proces powtórzony kilkukrotnie daje efekt w postaci obiektu trójwymiarowego. Z chemicznego punktu widzenia fotopolimeryzacja jest reakcją łączenia monomerów w polimery z użyciem fotoinicjatora.

- wytłaczanie warstwowe materiału (Material Extrusion, MEX) proces polegający na wytłaczaniu materiału warstwa po warstwie przez dysze na platformę roboczą. Wytłaczany materiał jest w stanie półpłynnym uzyskiwanym w wyniku dostarczenia odpowiedniej ilości ciepła.
- selektywne spajanie sproszkowanego materiału (Powder Bed Fusion, PBF) – proces polegający na zainicjowaniu fuzji (spiekania materiału lub topienia materiału) pomiędzy cząsteczkami materiału w postaci proszku, który może być plastikiem lub metalem. W wyniku tego procesu otrzymuje się wzór przekroju poprzecznego obiektu. Powtarzając cykl kilka razy, uzyskuje się model. Topienie materiału polega na otrzymywaniu przez niego wystarczającej ilości energii cieplnej, aby zmienił stan skupienia ze stałego w ciekły. Spiekanie materiału polega zaś na zagęszczaniu go przy użyciu odpowiedniej kombinacji ciepła i ciśnienia bez przekroczenia progu energetycznego wymaganego do zmiany w ciecz.
- warstwowy nadruk płynnego materiału (Material Jetting Additive, MJT) – proces wykorzystujący światło UV lub ciepło do utwardzania fotopolimerów, metali lub wosku.
- spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem (Binder Jetting, BJ) – proces polegający na natryskiwaniu wiążącego środka adhezyjnego na powierzchnię warstwy materiału w postaci proszku. Kropelki lepiszcza łączą ze sobą cząsteczki proszku, tworząc wzór

przekroju poprzecznego modelu. Powtarzając cykl, uzyskuje się obiekt trójwymiarowy.

- ukierunkowane stapianie dostarczonego materiału (Direct Energy Deposition, DED) – proces polega na topieniu materiału w postaci proszku lub drutu za pomocą wiązki lasera, wiązki elektronów lub łuku plazmowego podczas osadzania. Stopiony materiał umieszczany jest warstwa po warstwie, co tworzy nowy model lub naprawia uszkodzony.
- laminacja warstwowa przekrojów (Sheet Lamination, SL) proces polega na układaniu i laminowaniu cienkich arkuszy materiału w celu wytworzenia modelu. Dostępne są trzy rodzaje laminacji: klejenie, lutowanie i zgrzewanie ultradźwiękowe. Zgrzewanie ultradźwiękowe polega na wprowadzenie arkuszy w szybkie drgania mechaniczne o częstotliwości około 20 KHz [10]. Szybkie drgania mechaniczne doprowadzają do nagrzewania się powierzchni styku łączonych arkuszy, osiągając temperaturę uplastycznienia [10]. W tym samym momencie jest wywierany nacisk na spajane elementy, co powoduje ich zgrzewanie [10].

Należy wyróżnić dwie grupy technologii przyrostowych: opartych na materiale typu proszek i materiale typu płynnego. Technologie przyrostowe oparte na materiale modelowym jakim jest proszek umożliwiają wytwarzanie modeli o złożonych geometriach, a także ponownym wykorzystaniu materiału wejściowego. Do tej pory dla tego typu technologii stosowano proszek z tworzyw sztucznych, aktualnie jest to również metal, co znacznie poszerzyło zakres zastosowania [11,N3,N4]. Technologie oparte na materiale wejściowym typu płynnego umożliwiając wytwarzanie elementów o dużej szczegółowości [6,12]. Wszystkie wymienione powyżej właściwości i zastosowania czynią te dwie grupy technologii przyrostowych pożądanymi dla przemysłu [13,14]. Kolejną grupą, o której warto wspomnieć, jest technologia przyrostowa wykorzystująca materiał w postaci filamentu. Jest ona dostępna zarówno dla użytkowników profesjonalnych jak i amatorów. Tania eksploatacja i niedrogie materiały zachęcają coraz większą grupę użytkowników do korzystania z technologii opartych na materiale wejściowym typu filament.

W tabeli 1.1 przedstawiono wykaz technologii przyrostowych istotnych z punktu widzenia badań i ich zastosowania w różnych dziedzinach [5,7].

Skrót	Pełna nazwa (język angielski)	Zasada działania	Rodzaj materiału
SLA	Stereolithography	Polimeryzacja ciekłej żywicy za pomocą lasera	Polimery
DLP	Digital Light Process	Polimeryzacja ciekłej żywicy za pomocą światła projektora	Polimery
FDM	Fused Deposition Modeling	Osadzanie topionego materiału	Kompozyty/Polimery
SLS	Selective Laser Sintering	Selektywne spiekanie proszków	Polimery
DMLS/SLM	Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting	Bezpośrednie spiekanie laserowe metali/ Selektywne topienie laserowe	Metal
MJF	Multi Jet Fusion	Osadzanie środków wiążących w warstwie materiału proszkowego	Polimery
EBM	Electron Beam Melting	Topienie proszków metali wiązką elektronów	Metal

Tabela. 1.1. Zestawienie głównych technologii przyrostowych

PolyJet	PolyJet	Fotoutwardzanie ciekłych żywic polimerowych	Polimery
NPJ	NanoParticle Jetting	Rozpylanie nanocząstek materiału na ciecz	Metal
DOD	Drop On Demand	Selektywne osadzanie i utwardzanie kropel materiału	Wosk
BJ	Binder Jetting	Spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem	Gips/Piasek/Metal
LENS	Laser Engineering Net Shape	Stapianie sproszkowanego materiału wiązką lasera	Metal
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing	Topienie proszków metali wiązką elektronów	Metal
LOM	Laminated Object Manufacturing	Wycinanie warstw modelu w arkuszach folii lub papieru i ich sklejanie	Kompozyty/Papier
UC	Ultrasonic Consolidation	Wycinanie warstw modelu w arkuszach folii i ich łączenie wibracjami ultradźwiękowymi	Kompozyty/Papier/Metal

"3D Printing Media Network" opracowało mapę technologii przyrostowych obejmującą ponad 800 firm produkujących sprzęt dla technologii przyrostowych [W5]. Na podstawie analizy mapy technologii druku 3D można sformułować następujące określenie: firma-technologia przyrostowa, podobne do sformułowania miasto-państwo [W5]. Aktualnie grupą technologii przyrostowych dynamicznie rozwijających się są: druk wielkogabarytowy oraz te oparte na materiale, jakim jest: metal lub hydrożel/biotusz [W5]. Możliwość wykonywania skomplikowanych geometrii modelu czy też całego złożenia z metalu, który jest wytrzymalszy niż tworzywo sztuczne, to dla wielu branż przemysłowych stanowi dużą zaletę [B4]. Możliwość zastosowania druku 3D do wytwarzania obiektów medycznych z hydrożeli/biotuszy (kości, narządy, skóry) oraz protez to dla wielu pacjentów szansa na normalne życie [15,16, B5,B7]. Druk 3D wielkogabarytowy umożliwia obecnie budowę m.in. całych domów, elementów statków kosmicznych, aut lub samolotów [17]. Jego rozwój może przyczynić się do ułatwienia kolonizacji innych planet Układu Słonecznego. Opracowując przegląd technologii przyrostowych, należy wspomnieć o dwóch technologiach, które znajdują się jeszcze w fazie testów i opracowane zostały na podstawie druku 3D: druk 4D i druk 5D [W6, B5].

Druk 4D oznacza wytwarzanie w czterech wymiarach (druk 3D jest trójwymiarowy: szerokość, wysokość i głębokość), gdzie czwartym wymiarem jest czas [18]. Wydruki w technologii 4D mogą zmieniać się pod wpływem światła, ciepła, ciśnienia i innych czynników, jak np. wilgoci albo obecności w pobliżu konkretnego związku chemiczne [18,19]. Znajdują zastosowanie w przemyśle odzieżowym oraz w tzw. robotyce miękkiej [W6]. Miękka robotyka to poddziedzina robotyki, która dotyczy projektowania, kontroli i wytwarzania robotów składających się z materiałów podatnych, zamiast sztywnych ogniw.

Druk 5D umożliwia wytwarzanie elementów w pięciu osiach [B6]. Modele powstałe w druku 5D są bardziej wytrzymałe niż w przypadku druku 3D [B6]. Dodatkową zaletą technologii jest możliwość wykonywania zakrzywionych warstw, dzięki którym w strukturze nie tworzą się słabe punkty, zwiększa się też wytrzymałość mechaniczna obiektów [B6]. Druk 4D i 5D jest obecnie wizją przyszłości powstającą w laboratoriach. W niniejszej rozprawie doktorskiej zostaną szczegółowo omówione trzy wybrane technologie druku 3D: selektywnego spiekania proszków (SLS), ekstruzji materiałów (MEX) i fotoutwardzania akrylowych żywic polimerowych (PJM). Z tego względu, że wybrane technologie druku 3D różnią się od siebie sposobem budowania modeli, dostępnymi materiałami, a także parametrami technologicznymi możliwymi do ustawienia zostały przeprowadzone badania z ich wykorzystaniem. W dalszej części pracy przedstawione zostaną wyniki badań głównych z wykorzystaniem modeli wykonanych w tych trzech technologiach druku 3D.

1.3. Rola badań właściwości mechanicznych modeli wytwarzanych przyrostowo

Technologia przyrostowa to przede wszystkim możliwość szybkiego przejścia z projektu to produktu, co powoduje zmniejszenie kosztów [B8]. Elementy wykonane za pomocą druku 3D są wyzwaniem, jeśli chodzi o określenie ich właściwości mechanicznych w porównaniu z częściami wytworzonymi z wykorzystaniem konwencjonalnych metod. Wyzwanie z określeniem właściwości mechanicznych, w tym też zwiazane reologicznych, wynika z procesu zachodzącego w technologii przyrostowej [20]. Ogólny proces druku 3D to powstawanie modelu poprzez osadzanie warstwa po warstwie materiału [B9]. Wytwarzanie pojedynczej warstwy różni się w zależności od rodzaju procesu, które zostały opisany w podrozdziale 1.2. Osadzanie warstwy materiału powoduje powstawanie anizotropii i naprężeń Badania szczątkowych W finalnym modelu [20,21]. prowadzone w technologiach przyrostowych pokazują, że występuje korelacja pomiędzy parametrami technologicznymi druku 3D, a właściwościami mechanicznymi. Większość badań koncertuje się na analizach wpływu: kąta pochylenia, wysokości warstwy oraz orientacji wydruku [21,22]. Oczywiście są jeszcze inne parametry technologiczne druku 3D (np. gęstość energii, liczba konturów, kierunek wydruku, temperatura dyszy), które również mają wpływ na właściwości mechaniczne, w tym też reologiczne, modeli wytwarzanych przyrostowo. Nie są one jednak tak często analizowane.

Materiały do druku 3D można podzielić na kilka grup: metale i stopy metali, ceramika, polimery, materiały inteligentne, beton i biomateriały [21,23–25]. Dla każdej z tych grup firmy działające w branży druku 3D tworzą nowe typy materiałów. Ich opracowanie wiąże się z koniecznością doboru odpowiednich ilości substytutów składających się na całość, jak i zastosowanie odpowiedniej obróbki, aby uzyskać postać płynną, drut lub proszek. Zatem materiał modelowy przed wytworzeniem z niego elementu trójwymiarowego jest poddawany co najmniej dwóm procesom. Badania nad właściwościami mechanicznymi, w tym też reologicznymi, modelu wytworzonego z danego materiału w technologii przyrostowej umożliwia otrzymanie wiedzy na jego temat, a także może poszerzyć lub ograniczyć jego zastosowanie [24,25].

Obecnie metody szybkiego prototypowania służą do wytwarzania pełnowartościowych wyrobów gotowych i narzędzi [B2]. Zastosowanie technologii przyrostowych podkreśla znaczenie badań mechanicznych w tym też reologicznych [26]. Wytworzone elementy za pomocą druku 3D są wykorzystywane w różnych branżach przemysłowych. Druk 3D jest coraz częściej wykorzystywany ze względu na niskie koszty wytwarzania, ograniczone starty materiału i łatwość wykonywania złożonych geometrii [26,27]. Elementy użytkowe wytworzone za pomocą technologii przyrostowej musza spełniać wymagania niezawodności, ponieważ siły i naprężenia wynikające z rodzaju wvwierane sa na nie zastosowania [21,26]. Niezapewnienie odpowiednich wymagań dotyczacych niezawodności może doprowadzić do poważnych uszkodzeń lub awarii. Na przykład przemysł lotniczy wytwarza takie części, na które działają duże siły i napreżenia podczas lotu. Wykonanie takiego typu elementów przy pomocy technologii addvtvwnej wvmaga przeprowadzenia badań mechanicznych w celu zapewnienia niezawodności na takim samym poziomie jak dla części produkowanych konwencjonalnie [21]. Kolejnym przykładem jest zastosowanie technologii przyrostowych do wytwarzania zarówno protez stomatologicznych, jak i tych zastępujących części ciała. W tym przypadku istotny wpływ ma czynnik, którym jest czas. Elementy medyczne mogą być poddawane obciążeniom i naprężeniom trwającym nawet kilka lat [15]. Wykorzystanie technologii druku 3D ze względu na jej przeznaczenie i zastosowanie branżowe przedstawiono na rysunku 1.7.


Rys. 1.7. Podział wykorzystania technologii druku 3D

Właściwości mechaniczne podzielić można na właściwości statyczne i właściwości dynamiczne [B9]. Rodzaje metod badań mechanicznych stosowanych do oceny modeli wytwarzanych przyrostowo przedstawiono poniżej [21,26]:

- rozciąganie (z ang. tension) pomiary rozciągania umożliwiają wyznaczenie: modułu Younga, współczynnika Poissona, granicy plastyczności, wytrzymałości i wydłużenia przy zerwaniu,
- ściskanie (z ang. compression) pomiary ściskania pozwalają wyznaczyć: wytrzymałość na ściskanie, moduł ściskający, granice plastyczności przy ściskaniu, wytrzymałość na ściskanie do momentu zniszczenia, odkształcenie ściskające w momencie zniszczenia,
- ścinanie (z ang. shear) pomiary ścinania umożliwiają wyznaczenie modułu ścinania,
- pękanie (z ang. fracture toughness) pomiary pękania służą do wyznaczania energii potrzebnej do zainicjowania pęknięcia,
- udarność (z ang. impact) pomiary udarności pozwalają wyznaczyć wytrzymałość udarnościową metodami Charp'ego lub Izoda,
- nośność i kompresja otworów (z ang. bearing strength and open-hole compression) – pomiary umożliwiają zbadanie wytrzymałości użytkowej kompozytów, które będą mocowane przy użyciu śrub; testy te dostarczają również informacji na temat wpływu obszaru uszkodzenia na wytrzymałość,
- zginanie (z ang. flexure) pomiary zginania umożliwiają wyznaczenie: modułu sprężystości przy zginaniu, wytrzymałości na zginanie, naprężenia zginającego i odkształcenia przy zerwaniu w granicach 5% odkształcenia,
- drgania (z ang. vibration) pomiary drgań pozwalają wyznaczyć pewne wielkości takie jak przemieszczenie i prędkość; wielkości te charakteryzują drgania obiektu,

- zmęczenie (z ang. fatigue) badania zmęczeniowe umożliwiają wyznaczenie wytrzymałości zmęczeniowej,
- relaksacja naprężeń (z ang. stress relaxation) badania relaksacji pozwalają określić spadek naprężenia w czasie przy zadanym stałym odkształceniu,
- pełzanie materiału (z ang. creep material) badania pełzania materiału pozwalają określić wzrost odkształcenia w czasie przy zadanym stałym naprężeniu.

Dla większości wyżej wymienionych cech obiektów oraz właściwości materiałów jeszcze nie istnieją normy określające warunki i sposób badania modeli wytwarzanych przyrostowo. Badacze bazują na normach odnoszących się do konwencjonalnych form wytwarzania [21]. Obecnie proces normalizacji technologii przyrostowych trwa i potrzebuje przeprowadzenia jak największej ilości badań nad materiałami i procesami występującymi w technologiach druku 3D.

Podsumowując, badania właściwościami mechanicznych, w tym też reologicznymi, modeli wytwarzanymi przyrostowo odgrywają bardzo istotną rolę. Wynika ona po pierwsze z dużej ilości różnych parametrów technologicznych wydruku, które mają wpływ na wyrób końcowy, po drugie z rodzaju zastosowanego materiału modelowego, a po trzecie z zastosowania technologii przyrostowych w różnych gałęziach przemysłu. Wiedza na temat zachowania elementu wytworzonego w druku 3D pod wpływem działania sił i naprężeń jest bardzo istotna. Zapobiega uszkodzeniom i zniszczeniom elementów, co może doprowadzić do zagrożenia życia ludzkiego.

2. Studium literaturowe

2.1. Technologie przyrostowe – prognozy rozwoju

Technologie przyrostowe przez ponad 40 lat rozwineły się na tyle, że stały się uniwersalne, wydajniejsze i co najważniejsze przystępne cenowo [28,29]. Przewiduje się, że produkcja wykorzystująca technologie przyrostowe będzie rosła, zaczynając od 2023 roku przez najbliższe pięć lat w tempie 20% - 23% rocznie [W7,W8,W9]. Przyczyną takiego tempa wzrostu jest w dalszym ciągu istotna rola technologii przyrostowej jako tej, która zmniejsza opóźnienia w łańcuchu dostaw i umożliwia szybsze wprowadzanie nowych (lepszych) produktów na rynek. Według Diogo wiceprezesa wiodącego producenta drukarek 3D Quentala, klasv przemysłowej, branże, które odnotowują największy wzrost w 2023 roku to: przemysł obronny, przemysł motoryzacyjny, przemysł stomatologiczny i przemysł lotniczy. Markus Glasser, wiceprezes EOS, uważa, że "sprzedaż materiałów do druku 3D, sprzętu i usług wzrośnie łącznie z 12 mld USD w 2021 r. do szacowanych 38 mld USD w 2026 r." [W10,W11,W12].

Analizując ostatnie lata, warto zwrócić uwagę na okres pandemii COVID, który pokazał, jak cenne były rozwiązania z zakresu wytwarzania przyrostowego wykorzystywanego do szybkiej produkcji maseczek, osłon twarzy, części do respiratorów, tymczasowych przestrzeni izolacyjnych i rączek do otwierania drzwi. Firma Stratasys w okresie pandemii była w stanie wyprodukować ponad 100 tys. maseczek do szpitali, dla personelu medycznego i innych osób udzielających pierwszej pomocy [W11,W12]. Aktualnie produkcja przyrostowa odgrywa dużą rolę w zarządzaniu łańcuchem dostaw. Technologia wytwarzania przyrostowego eliminuje potrzebę magazynowania nadmiaru fizycznych części zamiennych, ponieważ mogą być przechowywane w formie cyfrowej i w każdej chwili szybko wyprodukowane, jeśli będzie to konieczne. Firmy mogą lepiej zarządzać produktami już na samym początku ich powstawania, ograniczając koszty i odpady.

Firmy, które specjalizuja się w technologiach przyrostowych wciaż poprawiają wydajność drukarek 3D i opracowują materiały o konkretnych właściwościach mechanicznych [29–31]. Właściwości materiału wsadowego i spoiwa wraz z metodami druku 3D znacząco wpływają na właściwości mechaniczne elementów wytwarzanych przyrostowo. W kolejnych latach zapewne pojawią się nowe materiały w produkcji przyrostowej z: metalu, materiałów inteligentnych (materiały zmieniające swoje własności w kontrolowany sposób w reakcji na bodziec otoczenia), kompozytów, ceramiki i biomateriałów [30,32,33]. Umożliwią one druk specjalnych produktów, takich jak: urządzenia medyczne, sztuczne organy czy też elektronika użytkowa [31,34]. Innowacje w zakresie materiałów powodują drukarek 3D. które opracowywanie beda W stanie drukować z wykorzystaniem nowych materiałów [35,36]. Postępy w dziedzinie produkcji drukarek 3D skupiają się na zmniejszeniu zapotrzebowania energii podczas procesu wytwarzania, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia kosztów.

Trendy związane z produkcją przyrostową przedstawione powyżej to jedynie zarys. Skupiono się tylko na dwóch aspektach: materiałach i drukarkach 3D. Pełniejsza analiza musiałaby się skoncentrować na każdej metodzie wytwarzania przyrostowego, co jest bardzo szerokim tematem. W przyszłości, bez wątpienia, zaawansowane drukarki 3D, nowe i zrównoważone materiały oraz produkcja w chmurze przekształcą sektor druku 3D znany obecnie.

2.2. Reologia w technologiach przyrostowych – aktualny stan

Analiza literatury pokazuje kilka ścieżek związanych z badaniem właściwości reologicznych elementów wytwarzanych przyrostowo. Badania te różnią się między sobą: zastosowanym materiałem modelowym, rodzajem przeprowadzanych testów reologicznych, parametrami badań, zastosowanymi modelami reologicznymi, technologią przyrostową, podejściem do analizy wyników badań i geometrią modelu poddawaną testom reologicznym [37–53].

W związku z kilkoma możliwościami badań reologicznych elementów wytwarzanych drukiem 3D literaturę na ten temat można podzielić ze względu na proces wytwarzania przyrostowego. W niniejszej pracy doktorskiej wyróżniono trzy takie procesy (wytłaczanie warstwowe materiału, warstwowy nadruk płynnego materiału i selektywne spajanie sproszkowanego materiału), w których prowadzono badania właściwości reologicznych. Najwięcej ich wykonano w procesie wytłaczania warstwowego materiału [37,44,49–52,54–57].

W procesie wytłaczania warstwowego materiału przeprowadzono badania reologiczne głównie nad materiałami: PLA, PLA wraz z domieszkami innych materiałów i akrylonitrylo-butadieno-styren [37,44,49–52,54,55].

42

Poniżej przedstawiono wybrane publikacje dotyczące właściwości reologicznych w tym procesie.

W pracy [49] pochodzącej z 2020 roku autorzy opisali badania przeprowadzone nad wpływem dwóch parametrów technologicznych druku 3D: kąta drukowania i wysokości warstwy na pełzanie materiału PLA-max. Próbki poddano naprężeniom rozciągającym. Do analizy odkształcenia pełzającego zastosowano zmodyfikowany model Burgersa, w którym cztery parametry są funkcjami kąta drukowania i poziomu naprężeń. Wyniki eksperymentalne pokazały, że odkształcenie pełzające materiału PLA-max zmniejsza się wraz ze wzrostem kąta drukowania lub zmniejszeniem grubości warstwy.

Kolejne badania eksperymentalne opisane w pracy [50] dotyczyły zachowania się materiału nanokompozytowego w czasie. Materiał nanokompozytowy G6-Impackt składał się z matrycy HiPS wzmocnionej 20% włókien węgla i grafenu. Próbki wytworzone w technologii osadzania topionego materiału zostały poddane trzem rodzajom naprężeń: rozciągającym, zginającym i ściskającym. W zakresie relaksacji naprężeń można było stwierdzić, że dla naprężeń zginających uzyskiwano najniższe wartości relaksacji naprężeń, natomiast najwyższe dla naprężeń rozciągających.

W przypadku zjawiska pełzania materiału naprężenia rozciągające uzyskiwały największe odkształcenie. Naprężenia zginające osiągnęły podobne wartości.

Interesujące wyniki badań związane relaksacją naprężeń i pełzania materiałów: PETG, PETG wzmocnionego włóknami węglowymi i PETG wzmocnionego włóknami kevlarowymi opisano w publikacji [51].

43

Modele wykonane z trzech różnych materiałów poddano naprężeniom ściskającym. Wyniki badań pokazały, że próbki wytworzone z czystego PETG uzyskiwały procentowy spadek naprężenia na poziomie 13,8%, natomiast PETG wzmocnione włóknami kevlarowymi i węglowymi odpowiednio 14,7% i 22,7%. W przypadku PETG z dodatkiem włókien kevlarowych i węglowych pełzanie materiału były o odpowiednio 7,9% i 9,7% wyższe od wartości uzyskanej dla czystego PETG.

W procesie warstwowego nadruku płynnego materiału badania reologiczne przeprowadzano na materiałach z żywic polimerowych o nazwach handlowych: VeroWhite Plus, TangoBlack Plus i MED 610 [43,58,59]. Poniżej przedstawiono wybrane publikacje w tej tematyce.

Badania zawarte w publikacji [60] miały na celu określenie stopnia dopasowania pomiędzy eksperymentalną funkcją relaksacji naprężeń, a krzywą powstałą w wyniku zastosowania pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta. Próbki wytworzone w technologii fotoutwardzania akrylowych żywic polimerowych z materiałów TangoBlackPlus i VeroWhitePlus poddano naprężeniom ściskającym. Wyniki badań potwierdziły, że przyjęty model reologiczny jest odpowiedni do opisu krzywych relaksacji naprężeń dla tych materiałów.

Kolejne badania eksperymentalne prowadzone w ramach określenia właściwości reologicznych przeprowadzono na próbkach o strukturze komórkowej w technologii PolyJet Matrix z materiałów o nazwach handlowych: VeroWhite i FullCure 720 i opisano w pracy [43]. Do opisu krzywych relaksacji naprężeń zastosowano pięcioparametrowy model Maxwella-Wiecherta. Wyniki pomiarów relaksacji wskazują, że próbki wykonane z materiału VeroWhite charakteryzują się najniższą relaksacją. Najwyższą relaksację naprężeń uzyskano dla próbek z materiału FullCure 720.

Badania reologiczne prowadzone w procesach selektywnego spajania sproszkowanego materiału dotyczyły głównie materiału poliamid PA 2200 [60–62]. Próbki poddawane były naprężeniom ściskającym podczas testów reologicznych. Poniżej opisano wybrane publikacje dla badań reologicznych prowadzonych w procesie selektywnego spajania sproszkowanego materiału.

W artykule [63] przedstawiono wyniki badań wpływu podstawowych parametrów technologicznych selektywnego spiekania laserowego na: masę wytwarzanych modeli, relaksację naprężeń (naprężenia ściskające) oraz parametry struktury geometrycznej powierzchni. Parametry brane pod uwagę to: położenie modeli na platformie roboczej drukarki, gęstość energii dostarczanej do spiekanej warstwy proszku i wysokość warstwy. Wyniki pokazały, że kluczowymi parametrami wpływającymi na relaksację naprężeń są wysokość warstwy i gęstość energii.

Kolejne badania zostały przeprowadzone w celu określenia właściwości reologicznych, czyli relaksacji naprężeń i pełzania materiału, w zależności od kierunku wytwarzania oraz próbek wykonanych z kompozytu polimerowo-aluminiowego, a następnie omówione w publikacji [61]. Do opisu krzywych relaksacji naprężeń i pełzania materiału zastosowano odpowiednio pięcioparametrowe modele Maxwella-Wiecherta i Kelvina-Voighta. Wyniki badań pokazały, że nie ma znaczących różnic, w relaksacji naprężeń i w pełzaniu materiału, pomiędzy kierunkami wydruku. Zaobserwowano, że kierunek wytwarzania modeli ma wpływ na lepkość dynamiczną materiału wyznaczaną z równania modelu reologicznego dla zjawiska relaksacji naprężeń. Autorzy uzyskali bardzo dobre dopasowania modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych.

Analizując literaturę w zakresie właściwości reologicznymi w druku 3D, należy wspomnieć o prowadzonych badaniach nad przepływem materiału modelowego przez dysze drukarki 3D [64,65]. Ten typ badań prowadzony jest nie nad ciałem stałem, ale nad cieczą. W tego typu badaniach uwzględnia się: parametry odpowiedzialne za przepływ materiału przez dysze i rodzaj materiału modelowego [64–66]. Celem badań jest uzyskanie jak najlepszego przepływu materiału przez dysze [64–66].

Publikacja [67] dotyczyła skali lepkości dynamicznej wytłaczanych w stanie stopionych włókien PMC wykonanych z PLA i gazowo-atomizowanych proszków Ni-CU w funkcji objętościowej zawartości metalu i strategii wstępnego mieszania surowca. Następnie zestawiono je z parametrami wytłaczalności. Włókna PMC o zawartości metalu 63,4% obj.i 54% obj. uzyskano stosując odpowiednio: mieszanie w roztworze i mieszanie fizyczne. Próbki o większej zawartości metalu i metodzie mieszania w roztworze zmniejszyły skurcz liniowy o 76% w porównaniu z drugim rodzajem próbek. Wartość skurczu bezwzględnego wyniosła 0,49%. Testy reologiczne typu flow-sweep włókien PMC wykazały wyraźne poszerzanie się strefy przerzedzenia ścinaniem wraz ze zwiększaniem się szybkości ścinania. Zastosowano model analityczny Krieger-Dougherty do przewidywania lepkości przy zerowej prędkości ścinania jako funkcji zawartości metalu w PMCs. Model pokazał, że zawartość metalu nie jest skorelowana z lepkością dynamiczna przy wysokich prędkościach ścinania 10-1000 $\frac{1}{2}$.

46

Przedstawiony wyżej przegląd literatury tematycznie związanej z niniejszą rozprawą doktorską pozwolił na znalezienie obszarów, gdzie można prowadzić badania.

Tymi obszarami są:

- technologie druku 3D m.in. selektywnego spiekania proszków (SLS), utwardzania fotoakrylowych żywic polimerowych (PJM);
- parametry technologiczne druku 3D np. gęstość energii (technologia SLS), orientacja wydruku (wszystkie technologie druku 3D), liczba konturów (technologia MEX), prędkość druku (technologia MEX);
- materiały stosowane w druku 3D np.: PA 2200 (technologia SLS), Nylon 11 (technologia MEX/SLS), materiał elastyczny (technologia SLS/MEX);
- model reologiczne np.: model Burgersa,
- rodzaj naprężeń wywieranych na model wytworzony drukiem 3D: naprężenia rozciągające, naprężenia zginające;
- kształt próbek i warunki przeprowadzanych badań.

Wiele badań wskazuje na znaczenie dobrego zrozumienia zachowań reologicznych elementów wytwarzanych drukiem 3D, w celu optymalizacji parametrów druku 3D. Wnioski z przeglądu literatury wskazują na konieczność kontynuowania badań w obszarze właściwości reologicznych materiałów do druku 3D, zwłaszcza w kontekście nowych technologii, materiałów. Badania te będą miały kluczowe znaczenie dla rozwoju technologii przyrostowych i materiałów, aby sprostać wymaganiom nowoczesnych aplikacji przemysłowych, takich jak produkcja części do motoryzacji, lotnictwa, medycyny czy elektroniki.

Ponadto przedstawiona prognoza rozwoju technologii druku 3D udowadnia, że zyskują one coraz większe znaczenie na światowym rynku. Występuje bardzo duży i szybki postęp technologiczny w druku 3D. W związku z tym rośnie potrzeba prowadzenia badań właściwości mechanicznych wytwarzanych elementów z druku 3D.

3. Technologie przyrostowe zastosowane w badaniach

Wybrane technologie druku 3D: osadzania topionego materiału, selektywnego spiekania proszków i fotoutwardzania akrylowych żywic polimerowych różni od siebie sposób budowania modelu, zastosowany materiał, parametry technologiczne i cena materiału wsadowego. Powyżej wymienione czynniki miały wpływ na wybór tych konkretnie trzech technologii druku 3D, ale również przegląd literatury na temat badań prowadzonych nad właściwościami mechanicznymi w technologiach przyrostowych.

Przed przystąpieniem do pracy z technologiami druku 3D bardzo ważne jest zapoznanie z zasadami bezpieczeństwa które opisane są w instrukcjach obsługi drukarek 3D i kartach charakterystyk materiałowych. W dalszej części rozdziału opisano odziaływania niebezpieczne i zagrożenia w druku 3D oraz scharakteryzowano każdą z wybranych technologii druku 3D.

3.1. Bezpieczeństwo i higiena pracy z technologiami przyrostowymi

Bezpieczeństwo i higiena pracy (BHP) według normy PN-ISO 45001 2018-06: Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy – Wymagania i wytyczne stosowania jest to stan warunków i organizacji pracy oraz zachowań pracowników zapewniających wymagany poziom ochrony zdrowia i życia przed zagrożeniami występującymi w środowisku pracy [N5]. Centralny Instytut Ochrony Pracy definiuje BHP jako: "ogół norm prawnych oraz środków badawczych, organizacyjnych i technicznych mających na celu stworzenie pracownikowi takich warunków pracy, aby mógł on wykonywać pracę w sposób produktywny, bez narażania go na nieuzasadnione ryzyko wypadku lub choroby zawodowej oraz nadmiernego obciążenia fizycznego i psychicznego".

Aktualnie technologie wytwarzania przyrostowego nie wymagają ciągłego przebywania w pobliżu drukarki 3D, ponieważ posiadają wbudowane kamery i można nimi sterować zdalnie z poziomu komputera. Jednak należy zwrócić szczególną uwagę na bezpieczeństwo podczas przygotowania drukarki 3D do druku.

Na rysunku 3.1 przedstawiono podział niebezpiecznych i szkodliwych czynników w zależności od charakteru.



Rys. 3.1. Podział odziaływań niebezpiecznych i szkodliwych w druku 3D

Każda z technologii przyrostowych ma charakterystyczne dla siebie drukarki 3D i materiał modelowy, dla których są określone zasady bezpieczeństwa. Poniżej wymieniane zagrożenia opracowano w oparciu o instrukcje obsługi drukarek 3D takich jak: Objet Connex 350, EOS Formiga P100, MakerBot Replicator 5 generacji i MakerBot Sketch [O1-O4]. Również posłużono się kartami charakterystyk takich materiałów jak: PA 2200, MED610, PLA, ABS P430 [O5-O10].

Do oddziaływania fizycznego można zaliczyć: zagrożenia elektryczne, zagrożenia termiczne, zagrożenia mechaniczne, zagrożenie promieniowaniem oraz zagrożenie pożarem i eksplozją.

Zagrożenia elektryczne związane są m.in. z uszkodzeniem izolacji kabli zarówno zasilających jak i tych wewnątrz drukarki 3D czy też uszkodzeniem złączy zasilających. Warto zaznaczyć że drukarki 3D MakerBot Replicator 5th, MakerBot Sketch i Conex 350 są zasilane prądem jednofazowym 230 V. Natomiast drukarka 3D EOS Formiga P100 jest zasilana prądem trójfazowym 230/400 V. Skutki porażenia prądem to: silne skurcze mięśni prowadzące do zwichnięć stawów czy nawet złamań kości, zaburzenia lub zatrzymanie rytmu serca, poparzenia elektryczne skóry i utrata przytomności.

Zagrożenia termiczne występują w wyniku kontaktu z gorącymi powierzchniami takimi jak: dysza i stół roboczy. Komora robocza nagrzana do nawet 385°C dla technologii SLS w przypadku jej otwarcia może również spowodować poparzenia. Skutkiem zagrożenia termicznego w przypadku technologii przyrostowych są oparzenia od I do nawet III stopnia.

Zagrożenia mechaniczne spowodowane są ruchomymi elementami drukarki 3D np. głowica drukująca, stół roboczy czy też drzwi komory procesowej. Wszystkie te wymienione elementy w momencie ruchu mogą doprowadzić do zmiażdżenia rąk lub palców. Potłuczone soczewki optyczne, w przypadku układów druku 3D opartych o laser, mogą mieć bardzo ostre rogi i krawędzie, co skutkuje zranieniem. Rozsypane sproszkowane tworzywo i rozlana żywica potrafią doprowadzić do zagrożenia poślizgnięciem się. Węże wysokiego ciśnienia stosowane w drukarkach 3D mogą doprowadzić w przypadku zerwania i niekontrolowanego poruszania do urazów kończyn.

Zagrożenie promieniowaniem wynikającym ze stosowania lamp UV, soczewek i lasera. Niewidoczne promieniowanie laserowe (bezpośrednie lub rozproszone) prowadzi do ciężkich obrażeń - napromieniowania skóry i oczu. Inny przykład stanowi promieniowanie alfa i gamma związane z zastosowaniem fluorku toru do pokrycia przeciwodblaskowego IR na wszystkich soczewkach. Powłoka fluorku toru jest umieszczona pomiędzy cienkimi warstwami i tworzy zamknięte źródło radioaktywne. Uwolnienie radioaktywnych cząsteczek fluoru toru następuje w przypadku rozbicia lub zadrapania soczewki. Kolejne niebezpieczeństwo wynika z zastosowania w drukarkach 3D lamp UV, które emitują niebezpieczne promieniowanie.

Zagrożenie pożarem i eksplozją spowodowane może być materiałami stosowanymi w druku 3D, atmosferą w komorze roboczej lub lampami UV. Niektóre z materiałów stosowanych w technologiach przyrostowych, a w szczególności sproszkowane tworzywo sztuczne, jest łatwopalne i w połączeniu z powietrzem podczas procesu spiekania może spowodować wybuch. Istnieje także niebezpieczeństwo wybuchu lub pożaru materiałów łatwopalnych znajdujących się w obszarze lasera niezabezpieczonego pokrywą. Lampy UV w momencie całkowitego zużycia mogą eksplodować.

Oddziaływanie chemiczne można podzielić na zagrożenie zatruciem i zagrożeniem związanym z wykorzystywanym materiałem do druku.

Zagrożenie zatruciem związane jest niektórymi elementami optycznymi (np.: soczewki F-Theta, okienko brudy i optyka rozszerzenia promieniowania i lampami UV (stosowane do utwardzania akrylowych żywic polimerowych). Elementy optyczne soczewek F-Theta, okienko brudy i optyka rozszerzenia promieniowania zawierają trujący selenek cynku, który wydzieli się podczas uszkodzenia jednego z tych elementów. Zatrucie może wystąpić przy kontakcie z oczami, skórą, wdychaniu i połykaniu. Lampy UV używane przez drukarkę 3D do utwardzania materiałów żywicznych zawierają niewielką ilość rtęci, której opary są trujące. Przy temperaturach powyżej 400°C występujących najczęściej podczas pożaru powstają podrażniające i wysoce trujące dymy.

Zagrożenie materiałem wykorzystywanym w druku 3D występuje na dwóch etapach ich wykorzystania. Pierwszy etap związany jest z ich magazynowaniem lub załadunkiem do drukarki 3D. Drugi etap stanowi proces ich przetwarzania/drukowania. W pierwszym etapie niebezpieczne są materiały w postaci żywic fotoutwardzalnych i różnego rodzaju proszki, np. polimerowe lub metali. Zidentyfikowane zagrożenia w przypadku żywic światłoutwardzalnych to:

- działanie żrące lub drażniące na skórę,
- uczulenie skórne,
- uszkodzenie lub podrażnienie oczu,
- toksyczne działanie (powtarzalne i jednorazowe) na narządy docelowe,
- podrażnienia lub poparzenia dróg oddechowych,
- toksyczne działanie na środowisko wodne.

W przypadku proszku zidentyfikowane zagrożenia to:

- tworzenie palnego stężenia pyłu w powietrzu,
- podrażnienia dróg oddechowych, skóry, oczu przez pył,
- szkodliwość w przypadku połknięcia,
- cząsteczki proszku szczególnie metali pozostają w organizmie na stałe.

W drugim etapie niebezpieczne są żywice światłoutwardzalne, proszki metali lub polimerowe i filament. Przetwarzanie materiałów podczas procesu drukowania wiąże się z zagrożeniem wdychania oparów, które są toksyczne. Przebywanie w pomieszczeniu, gdzie pracuje drukarka 3D, może powodować zatrucie w wyniku wdychania szkodliwych substancji powstający przy procesach topienia, utwardzania lub spiekania materiału. W związku z tym te pomieszczenia posiadają osobne wentylacje i nie należy w nich przebywać przez dłuższy czas podczas pracy drukarki 3D.

Odziaływanie psychofizyczne związane jest ze stresem i obciążeniem emocjonalnym. Wynika to z wywierania presji na pracowników obsługujących drukarki 3D. Druk 3D wciąż nie jest szybką technologią, wydruk może trwać od kilku do kilkunastu godzin. Dodatkowo nie zawsze wydrukowany model spełnia oczekiwania, dlatego należy powtórzyć wydruk. W trakcie wydruku mogą powstać nieoczekiwane usterki wynikające z tego, że drukarki 3D to w dalszym ciągu prototypowe maszyny. Usunięcie usterki może potrwać od kilku godzin do nawet kilku miesięcy, co jest uzależnione od jej złożoności czy też dostępności części zamiennych. Usterki, niezadawalający wydruk, terminy wykonania, wszystkie te czynniki wpływają na obciążenia psychiczne pracowników technicznych drukarek 3D.

3.2. Wytłaczanie warstwowe materiału MEX

Technologia ta wykorzystuje głowicę drukującą do upłynnienia polimeru, który jest następnie wytłaczany przez dysze w postaci pojedynczej warstwy [68,69,B1]. Pojedyncze warstwy układane jedna na drugiej budują obiekt trójwymiarowy [70]. W zależności od producenta drukarek 3D w tej technologii można zauważyć różnice w schemacie budowy danego urządzenia. Przykładowa konstrukcje drukarki typu dual-extruder przedstawiono na rysunku 3.2.



Rys. 3.2. Przykładowy schemat drukarki 3D w technologii MEX

Najczęściej spotykany schemat budowy drukarki 3D w technologii MEX to ten zawierający głowicę drukującą z pojedynczą dyszą poruszającą

się w osiach OX i OY [71,B10] Tego typu drukarki 3D składają się coraz częściej z podgrzewanego stołu mogącego poruszać się także w osi OZ lub OXOY. Podgrzewany stół poprawia przyleganie pierwszych warstw modelu do podłoża [71]. Właściwe przyleganie warstw jest istotne w przypadku uzyskania odpowiedniego kształtu modelu i właściwości mechanicznych [72]. Drugi typ drukarek w technologii MEX, przeważnie firmy Stratasys, zawiera dwie dysze drukujące, przez które wytłaczany jest materiał modelowy i podporowy. W tym przypadku oprócz podgrzewanego stołu można też dodać grzaną komorę roboczą. Technologia wytłaczania warstwowego materiału jest najtańsza pod względem ceny samych materiałów w postaci filamentu (od 50+ zł/kg) i ceny drukarek 3D (od 900+ zł/szt) w porównaniu z pozostałymi rodzajami technologii druku 3D [68,71,73]. W związku z szerokim zastosowaniem i ciągłym rozwojem technologii MEX należy zwrócić wady i uwage na problemy w modelowaniu dla tej technologii [73]. Aktualnie najwięcej trudności wiąże się z porowatością i zmianami gęstości w obrębie materiału, które są powodowane: środowiskiem drukowania 3D, zmianami termicznymi i wilgotnością [73,74,B11,B12]. Istotną rolę w procesie drukowania z wykorzystaniem technologii osadzania topionego materiału ma ciepło [73,75,76,B10]. Termopara, która jest dołączona do głowicy drukującej, pracuje w tzw. ogrzewaniu cyklicznym [73]. Ogrzewanie cykliczne polega na tym, że termopara osiągnie wymaganą temperaturę, a następnie energia potrzebna do uzyskania tej temperatury zostaje odcięta [73,77,78]. Energia jest przywracana dopiero, gdy temperatura spadnie poza zakres tolerancji. Niespójne ogrzewanie jak i chłodzenie włókna polimerowego powoduje niejednolita gestość oraz problemy z przyczepnością warstw [73]. Trudności

związane z równomiernym ogrzewaniem można spotkać nie tylko w przypadku termopary zamontowanej w głowicy drukarki 3D, ale również w urządzeniach drukujących trójwymiarowo wyposażonych w podgrzewany stół i komore [73]. Dodawanie materiałów wzmacniajacych lub włókien do polimeru bazowego jest korzystne dla poprawy właściwości mechanicznych otrzymanego w ten sposób kompozytu, ale może też generować wady i problemy [73,79]. Mieszanie włókien z osnowa polimerowa musi odbywać się w taki sposób, aby otrzymany końcowy kompozyt był jednolity [73]. Jednolitość składu kompozytu eliminuje koncentrację naprężeń w słabych regionach materiału [70,72-74]. W procesie druku 3D od kompozytu oczekuje się współosiowości włókien [73,78]. Brak współosiowości włókien [33]. Miejsca doprowadza do falistości występowania falistości w kompozycie lub ich pobliża zostaną zniszczone podczas prób wytrzymałościowych [73,74]. Nadmierna porowatość to kolejny problem w przypadku technologii osadzania topionego materiału [73,B12]. Definiuje się ją w tym wypadku jako miarę przestrzeni w modelu, który jest pusty od materiału [73]. Podczas wytłaczania może zostać wtłoczone do materiału powietrze, które tworzy pęcherzyk . Nakładanie warstw odbywa się liniowo co oznacza, że pomiędzy nimi pojawiają się mikroszczeliny. Mikroszczeliny powodują porowatość wydruków [73]. Puste przestrzenie przyczyniają się do powstawania zjawiska zmęczenia. Pozostałe problemy związane są: ze ślizganiem się materiału na rolkach odpowiedzialnych za popychanie materiału w postaci filamentu, z zapychaniem się dyszy drukującej, z blokowaniem się materiału w postaci filamentu na szpuli spowodowanym złym nawijaniem, z brakiem adhezji, co powoduje powstawanie tzw. efektu spaghetti materiału oraz ze złą kalibracją stołu roboczego [73,74,79].

Ze względu na proces druku warstwowego stosowanego w technologii wytłaczania warstwowego materiału, topografia powierzchni różni się w zależności od zastosowanych parametrów technologicznych, a w szczególności od orientacji wydruku, co potwierdzone zostało badaniami [80,B9].

Dzięki ciągłemu rozwojowi technologii osadzania topionego materiału jak i jej popularyzacji dostępna jest duża gama materiałów do druku [69]. Na rysunku 3.3 przedstawiono przykładowe materiały dostępne w tej technologii. Materiał stosowany w technologii MEX muszą spełniać określone kryteria np. materiał musi odznaczać się niską temperaturą topienia, co sprawia, że jest bardziej dostępny do druku [68,70,73]. Inny przykład to materiał musi mieć odpowiednio wysoką temperaturę zeszklenia, która powoduje, że materiał po wytłoczeniu zastyga szybko [70,73].



Rys. 3.3. Przykładowe materiały polimerowe dla technologii MEX [69,73]

Rysunek 3.3 pokazuje materiały, które są czystymi polimerami. Niektóre z nich napotykają wyzwania związane z ich wydrukiem w technologii MEX, dlatego stosuje się wypełniacze w postaci: cząstek, włókien lub nanocząstek [70–73,78]. Dodawane są one w celu poprawy zachowania reologicznego, a tym samym właściwości mechanicznych i poprawy jakości powierzchni [73,80]. Przykładem może być dodawanie cząstek metali, takich jak żelazo lub miedź, do acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS). Poprawia to powierzchnię wydrukowanego modelu oraz jego właściwości termiczne i mechaniczne [73]. Dodanie włókien poprawia właściwości mechaniczne i zmniejsza porowatość elementów drukowanych [73]. Nanocząstki w postaci gliny, nanowłókna węglowe, złuszczony grafit, metale nanokrystaliczne czy nanorurki węglowe są traktowane jako wypełniacze poprawiające właściwości fizyczne i mechaniczne matrycy polimerowej [70,73].

3.3. Selektywne spiekanie proszków SLS

Technologia ta wytwarza obiekty z proszków przy wykorzystaniu zjawiska dyfuzji atomowej [81]. Dyfuzja atomowa zachodzi w każdym materiale o temperaturze powyżej zera bezwzględnego [81,82]. Proces ten zachodzi szybciej w wyższych temperaturach, dlatego proszek w tej technologii jest podgrzewany [81,82]. Temperatura do jakiej podgrzewany jest proszek, znajduje się w zakresie pomiędzy punktami krystalizacji i topienia, co ogranicza powstawanie naprężeń w budowanych elementach [81,83]. Warto zauważyć, że spiekanie różni się od topienia tym, że podczas procesu spiekania materiał nigdy nie osiąga fazy ciekłej [81,84]. Odpowiednie ciśnienie jest również wymagane do przeprowadzenia procesu spiekania [81]. Podczas wytwarzania elementów z polimerów metodą selektywnego spiekania proszków zachodzi kilka zjawisk fizycznych takich jak: promieniowanie laserowe, dyfuzja termiczna, przepływ lepki polimeru

i koalescencja cząstek, rozprzestrzenianie się proszku i zestalanie/krystalizacja [81–85]. Zasada działania technologii SLS polega na spiekaniu wiązką lasera materiału w postaci proszku, który jest nakładany w odpowiedniej ilości przez ramię rozprowadzające na platformę roboczą [81,84]. Kilkukrotne powtórzenie opisanej wyżej operacji skutkuje powstaniem obiektu bryłowego. Schemat działania drukarki 3D przedstawia rysunek 3.4.



Rys. 3.4. Schemat drukarki 3D w technologii SLS

Do rozprowadzania proszku wykorzystywany może być w zależności od drukarki 3D: wałek, ostrze lub łopatka. Sposób rozprowadzania proszku jest bardzo ważny, ponieważ wpływa na gęstość i jednorodność warstwy proszku, ponadto istotny jest rodzaj użytego ramienia rozprowadzającego, od którego mogą zależeć siły wywierane na wcześniej zestaloną warstwę materiału [81]. Laser jest głównym elementem do przeprowadzenia procesu spiekania i może być impulsowy lub z falą ciągłą [81,86]. Energia dostarczana przez wiązkę lasera potrzebna jest do selektywnego stopienia podgrzanych cząstek proszku i zapewnienia połączenie z dolną warstwą. Przekazywana na warstwę proszku energia cieplna prowadzi do stopienia proszku i do utworzenia tzw. "basenu topienia", który przedstawiony został na rysunku 3.5 [81,87].



Rys. 3.5. Schematyczny widok "basenu topienia" w trakcie napromieniowania laserem

W następnej fazie konsolidacji następuje schłodzenie stopionego materiału do temperatury budowania, która jest wyższa od temperatury krystalizacji, oznacza to, że stopiony proszek nie uzyskuje na tym etapie od razu swojej ostatecznej mikrostruktury [81]. "Basen topienia" jest charakteryzowany pod względem szerokości, wysokości i rozkładu temperatur [81,88,89]. Głębokość topienia jest kluczowa dla zapewnienia odpowiedniego połączenia między warstwami, które zapewniają dobre właściwości mechaniczne [84,90,91]. Niepełna konsolidacja może powodować puste przestrzenie, które są powodem słabych właściwości mechanicznych i wysokiej porowatości [81].

Rodzaje stosowanych laserów w technologii selektywnego spiekania laser CO_2 . laser neodymowo-yagowy proszków to: oraz laser [81,86,92]. Oddziaływanie pomiędzy wiązką lasera światłowodowy a warstwą proszku zależy od: składu chemicznego proszku polimerowego, rozkładu i wielkości czastek, a także długości fali lasera [89,90,92]. W rzeczywistości laser selektywnie dostarcza na powierzchnię proszku odpowiednią ilość energii (dla drukarek 3D Formiga P100 jest to min 30 W) w krótkim czasie [81]. Promień lasera padając na powierzchnię proszku, jest tylko w części absorbowany przez cząstki materiału, zaś pozostała część odbija się. Absorpcję można zdefiniować jako oscylacje drgań cząstek proszku [81]. Odbite promienie rozchodzą się po powierzchni nałożonego proszku albo wchodzą w interakcje z innymi cząsteczkami napotkanymi na swojej drodze [81]. Aktualnie najczęściej wykorzystywanym źródłem energii w maszynach SLS jest laser CO₂. Ma on długość fali 10,6 µm, co jest pożądaną wartością w przypadku polimerów, które wykazują wysoki współczynnik absorpcji przy długich falach [81,88]. Laser oddziałuje z proszkami na trzy sposoby: absorpcja, transmisja i odbicie [81]. Wszystkie trzy sposoby mają wpływ na to, czy dany proszek może być wykorzystany do druku w technologii selektywnego spiekania proszków.

Opracowując proszek dla technologii SLS, należy uwzględniać nie tylko współczynnik absorpcji, ale również skład chemiczny czy też kształt i wielkość cząstek [81,88,89,92]. Na rysunku 3.6 przedstawiono materiały dostępne w technologii selektywnego spiekania proszków.



Rys. 3.6. Przykładowe materiały dla technologii SLS [88]

Procesy produkcyjne mogą generować różne rodzaje cząstek proszku. Wyróżnia się trzy główne kształty: kulisty, "ziemniak" i cząstki otrzymywane metodą kriogeniczną o nieregularnym kształcie [81,89]. Wygląd poszczególnych kształtów przedstawiono na rysunku 3.7.



Rys. 3.7. Kształty cząstek proszków: **a** – kulisty, **b** – "ziemniak", **c** – otrzymane metodą kriogeniczną [81]

Cząstki kuliste powstają w procesie koekstruzji mieszanin materiału rozpuszczalnego z nierozpuszczalnym [81]. Cząstki w kształcie ziemniaka powstają w procesach wytrącania [81,82]. Kształt ziemniaka można spotkać w najczęściej stosowanym materiale poliamid PA 12, inaczej nazywany nylonem [81,90]. Powszechnie przyjmuje się, że najbardziej odpowiednie dla procesu SLS są cząstki w kształcie kulistym [81]. Wynika to z faktu, że prowadzą do maksymalizacji gęstości złoża proszkowego i płynności [81].

3.4. Fotoutwardzanie akrylowych żywic polimerowych PJ

PolyJet firmy Stratasys i MultiJet firmy 3D Systems są znakami towarowymi i opisują technologię warstwowego nadruku płynnego materiału, która jest oficjalnym terminem według normy [N1]. Technologia PolyJet wykorzystuje zjawisko fotopolimeryzacji do utwardzania warstwy materiału natryskiwanego przez dysze drukarki 3D na platformę roboczą [93,B13]. Schemat zasady działania przedstawiono na rysunku 3.8.



Rys. 3.8. Schemat drukarki 3D w technologii PolyJet

W procesie warstwowego nadruku płynnego materiału można wyróżnić cztery etapy: formowanie kropli, lądowanie kropli, oddziaływanie kropli z podłożem i utwardzanie [93–96]. Strumień cieczy wyrzucony z dyszy rozpada się na krople, ponieważ napięcia międzyfazowe starają się zminimalizować powierzchnie, co prowadzi do powstawania niestabilności kapilarnych [93]. Krople są kształtu półsferycznego i mają średnicę dyszy lub nieco większą [93,97,98]. Schemat formowania kropli przedstawiono na rysunku 3.9.



Rys. 3.9. Formowanie kropli z lepkosprężystego płynu w druku 3D [93,99]

Podczas procesu formowania kropli wydłużona nić cieczy może zostać podzielona na krople główna i kilka kropli satelitarnych [93]. Krople satelitarne w rezultacie mogą połączyć się z główną kroplą podczas lotu lub upadać na podłoże tuż po niej [93,100]. Zjawisko podziału ma negatywny wpływ na rozdzielczość i jakość wydruku [93]. Na proces powstawania kropel mają wpływ: parametry procesu głowicy drukującej (kształt amplituda sygnałów ciśnienia generowanych przez przetwornik i piezoelektryczny) i lepkość i napiecie powierzchniowe cieczy [93,101]. Formowanie kropel ma wpływ na rozdzielczość i jakość modeli formowanych w technologii PolyJet [93]. Oddziaływanie kropla-podłoże jest kontrolowane przez siły kapilarne, inercyjne i grawitacyjne [93,102]. Uderzenie pojedynczej kropli o podłoże powoduje przesuwnie jej brzegów aż do osiągniecia stanu stabilnego [93]. Charakterystyka powierzchni wpływa na ostateczną średnicę kropli w stanie równowagi [93]. Kąt kontaktu kropli z powierzchnią określa jej zwilżalność [93]. Na zdolność zwilżania powierzchni wpływa skład chemiczny powierzchni, temperatura i tekstura powierzchni [93].

z punktu widzenia dokładności Kluczowym geometrycznej i zachowania mechanicznego drukowanego trójwymiarowo modelu jest etap utwardzania [93,94]. Utwardzanie to termin opisujący proces wzrostu łańcucha polimeru poprzez sieciowanie monomerów. Proces ten trwa aż zestalenia materiału [93,103]. Polimeryzację wywołaną fotoindukcją umożliwiają wolne rodniki (polimeryzacja wolnorodnikowa), kationy (fotoindukowana polimeryzacja kationowa) lub aniony (fotoindukowana polimeryzacja anionowa) [93]. Najczęściej występujaca jest polimeryzacja wolnorodnikowa ze wzgledu na: szeroki wybór monomerów, szybka reakcje, niższy koszt w porównaniu z polimeryzacja kationowa i niewrażliwość na śladowe zanieczyszczenia [93]. Drugą najczęściej występującą jest fotoindukowana polimeryzacja kationowa. Powoduje ona mniejszy skurcz objętościowy i jest niewrażliwa na działanie tlenu, ale wpływa na nią wilgoć [93]. Polimeryzacja ta staje się przydatna, jeśli chodzi o utwardzanie grubych warstw, kolorowych lub wypełnionych układów polimerowych w celu całkowitego przekształcenia [93]. Fotopolimeryzacja anionowa, mniej popularna w zastosowaniach komercyjnych, odznacza się niską wrażliwością na tlen i wilgoć oraz możliwością kontrolowania struktury i funkcjonalnością polimeru [93]. Bardzo istotną kwestią jest też uwzględnienie głębokości utwardzania, która pozwala unikać zjawiska niedostatecznego utwardzenia Niedostateczne utwardzanie wpływa rozdzielczość [93.104]. na geometryczną, co skutkuje tym, że półutwardzone krople nadal się rozprzestrzeniają i prowadzi to do obwisłych krawędzi [93,105]. Prawidłowy, wydajny i stabilny proces utwardzania zależy od optymalnego dopasowania zakresu widma emitowanego przez lampę UV, irradiancji i czasu ekspozycji oraz właściwości optycznych i fizycznych materiału utwardzanego UV [93].

Materiał stosowany w technologii PolyJet jest mieszaniną fotoinicjatorów, monomerów, oligomerów i innych dodatków, takich jak pigmenty, stabilizatory, środki uplastyczniające i substancje zwiększające wydajność [93,102,104,106]. Przykładowe materiały do druku w technologii PJM (PolyJet Matrix) przedstawiono na rysunku 3.10.



Rys. 3.10. Przykładowe materiały stosowane w technologii PolyJet Matrix [W13,W14,W15]

Technologia PolyJet umożliwia wytwarzanie modeli o złożonych elementach, gdzie każdy element jest wykonany z innego materiału. Dzięki temu uzyskuje się "hybrydowe" właściwości mechaniczne. Pozwala to na łączenie materiałów, cech, tekstur i kolorów, aby wytworzyć model. PolyJet oferuje osiem odrębnych typów materiałów o unikalnych właściwościach [W15]. Cyfrowe tworzywo ABS charakteryzuje się lepszą odpornością na ciepło i lepszymi właściwościami mechanicznymi [W13,W15]. Materiały gumopodobne umożliwiają wydruk elementów, które wymagają elastyczności lub miękkich powłok [W13,W15].

Materiały cyfrowe to rodzaj materiału łączonego. Wielostrumieniowe drukarki 3D w technologii PJ umożliwiają druk nawet do sześciu żywic [W13,W15]. Mimo dużego wyboru materiały do druku 3D nadal wykazują ograniczone właściwości mechaniczne i termiczne ze względu na stosowanie polimerów o niskiej masie cząsteczkowej. Takie polimery są stosowane ze względu na niską lepkość [93,103]. Ponadto często stosowany w komercyjnych drukarkach 3D mechanizm utwardzania, jakim jest wyżej opisana polimeryzacja wolnorodnikowa, powoduje kilka problemów, takich jak [93,94]:

- wpływ tlenu na utwardzania warstwy powierzchni przyczynia się do tego, że staje się ona lepka,
- obszary międzywarstwowe są mniej utwardzone i zwiększają ryzyko migracji toksycznych fotoinicjatorów i monomerów,
- skurcz objętościowy zależy od procesu polimeryzacji ma wpływ na dokładność geometryczną.

Proces druku materiałami cyfrowymi stwarza problemy ze stabilnością modelu, szczególnie na stykach warstw dwóch różnych materiałów [94,102–104].

4. Reologia ciała stałego

Reologia jako odrębna dyscyplina naukowa powstawała w 1928 roku, kiedy to w Stanach Zjednoczonych w stanie Ohio powstało Amerykańskie Towarzystwo Reologiczne [B14,B15]. Warto dodać, że korzenie reologii sięgają znacznie wcześniej, ponieważ już w XVII wieku Isaac Newton opisał zachowanie płynów newtonowskich, a w XIX wieku James Clerk Maxwell opracował model opisujący lepko-sprężyste zachowanie materiałów. Jednym z ojców założycieli odrębnej dyscypliny naukowej reologii był profesor Markus Reiner, który pierwszą publikację o jej powstaniu opublikował w 1932 roku w czasopiśmie "Natural Sciences" [B15]. Nosiła ona nazwę: "Hydrodynamika układów dyspersyjnych (reologia)"[B15]. Inspiracją do powstania nazwy "reologia" było powiedzenie greckiego filozofa Heraklita: "pantha rei" (wszystko płynie) [B14,B15].

Wyraz "reologia" pochodzi od greckiego słowa " $\varrho \varepsilon \omega$ " oznaczającego przepływ [B14]. Stosowane w szerszym znaczeniu oznacza gałąź fizyki zajmującą się odkształceniem materiałów [B14,B15]. W badaniach reologicznych uwzględnia się ruchy jednych elementów względem drugich w tym samym ciele [B14,B15]. Podstawowymi pojęciami występującymi w reologii są: odkształcenie, naprężenie, szybkość ścinania i lepkość płynu [B14,B15,B16].

Materiały stosowane do druku 3D są polimerami, które wykazują cechy materiałów lepkosprężystych (w szczególności są to polimery amorficzne i pokrystaliczne). Naprężenie, szybkość ścinania i lepkość są złożonymi funkcjami czasu [B21]. Odpowiedź materiałów lepkosprężystych w stanie nieustalonym pod obciążeniem statycznym ma duże znaczenie [B21].

70

Daje mianowicie ważne właściwości masowe, takie jak: moduł, czas relaksacji, współczynnik lepkości dynamicznej [B14,B21]. Obciążenie dynamiczne daje właściwości dynamiczne, takie jak: moduł magazynowania, moduł strat, *tanδ* [B20]. Właściwości masowe pomagają zrozumieć interakcje molekularne. Techniki eksperymentalne do charakteryzowania materiałów lepkosprężystych to: statyczna relaksacja naprężeń, statyczne pełzanie materiału, dynamiczna relaksacja naprężeń i dynamiczne pełzanie materiału [B19,B20]. W rozprawie doktorskiej badano statyczną relaksację naprężeń i statyczne pełzanie materiału, a następnie dokładnie je opisano. Dynamiczna relaksacja naprężeń to dynamiczne obciążenia odkształceniem [B22]. W wyniku tego powstaje funkcja o charakterze dynamicznym, która opóźnia o pewien stopień odkształcenie [B22]. Dynamiczne pełzanie materiału przeprowadza się w warunkach dynamicznego przyłożenia naprężeń [B22].

4.1. Relaksacja naprężeń

Relaksacja naprężeń to spadek naprężenia w odpowiedzi na pewną ilość odkształceń powstałych w układzie [48,50,B22,B24]. Rysunek 4.1 przedstawia graficzną interpretację relaksacji naprężeń [B25,B24,B19].



Rys. 4.1. Graficzna interpretacja relaksacji naprężeń: σ – naprężenie, ε – odkształcenie, $\sigma(t)$ – krzywa relaksacji naprężeń, t – czas, ε_0 – odkształcenie jednostkowe początkowe [B25]

Badanie relaksacji naprężeń wykonuje się na próbce, która zostaje poddana skokowemu wprowadzeniu odkształcenia, a następnie rejestruje się zmianę naprężenia w czasie [48]. Skokowe wprowadzenie odkształcenia musi odbyć się z nieskończenie dużą prędkością, co w realnych warunkach jest nie do osiągnięcia [B21]. Czas trwania próby relaksacji jest dobierany w zależności od badanego materiału.

Analizując zjawisko relaksacji naprężeń, należy przedstawić odpowiedź układów: sprężystego, lepkiego, lepkosprężystego na skokowe wejście w odkształcenie [B21,B24].

W przypadku układu czysto sprężystego nie występuje w ogóle relaksacja naprężeń po zadaniu skoku odkształcenia [B21,B19,B16]. Stąd też krzywa $\sigma(t)$ nie zmienia się w wartości σ_2 – charakterystyka funkcji stałej (rysunek 4.2) [B21,B19,B25].


Rys. 4.2. "Krzywa relaksacji" dla ciała idealnie sprężystego: σ – naprężenie, σ_1 , σ_2 – naprężenia, t – czas, t_1 , t_2 , t_3 – czasy [B14, B19]

Zauważyć można, że charakterystyka funkcji $\sigma(t)$ pokazana na rysunku 4.2 przypomina funkcje Heviside'a, której postać wzoru (4.1) jest następująca [B21]:

$$H(t) = \begin{cases} 0 \text{ dla } t < 0\\ 1 \text{ dla } t \ge 0 \end{cases}$$
(4.1)

gdzie: t - czas.

Ciało idealnie sprężyste to model Hooke'a, który dokładniej zostanie opisany w rozdziale dotyczącym modeli reologicznych.

Odpowiedź ciała idealnie lepkiego po zadaniu odkształcenia następuje natychmiastowo i występuje całkowita relaksacja naprężeń [B21,B16]. Wykres $\sigma(t)$ przedstawiony na rysunku 4.3 obrazuje odpowiedź na odkształcenie w układzie idealnie lepkim [B21,B22,B18].



Rys. 4.3. "Krzywa" relaksacji dla ciała idealnie lepkiego: σ – naprężenie, σ_1 – naprężenie,

 $t - czas, t_1, t_2, t_3 - czasy [B21]$

W punkcie czasowym t_2 wykres wykazuje bardzo ostre maksimum przypominające pik w kształcie igły. Charakterystyka relaksacji "krzywej" przypomina funkcje Diraca, która opisana jest następującym wzorem (4.2) [B21]:

$$Dirac(t) = \begin{cases} 0 \text{ dla } t \neq 0\\ \infty \text{ dla } t = 0 \end{cases}$$
(4.2)

Ciało idealnie lepkie reprezentuje model Newtona, który dokładniej zostanie opisany w rozdziale dotyczącym modeli reologicznych.

Ciało idealnie lepkosprężyste po zadanym odkształceniu wykazuje opóźnioną relaksację naprężeń [B21,B18,B25]. Wykres funkcji $\sigma(t)$ na rysunku 4.4 przyjmuje kształt funkcji wykładniczej (e – funkcja) [B21,B25].



Rys. 4.4. Relaksacja naprężeń ciała lepkosprężystego σ – naprężenie, σ_1 – naprężenie, t – czas, t_1 , t_2 – czasy, $\sigma(t)$ – krzywa relaksacji, σ_{tn} – wartość naprężenia dla $t \rightarrow \infty$ [B22]

Krzywa relaksacji asymptotycznie zbliża się do wartości końcowej, którą można obliczyć ze wzoru (4.3) [B21]:

$$\sigma_{tn} = \lim_{t \to \infty} \sigma(t) \tag{4.3}$$

Wyznaczenie asymptoty funkcji $\sigma(t)$ dla ciała lepkosprężystego udowadnia, że ciało to nawet po bardzo długim czasie naprężenia ulega relaksacji tylko w pewnym zakresie.

Polimery wykazują odpowiedź na zadane odkształcenie w taki sam sposób, jak ciało lepkosprężyste [B20,B21,B25]. Materiały stosowane w druku 3D to polimery. Warto zauważyć, że materiał wejściowy różni się od materiału po procesie druku 3D właściwościami mechanicznymi ze względu na to że jest m.in. układany warstwa po warstwie. Materiały wytworzone przyrostowo wykazują właściwości ciała lepkosprężystego, co potwierdzają liczne badania w tym kierunku [38,41–43,61,63,107].

4.2. Pełzanie

Pełzanie to zjawisko powolnego odkształcania się materiału pod wpływem przyłożonego naprężenia [63,108,B15,B21,B22]. Rysunek 4.5 przedstawia graficzną interpretację zjawiska pełzania [B21,B23].



Rys. 4.5. Graficzna interpretacja pełzania σ – naprężenie, ε – odkształcenie, t – czas, $\varepsilon(t)$ – krzywa pełzania, σ_0 – naprężenie początkowe [B17]

W trakcie testów pełzania próbka poddawana jest skokowemu wprowadzeniu naprężenia w określonym czasie [B21,B22]. Skokowe naprężenie musi odbywać z nieskończenie dużą prędkością, która w praktyce jest nie do osiągnięcia [B21]. Czas trwania próby pełzania jest dobierany w zależności od rodzaju materiału. Odpowiedź różnych materiałów pod wpływem przyłożonych naprężeń różni się w zależności od ich zachowań reologicznych. Analizując pełzanie, należy przedstawić, tak jak w przypadku relaksacji naprężeń, odpowiedzi ciał: sprężystego, lepkiego i lepkosprężystego [B21,B24].

Odpowiedź ciała idealnie sprężystego przedstawiono na rysunku 4.6 [B21,B22,B25]. Przy zadaniu stałego odkształcenia dla ciała idealnie sprężystego następuje natychmiastowe schodkowe odkształcenie [B15,B21,B22].



Rys. 4.6. Odpowiedź ciała sprężystego na zadane naprężenie: ε – odkształcenie, ε_0 – odkształcenie jednostkowe początkowe, t – czas, t_0 , t_2 , t_3 – czasy [B22]

Dla tego rodzaju ciała zjawisko pełzania nie zachodzi [B21]. W etapie odzyskiwania pełzania cała energia odkształcenia, która została wcześniej przechowana przez zdeformowany materiał podczas fazy pełzania, może być teraz odzyskana i wykorzystana w procesie reformacji [B14,B21,B22,B25].

Ciało lepkie, dopóki jest obciążone stałym naprężeniem, wykazuje stałe odkształcenie [B14,B21,B22,B25]. Odpowiedź ciała lepkiego przedstawiono na rysunku 4.7 [B21,B22,B25].



Rys. 4.7. Odpowiedź ciała lepkiego na zadane naprężenie : ε – odkształcenie, ε_t – krzywa pełzania, t – czas, t_0, t_2, t_3 – czasy [B22]

Po usunięciu obciążenia nie występuje żadna reformacja, ponieważ tego rodzaju ciała nie posiadają części sprężystej [B21,B24,B25]. Idealnie lepkie materiały nie są w stanie zmagazynować żadnej energii odkształcenia i dlatego po zwolnieniu obciążenia pozostają odkształcone w tym samym stopniu, w jakim były pod koniec obciążenia [B15,B21].

Materiały lepkosprężyste poddane stałemu naprężeniu ulegają odkształceniu [B21,B24,B25]. Proces ten można podzielić na dwie fazy. Rysunek 4.8 przedstawia odpowiedź ciała lepkosprężystego na zadane odkształcenie [B21,B22,B25].



Rys. 4.8. Odpowiedź ciała lepkosprężystego na zadane naprężenie : ε – odkształcenie, ε_0 – odkształcenie jednostkowe początkowe, t – czas, t_0, t_2, t_3 – czasy, ε_{tn} – wartość odkształcenia dla $t \rightarrow \infty$ [B21]

W pierwszej części odkształcenie następuje natychmiast, a w drugiej z opóźnieniem [B21,B25]. Po usunięciu naprężenia w ciele lepkosprężystym następuje opóźnione przeformowanie całkowite lub częściowe [B21,B24,B25]. Stopień przeformowania zależy od części sprężystej ciała lepkosprężystego [B22,B24,B25]. W tym przypadku krzywa pełzania również zbliża się do asymptoty, którą można wyznaczyć według wzoru (4.4) [B21]:

$$\varepsilon_{tn} = \lim_{t \to \infty} \varepsilon(t) \tag{4.4}$$

Zjawisko pełzania, podobnie jak zjawisko relaksacji naprężeń, występuje w materiałach wytwarzanych przyrostowo ze względu na to, że są to ciała lepkosprężyste [41,45,60,61].

4.3. Modele reologiczne

Właściwości reologiczne mogą być opisane przez wieloparametrowe modele ciał idealnych złożone z odpowiednio połączonych modeli podstawowych [42,43]. W mechanice wyróżnia się modele jednoparametrowe, wieloparametrowe złożone z jednoparametrowych i wieloparametrowe budowane z zastosowaniem szeregów Prony'ego [41,109]. Do jednoparametrowych modeli zaliczamy: model Hooke'a (ciało idealnie sprężyste), model Newtona (ciało idealnie lepkie) i suwak (ciało idealnie plastyczne) [B21,B22]. Wieloparametrowe modele reologiczne to: model Maxwella, model Kelvina, model standardowy I, model Zenera, model standardowy II, model Maxwella-Wiecherta, model Kelvina-Voighta, model Bürgersa i model Binghama [B21,B22].

Modele reologiczne opisują zachowanie się, z pewnym przybliżeniem, materiału w warunkach odkształceń plastycznych [37,110]. Odpowiedzi materiałów na zjawiska relaksacji naprężeń i pełzania można odwzorować, stosując modele reologiczne. Główną zaletą modeli reologicznych jest to, że ułatwiają napisanie wyrażenia matematycznego zgodnego z podstawowymi zasadami termodynamiki przy próbie modelowania intuicyjnej wizji zachowania materiału uzyskanej z obserwacji doświadczalnych [59,107]. Do opisu ciał lepkosprężystych stosuje się modele reologiczne o złożonej budowie, tzn. składające się z odpowiedniego połączenia modeli Hooke'a i Newtona [49,50,60,61].

Model Hooke'a to liniowe zachowanie sprężyste – sprężyna [B21,B22,B25]. Analogię mechaniczną ciała idealnie sprężystego przedstawiono na rysunku 4.9 [B21].



Rys. 4.9. Analogia mechaniczna – model Hooke'a : E – moduł sprężystości, ϵ – odkształcenie, σ – naprężenie [B21]

Równanie konstytutywne (4.9) opisujące model ciała Hooke'a sprowadza się do [B21]:

$$\sigma = E\varepsilon \tag{4.9}$$

gdzie: E – moduł sprężystości, ε – odkształcenie, σ – naprężenie.

Odpowiedz modelu Hooke'a na zjawiska relaksacji naprężeń i pełzania przedstawiono na rysunkach odpowiednio 4.2 i 4.6. W przypadku obciążenia modelu Hooke'a stałym naprężeniem, co odpowiada procesowi pełzania otrzymano [B21]:

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t) \tag{4.10}$$

gdzie: σ_0 – naprężenie początkowe (zadane), H(t) – funkcja Heviside'a. Zachowanie ciała idealnie sprężystego w warunkach pełzania charakteryzuje równanie (4.11), które powstało po podstawieniu wzoru (4.10) do (4.9) [B21,B22,B25]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} H(t) \tag{4.11}$$

gdzie: σ_0 – naprężenie początkowe, H(t) – funkcja Heviside'a, E – moduł sprężystości, σ – naprężenie, ε – odkształcenie.

W przypadku zadania modelowi Hooke'a stałego odkształcenia, które opisuje wzór (4.12) [B21]:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t) \tag{4.12}$$

gdzie: ε_0 – odkształcenie jednostkowe początkowe, H(t) – funkcja Heviside'a.

Podobnie jak w procesie relaksacji naprężeń otrzymano równanie (4.13) opisujące zachowanie ciała idealnie sprężystego w procesie relaksacji naprężeń [B21,B22]:

$$\varepsilon(t) = E\varepsilon_0 H(t) \tag{4.13}$$

Dla modelu Hooke'a nie zachodzi pełzanie i relaksacja naprężeń [B21].

Model Newtona to liniowe zachowanie lepkie – amortyzator/tłumik [B21,B22,B25]. Analogie mechaniczną przedstawiono na rysunku 4.10 [B21].



Rys. 4.10. Analogia mechaniczna modelu Newtona: η – współczynnik lepkości dynamicznej, ϵ – odkształcenie, σ – naprężenie [B21]

Model ciała lepkiego opisany jest równaniem konstytutywnym o postaci (4.14) [B21]:

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon} \tag{4.14}$$

gdzie: η – współczynnik lepkości dynamicznej, ma wymiar iloczynu czasu i naprężenia ε – odkształcenie, σ – naprężenie.

W przypadku obciążenia skokowo naprężeniem tj. $\sigma(t) = \sigma_0 H(t)$, po podstawieniu do równania (4.14) oraz przekształceniu otrzymano wzór (4.15) [B21,B22]:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\sigma_0}{\eta} H(t) \tag{4.15}$$

co po scałkowaniu daje:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\eta} t \tag{4.16}$$

gdzie: ε – odkształcenie, σ_0 – naprężenie początkowe, , H(t) – funkcja Heviside'a, η – współczynnik lepkości dynamicznej.

W równaniu (4.16) pominięto stałe całkowania, przyjmujące warunki początkowe $\varepsilon(0) = 0$.

Odpowiedz ciała lepkiego na pełzanie przedstawiono na rysunku 4.7. Pełzanie nie zachodzi dla tego ciała [B21,B22].

W przypadku odpowiedzi ciała lepkiego na zjawiska relaksacji naprężeń otrzymano [B21]:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t) \tag{4.17}$$

ponieważ

$$H(t)' = \delta(t) \tag{4.18}$$

po zróżniczkowaniu (4.17) uzyskano:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \varepsilon_0 \delta(t) \tag{4.19}$$

gdzie: $\delta(t)$ – funkcja Diraca.

Po podstawieniu równania (4.14) do (4.19) i przekształceniu otrzymano:

$$\sigma = \eta \varepsilon_0 \delta(t) \tag{4.20}$$

gdzie: ε – odkształcenie, ε_0 – odkształcenie początkowe, η – współczynnik lepkości dynamicznej, $\delta(t)$ – funkcja Diraca.

Odpowiedź ciała lepkiego na relaksacje naprężeń przedstawiono na rysunku 4.3. Ciało Newtona nie wykazuje relaksacji naprężeń [B21].

Korzystając z jednoparametrowych modeli ciała sprężystego i ciała lepkiego można budować wieloparametrowe modele [B21]. Model Zener'a w wariancie A i B to odpowiednio połączone wyżej wymienione modele mechaniczne [55,B21,B22,B25]. W literaturze często model Zener'a nazywany jest modelem standardowym I (wariant A) i modelem standardowym II (wariant B) [55,B21,B22,B25].

Model standardowy I (Zener wariant A) czyli trójparametrowy model Kelvina-Voighta jest połączeniem dwóch sprężyn i tłumika [B14,B21,B22]. Analogie mechaniczną modelu Zenera w wariancie A przedstawiona na rysunku 4.11 [B21,B25].



Rys. 4.11. Analogia mechaniczna modelu standardowego I: E_0, E_1 – moduły sprężystości, η_1 – współczynnik lepkości dynamicznej, ε – odkształcenie, σ – naprężenie [B21]

Model standardowy I to połączenie szeregowe modelu Kelvina-Voighta i Hooke'a w którym występują trzy parametry: E_0, E_1, η_1 . Moduły sprężystości oznaczono jako: E_0, E_1 , natomiast współczynnik lepkości dynamicznej jako η_1 . Współczynnik η_1 opisać można wzorem (4.21) [B21,B22,B25]:

$$\eta_1 = t_1 E_1 \tag{4.21}$$

gdzie t_1 – czas opóźnienia sprężystego (czas retardacji).

Równanie opisujące model standardowy I w układzie naprężenieodkształcenie jednostkowe zapisano w postaci [B21,B22]:

$$\sigma(t) + \frac{\eta}{E_1 + E_2} \sigma(t) = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \varepsilon(t) + \frac{\eta E_1}{E_1 + E_2} \dot{\varepsilon}(t)$$
(4.22)

Odpowiedz tego modelu na relaksacje naprężeń:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t) \,\mathrm{i}\,\dot{\varepsilon}(t) = \varepsilon_0 \delta(t) \tag{4.23}$$

Po wstawieniu (4.23) do równania (4.22) i przekształceniach otrzymano [B21,B22]:

$$\sigma(t) + \frac{\eta}{E_1 + E_2} \dot{\sigma}(t) = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \varepsilon_0 H(t) + \frac{\eta E_1}{E_1 + E_2} \varepsilon_0 \delta(t)$$
(4.24)

po scałkowaniu z warunkiem początkowym $\sigma(0) = E_0 \varepsilon_0$ uzyskano rozwiązanie równania (4.24) [B21,B22]:

$$\sigma(t) = E_2 \varepsilon_0 \left[\frac{E_1}{E_1 + E_2} + \frac{E_2}{E_1 + E_2} e^{\frac{-(E_1 + E_2)}{\eta_1} t} \right]$$
(4.25)

Odpowiedz modelu standardowego I na pełzanie:

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t) \,\mathrm{i}\,\dot{\sigma}(t) = \sigma_0 \delta(t) \tag{4.26}$$

Po wstawieniu (4.26) do równania (4.22) otrzymano [B21,B22]:

$$\dot{\varepsilon}(t) + \frac{E_1}{\eta_1} \varepsilon(t) = \frac{E_1 + E_2}{\eta_1 E_2} \sigma_0 H(t)$$
(4.27)

jest to równanie różniczkowe pierwszego rzędu typu: y'(t) + ay(t) = bi jego rozwiązaniem jest funkcja [B21,B22]:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_1} \left(1 - e^{\frac{-t}{t_1}} \right) \right]$$
(4.28)

Model standardowy II (Zenera wariant B) znany jako trójparametrowy model Maxwella zbudowany z dwóch sprężyn i tłumika [B14,B21,B22]. Analogie mechaniczną przedstawiono na rysunku 4.12 [B21].



Rys. 4.12. Analogia mechaniczna ciała standardowego II: E_0, E_1 – moduły sprężystości, η_1 – współczynnik lepkości dynamicznej, ε – odkształcenie, σ – naprężenie [B21]

Model Zenera w wariancie B jest to połączenie równoległe modelu Maxwella i Hooke'a w którym występują 3 parametry: E_0, E_1, η_1 .

W układzie naprężenie – odkształcenie jednostkowe równanie opisujące model jest następujące [B21,B22,B25]:

$$\sigma(t) + \frac{\eta_1}{E_1}\dot{\sigma}(t) = E_2\varepsilon(t) + \eta_1\left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right)\dot{\varepsilon}(t)$$
(4.29)

Poddając model standardowy II zjawisku pełzania $\sigma(t) = \sigma_0 H(t)$. W związku z tym, że $\dot{\sigma}(t) = 0$, równanie (4.29) po przekształceniach jest następujące [B21,B22]:

$$\dot{\varepsilon}(t) + \frac{E_1 E_2}{\eta_1(E_1 + E_2)} \varepsilon(t) = \frac{E_1}{\eta_1(E_1 + E_2)} \sigma_0 H(t)$$
(4.30)

Rozwiązaniem równania (4.30) jest funkcja [B21,B22]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{(E_1 + E_2)} \left[\frac{E_1 + E_2}{E_2} - \frac{E_1}{E_2} e^{\frac{-t}{t_1}} \right] H(t)$$
(4.31)

gdzie:

$$t_1 = \frac{\eta_1}{E_1} \tag{4.32}$$

Model standardowy II jest zdolny do relaksacji i zakłada że odkształcenie skokowo rośnie do pewnej wartości i jest stałe $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t)$, co oznacza, że $\dot{\varepsilon}(t) = 0$ W tym czasie naprężenie zmniejsza się o pewną wartość. W tym przypadku równanie (4.28) przyjmuje postać [B21,B22] :

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left(E_2 + E_1 e^{\frac{-t}{t_1}} \right) \tag{4.33}$$

Modele Zenera są najprostszymi modelami mechanicznymi zdolnymi do pełzania jak i relaksacji naprężeń. Dzięki swojej prostocie modele Zenera mogą być stosowane do analizy polimerów, pojedynczych komórek, naczyń krwionośnych, mięśni serca, chrząstek, krążków międzykręgowych, hydrożeli i różnych biomateriałów [B14, B21,B22,B25].

Wieloparametrowe modele reologiczne idealnie nadają się do opisu materiałów rzeczywistych. Współczesne techniki informatyczne pozwalają na opracowanie coraz bardziej złożonych modeli reologicznych. Bardziej złożone modele pozwalają na uzyskanie większej ilości informacji o zachowaniu się materiału. Do złożonych modeli reologicznych należą model Maxwella-Wiecherta i model Kelvina-Voighta [B14,B20,B21,B22,B25]. Te dwa modele posłużyły w niniejszej pracy doktorskiej do opisu krzywych relaksacji naprężeń i pełzania. Dokładny opis procedury konstruowania stanu złożonych równań modeli ciał idealnych opisano pracy [B21]. W przypadku modeli złożonych najlepiej wyodrębnić proste połączenia: równoległe i szeregowe. Ogólny przykład dwóch typów polaczeń przedstawiono na rysunku 4.13.



Rys. 4.13. Schemat połączeń występujących w modelach złożonych

Wykorzystując równają równowagi i nie rozdzielczości odkształceń, można sformułować ogólne wyrażenia dla połączeń równoległych jak i szeregowych modeli reologicznych. W celu wyprowadzenia równania opisującego model wieloparametrowy należy skorzystać ze związków między naprężeniem, a odkształceniem, zapisanych w postaci operatorów różniczkowych [B21]:

$$\Pi_{\sigma}\sigma(t) = \Gamma_{\varepsilon}\varepsilon(t) \tag{4.34}$$

gdzie: Π_{σ} , Γ_{ε} – operatory różniczkowe.

Przy przekształceniach algebraicznych operatory różniczkowe traktuje się tak jak wielkości algebraiczne.

W przypadku połączenia szeregowego można zapisać równania opisujące relacje miedzy modelami A i B dla układu naprężenie – odkształcenie jednostkowe w następujący sposób [B21]:

$$\sigma = \sigma_A = \sigma_B \tag{4.35}$$
$$\varepsilon = \varepsilon_A + \varepsilon_B$$

Relacje między modelami A i B dla układu naprężenie – odkształcenie jednostkowe w połączeniu równoległym można zapisać:

$$\sigma = \sigma_A + \sigma_B \tag{4.36}$$
$$\varepsilon = \varepsilon_A = \varepsilon_B$$

W przypadku modeli złożonych najlepiej wyodrębnić proste połączenia, tak aby w końcowej fazie rozpatrywać połączenie równoległe lub szeregowe. Postać ogólną równania stanu opisującą wieloparametrowy model ciała idealnego dla układu naprężenie – odkształcenie jest następująca:

$$a_0^{\sigma}\sigma(t) + a_1^{\sigma}\frac{d\sigma}{dt} + a_2^{\sigma}\frac{d^2\sigma}{dt^2} + \dots + a_n^{\sigma}\frac{d^n\sigma}{dt^n} = b_0^{\varepsilon}\varepsilon(t) + b_1^{\varepsilon}\frac{d\sigma}{dt} + b_1^{\varepsilon}\frac{d^2\sigma}{dt^2} + \dots + b_n^{\varepsilon}\frac{d^n\sigma}{dt^n} \quad (4.37)$$

4.4. Model Maxwella-Wiecherta

Model Maxwella-Wiecherta to równoległe połączenie modeli Maxwella poszerzonych o pojedynczy model Hooke'a [39,43,63,B21,B22,B23,B25]. Analogię mechaniczną ogólnego modelu Maxwella-Wiecherta i Maxwella przedstawiono na rysunku 4.14 [B21,B22].



Rys. 4.14. Analogie mechaniczne ogólnych modeli: a) Maxwella, b) Maxwella-Wiecherta

Równanie różniczkowe opisujące ogólny model Maxwella można zapisać w następujący sposób [61,B21,B22]:

$$\sigma + a_1 \dot{\sigma} + \sigma_2 \ddot{\sigma} + \dots + a_n \overset{n}{\sigma} = b_1 \varepsilon + b_2 \dot{\varepsilon} + \dots + b_n \overset{n}{\varepsilon}$$
(4.38)

Postać równania (4.38) można zapisać w uogólnionej formie i będzie dotyczyło wszystkich modeli wieloparametrowych składających się z elementów sprężyn, tłumików, ciał Kelvina oraz Maxwella łączonych tak, aby tworzyły szereg podobny do ogólnego modelu Maxwella. Równanie przyjmuje wtedy postać [61,B21,B22]:

$$\sum_{k=0}^{n} a_k \frac{d^k \sigma}{dt^k} = \sum_{k=0}^{m} b_k \frac{d^k \varepsilon}{dt^k}$$
(4.39)

gdzie: m = n i $b_k = 0$ dla ogólnego modelu Maxwella.

Model Maxwella wykorzystuje się do opisu relaksacji naprężeń $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t)$, zwłaszcza polimerów. Rozwiązanie równania (4.39) jest następujące [B21]:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \sum_{k=1}^n E_k e^{\frac{-t}{t_k}}$$
(4.40)

gdzie: k = 1, 2, ..., n.

Równanie (4.40) jest szeregiem Prony'ego z uwagi na rodzaj funkcji, natomiast czasy t_k to parametry szeregu [B21].

Ogólne równanie opisujące relaksację naprężeń $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t)$ przy pomocy modelu Maxwella-Wiecherta po przekształceniu równania (4.39) przyjmuje postać [B21]:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left(\sum_{k=1}^n E_k e^{\frac{-t}{t_k}} + E_0 \right)$$
(4.41)

W pracy doktorskiej zastosowano model Maxwella-Wiecherta o pięciu parametrach.

Aktualnie jest to wystarczający model do opisu krzywych relaksacji materiałów wytwarzanych przyrostowo, co potwierdzają badania przedstawione w niniejszej pracy, jak również w innych publikacjach.

Pięcioparametrowy model Maxwella-Wiecherta przedstawiono na rysunku 4.15 [B21,B22,B23].



Rys. 4.15. Analogia mechaniczna pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta

Równania równowagi i równania kinetyczne dla modelu pięcioparametrowego są następujące:

$$\sigma = \sigma_1 + (\sigma_2 = \sigma_3) + (\sigma_4 = \sigma_5)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) = (\varepsilon_4 + \varepsilon_5)$$
(4.42)

Na podstawie równania ogólnego (4.39) można zapisać równanie różniczkowe modelu pięcioparametrowego Maxwella-Wiecherta [61,B21,B22]:

$$\alpha_2 \ddot{\sigma} + a_1 \dot{\sigma} + a_0 \sigma = b_2 \ddot{\varepsilon} + b_1 \dot{\varepsilon} + b_0 \varepsilon \tag{4.43}$$

W celu rozwiązania równania różniczkowego (4.43) przyjęto warunki początkowe $\sigma(0) = \varepsilon_0 E_0$ i $\dot{\sigma}(0) = 0$.

Współczynniki równania (4.43) są więc następujące [61,B21]:

$$\begin{array}{ccc} a_0 = E_1 E_2 & b_0 = E_0 E_1 E_2 \\ a_1 = E_1 \eta_2 + E_2 \eta_1 & b_1 = E_1 E_2 (\eta_1 + \eta_2) \\ a_2 = \eta_1 \eta_2 & b_0 = \eta_1 \eta_2 (E_1 + E_2) \end{array}$$
(4.44)

Poddając model Maxwella-Wiecherta relaksacji naprężeń $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t)$, otrzymano przekształcone równanie (4.43) do postaci [61,B21]:

$$\alpha_2 \ddot{\sigma} + a_1 \dot{\sigma} + a_0 \sigma = \varepsilon_0 b_2 \dot{\delta} + \varepsilon_0 b_1 \delta + \varepsilon_0 b_0 H(t)$$
(4.45)

Równanie (4.45) rozwiązano stosując odwrotną transformatę Laplace'a, co daje [61,B21]:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left(E_0 + E_1 e^{\frac{-t}{t_1}} + E_2 e^{\frac{-t}{t_2}} \right)$$
(4.46)

gdzie: t_1, t_2 – czasy opóźnienia sprężystego dla poszczególnych modeli:

$$t_1 = \frac{\eta_1}{E_1} i \ t_2 = \frac{\eta_2}{E_2} \tag{4.47}$$

Inny zapis równania (4.45) po przekształceniach jest następujący [B21]:

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 e^{\frac{-t}{t_1}} + \sigma_2 e^{\frac{-t}{t_2}}$$
(4.48)

Równanie (4.46) przekształcono w taki sposób aby uwzględniał wszystkie parametry modelu Maxwella-Wiecherta:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E_0 + \varepsilon_0 E_1 e^{\frac{-E_1 t}{\eta_1}} + \varepsilon_0 E_2 e^{\frac{-E_2 t}{\eta_2}}$$
(4.49)

Na podstawie równań (4.46)–(4.49) skonstruowano prosty układ równań z którego obliczono wartości modułów sprężystości E_0, E_1, E_2 i współczynników lepkości dynamicznej η_1, η_2 [B21]:

$$\overline{\sigma}_{0} = \varepsilon_{0} E_{0} \rightarrow E_{0} = \frac{\overline{\sigma}_{0}}{\varepsilon_{0}}$$

$$\overline{\sigma}_{1} = \varepsilon_{0} E_{1} \rightarrow E_{1} = \frac{\overline{\sigma}_{1}}{\varepsilon_{0}}$$

$$\overline{\sigma}_{2} = \varepsilon_{0} E_{2} \rightarrow E_{2} = \frac{\overline{\sigma}_{2}}{\varepsilon_{0}}$$

$$\overline{t}_{1} = \frac{\eta_{1}}{E_{1}} \rightarrow \eta_{1} = E_{1} \overline{t}_{1}$$

$$\overline{t}_{2} = \frac{\eta_{2}}{E_{2}} \rightarrow \eta_{2} = E_{2} \overline{t}_{2}$$

$$(4.50)$$

Dla czasu t = 0 równanie (4.46) przyjmuje postać [61,B21]:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 (E_0 + E_2 + E_2)$$
(4.51)

Przyjmując moduł zastępczy sprężystości E_s o równaniu:

$$E_s = E_0 + E_1 + E_2 \tag{4.52}$$

naprężenie dla czasu t = 0 wynosi:

$$\sigma(t_0) = \varepsilon_0 E_s \tag{4.53}$$

Granica funkcji $\sigma(t)$, gdzie $t \to \infty$, może być wyrażona w następujący sposób:

$$\sigma(\infty) = \sigma_{tn} = \varepsilon_o E_0 = \lim_{t \to \infty} \sigma(t) \tag{4.54}$$

Przekształcając ogólne równanie (4.41) modelu Maxwella-Wiecherta, opracowano siedmioparametrowy model, którego analogię mechaniczną przedstawiono na rysunku 4.16.



Rys. 4.16. Analogia mechaniczna siedmioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta

Siedmioparametrowy model Maxwella-Wiecherta to model składający się z pojedynczego modelu Hooke'a i trzech modeli Maxwella połączonych równolegle.

Równania równowagi i równania kinetyczne dla modelu siedmioparametrowego są następujące:

$$\sigma = \sigma_1 + (\sigma_2 = \sigma_3) + (\sigma_4 = \sigma_5) + (\sigma_6 = \sigma_7)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) = (\varepsilon_4 + \varepsilon_5) = (\varepsilon_6 + \varepsilon_7)$$
(4.55)

Przekształcając równanie (4.41) uzyskano wzór dla siedmioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left(E_0 + E_1 e^{\frac{-t}{t_1}} + E_2 e^{\frac{-t}{t_2}} + E_3 e^{\frac{-t}{t_3}} \right)$$
(4.56)

gdzie: t_1, t_2, t_3 – czasy opóźnienia sprężystego dla poszczególnych modeli:

$$t_1 = \frac{\eta_1}{E_1}, t_2 = \frac{\eta_2}{E_2}, t_3 = \frac{\eta_3}{E_3}$$
(4.57)

Równanie (4.56) przekształcono w taki sposób aby uwzględniał wszystkie parametry modelu Maxwella-Wiecherta:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E_0 + \varepsilon_0 E_1 e^{\frac{-E_1 t}{\eta_1}} + \varepsilon_0 E_2 e^{\frac{-E_2 t}{\eta_2}} + \varepsilon_0 E_3 e^{\frac{-E_3 t}{\eta_3}}$$
(4.58)

Wzór (4.56) może przyjmować również postać:

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 e^{\frac{-t}{t_1}} + \sigma_2 e^{\frac{-t}{t_2}} + \sigma_3 e^{\frac{-t}{t_3}}$$
(4.59)

Moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej jak w przypadku modelu pięcioparametrowego obliczono na podstawie równania (4.56)–(4.59) budując prosty układ równań:

$$\overline{\sigma}_{0} = \varepsilon_{0} E_{0} \rightarrow E_{0} = \frac{\overline{\sigma}_{0}}{\varepsilon_{0}}$$

$$\overline{\sigma}_{1} = \varepsilon_{0} E_{1} \rightarrow E_{1} = \frac{\overline{\sigma}_{1}}{\varepsilon_{0}}$$

$$\overline{\sigma}_{2} = \varepsilon_{0} E_{2} \rightarrow E_{2} = \frac{\overline{\sigma}_{2}}{\varepsilon_{0}}$$

$$\overline{\sigma}_{3} = \varepsilon_{0} E_{3} \rightarrow E_{3} = \frac{\overline{\sigma}_{3}}{\varepsilon_{0}}$$

$$\overline{t}_{1} = \frac{\eta_{1}}{E_{1}} \rightarrow \eta_{1} = E_{1} \overline{t}_{1}$$

$$\overline{t}_{2} = \frac{\eta_{2}}{E_{2}} \rightarrow \eta_{2} = E_{2} \overline{t}_{2}$$

$$\overline{t}_{3} = \frac{\eta_{3}}{E_{3}} \rightarrow \eta_{3} = E_{3} \overline{t}_{3}$$

$$(4.60)$$

Moduł zastępczy sprężystości dla siedmioparametrowego modelu przyjmuje postać:

$$E_s = E_0 + E_1 + E_2 + E_3 \tag{4.61}$$

Naprężenie dla czasu t = 0, można obliczyć według wzoru:

$$\sigma(t_0) = \sigma_{t0} = \varepsilon_0 E_s \tag{4.62}$$

Granica funkcji $\sigma(t)$ dla siedmioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta, gdzie $t \to \infty$, może być wyrażona:

$$\sigma_{tn} = \varepsilon_0 E_0 = \lim_{t \to \infty} \sigma(t) \tag{4.63}$$

Opracowywanie modeli Maxwella-Wiecherta z coraz większą liczbą parametrów polega na przekształceniu równania ogólnego Maxwella-Wicherta (4.41). Aktualnie nie jest konieczne stosowanie modelu Maxwella-Wiecherta o większej ilości parametrów niż pięć, co pokazują badania zawarte w niniejszej rozprawie doktorskiej.

4.5.Model Kelvina-Voighta

Model Kelvina-Voighta to odpowiednie połączenie tłumików i sprężyn [B21,B22,B23]. Analogię mechaniczną ogólnego modelu Kelvina i Kelvina-Voighta przedstawia rysunek 4.17 [B21,B22].



Rys. 4.17. Analogia mechaniczna ogólnych modeli: a) Kelvina, b) Kelvina-Voighta

Równanie różniczkowe opisujące ogólny model Kelvina-Voighta jest takie samo jak równanie opisujące ogólny model Maxwella, zatem [61,B21]:

$$\sigma + a_1 \dot{\sigma} + \sigma_2 \ddot{\sigma} + \dots + a_n \overset{n}{\sigma} = b_1 \varepsilon + b_2 \dot{\varepsilon} + \dots + b_n \overset{n}{\varepsilon}$$
(4.64)

przekształcając do ogólnego równania [61,B21]:

$$\sum_{k=0}^{n} a_k \frac{d^k \sigma}{dt^k} = \sum_{k=0}^{m} b_k \frac{d^k \varepsilon}{dt^k}$$
(4.65)

gdzie: n = m - 1 i $a_0 = 1$ dla ogólnego modelu Kelvina.

Model Kelvina wykorzystuje się do opisu pełzania $\sigma(t) = \sigma_0 H(t)$ polimerów. Rozwiązanie równania (4.65) jest następujące [61,B21]:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{E_i} \left(1 - e^{\frac{-t}{t_i}} \right) \right)$$
(4.66)

gdzie: k = 1, 2, ..., n.

Ogólne równanie opisujące pełzanie $\sigma(t) = \sigma_0 H(t)$ za pomocą modelu Kelvina-Voighta po przekształceniu równania (4.65) przyjmuje postać [B21]:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_0} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{E_i} \left(1 - e^{\frac{-t}{t_i}} \right) \right) \tag{4.67}$$

Równania (4.66) i (4.67) nazywa się szeregiem Prony'ego z uwagi na rodzaj funkcji [B21].

W pracy doktorskiej zastosowano pięcioparametrowy model Kelvina-Voighta, który aktualnie jest wystarczający do opisu krzywych pełzania materiałów wytwarzanych przyrostowo, co potwierdzają badania zawarte w pracy, jak również w innych publikacjach.

Pięcioparametrowy model Kelvina-Voighta przedstawiono na rysunku 4.18 [61,B21,B22].



Rys. 4.18. Analogia mechaniczna pięcioparametrowego modelu Kelvina-Voighta

Równania równowagi i równania kinematyczne dla modelu pięcioparametrowego Kelvina-Voighta są następujące:

$$\sigma = \sigma_1 = (\sigma_2 + \sigma_3) = (\sigma_4 + \sigma_5)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 = \varepsilon_3) + (\varepsilon_4 = \varepsilon_5)$$
(4.68)

Na podstawie równania (4.64) można zapisać równanie różniczkowe modelu pięcioparametrowego modelu Kelvina-Voighta [61,B21]:

$$b_2 \ddot{\varepsilon} + b_1 \dot{\varepsilon} + b_0 \varepsilon = \sigma_2 \ddot{\sigma} + \dot{\sigma} a_1 + a_0 \sigma \tag{4.69}$$

W celu rozwiązania równania różniczkowego (4.69) przyjęto warunki początkowe $\varepsilon(0) = 0$ i $\dot{\varepsilon}(0) = 0$.

Współczynniki równania (4.69) są następujące [61]:

$$\begin{array}{ccc} a_0 = E_0 E_1 + E_0 E_2 + E_1 E_2 & b_0 = E_0 E_1 E_2 \\ a_1 = E_1 \eta_2 + E_2 \eta_1 + E_0 \eta_2 + E_0 \eta_1 & b_1 = E_0 (E_1 \eta_2 + E_2 \eta_1) \\ a_2 = \eta_1 \eta_2 & b_0 = E_0 \eta_1 \eta_2 \end{array}$$
(4.70)

Poddając model Kelvina-Voighta pełzaniu $\sigma(t) = \sigma_0 H(t)$, równanie (4.69) przyjmuje postać [61,B1]:

$$b_2\ddot{\varepsilon} + b_1\dot{\varepsilon} + b_0\varepsilon = a_2\sigma_0\dot{\delta} + a_1\sigma_0\delta + a_0\sigma_0H(t)$$
(4.71)

Równanie (4.71) rozwiązano za pomocą odwrotnej transformaty Laplace'a, co daje:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} \left(1 - e^{\frac{-t}{t_1}} \right) + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{\frac{-t}{t_2}} \right) \right)$$
(4.72)

gdzie: t_1 , t_2 – czasy retardacji:

$$t_1 = \frac{\eta_1}{E_1} i \ t_2 = \frac{\eta_2}{E_2} \tag{4.73}$$

Równanie (4.72) przekształcono w taki sposób aby uwzględniał wszystkie parametry modelu Kelvina-Voighta:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} \left(1 - e^{\frac{-E_1 t}{\eta_1}} \right) + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{\frac{-E_2 t}{\eta_2}} \right) \right)$$
(4.74)

Inny zapis równania (4.72) jest następujący [B21]:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \left(1 - e^{\frac{-t}{t_1}} \right) + \varepsilon_2 \left(1 - e^{\frac{-t}{t_2}} \right)$$
(4.75)

Na podstawie równań (4.72)–(4.75) zbudowano prosty układ równań, na podstawie którego obliczono wartości modułów sprężystości E_0, E_1, E_2 i współczynników lepkości dynamicznej η_1, η_2 [B21]:

$$\overline{\varepsilon}_{0} = \frac{\sigma_{0}}{E_{0}} \rightarrow E_{0} = \frac{\sigma_{0}}{\overline{\varepsilon}_{0}}$$

$$\overline{\varepsilon}_{1} = \frac{\sigma_{0}}{E_{1}} \rightarrow E_{1} = \frac{\sigma_{0}}{\overline{\varepsilon}_{1}}$$

$$\overline{\varepsilon}_{2} = \frac{\sigma_{0}}{E_{2}} \rightarrow E_{2} = \frac{\sigma_{0}}{\overline{\varepsilon}_{2}}$$

$$\overline{t}_{1} = \frac{\eta_{1}}{E_{1}} \rightarrow \eta_{1} = E_{1}\overline{t}_{1}$$

$$\overline{t}_{2} = \frac{\eta_{2}}{E_{2}} \rightarrow \eta_{2} = E_{2}\overline{t}_{2}$$

$$(4.76)$$

Dla czasu t = 0 odkształcenie wynosi:

$$\varepsilon(0) = \varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \tag{4.77}$$

Dla czasu $t \rightarrow \infty$ granicą wyrażenia (4.75) jest [60,61,B21]:

$$\varepsilon(t_{\infty}) = \varepsilon_{EZ} = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) = \lim_{t \to \infty} \varepsilon(t)$$
(4.78)

Moduł zastępczy sprężystości E_z można zapisać w następujący sposób:

$$\frac{1}{E_z} = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}$$
(4.79)

Po przekształceniu równania (4.79) moduł zastępczy sprężystości wynosi:

$$E_z = \frac{E_0 E_1 E_2}{E_1 E_2 + E_0 E_1 + E_0 E_2} \tag{4.80}$$

Przekształcając ogólne równanie (4.67) modelu Kelvina-Voighta, opracowano siedmioparametrowy model, który przedstawiony jest na rysunku 4.19.



Rys. 4.19. Analogia mechaniczna siedmioparametrowego modelu Kelvina-Voighta

Równania równowagi i równania kinetyczne dla siedmioparametrowego modelu Kelvina-Voighta są następujące:

$$\sigma = \sigma_1 = (\sigma_2 + \sigma_3) = (\sigma_4 + \sigma_5) = (\sigma_6 + \sigma_7)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 = \varepsilon_3) + (\varepsilon_4 = \varepsilon_5) + (\varepsilon_6 = \varepsilon_7)$$
(4.81)

Równanie (4.67) po przekształceniach dla siedmioparametrowego modelu Kelvina-Voighta jest następujące:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} \left(1 - e^{\frac{-t}{t_1}} \right) + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{\frac{-t}{t_2}} \right) + \frac{1}{E_3} \left(1 - e^{\frac{-t}{t_3}} \right) \right)$$
(4.82)

Równanie (4.82) przekształcono w taki sposób aby uwzględniał wszystkie parametry modelu Kelvina-Voighta:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} \left(1 - e^{\frac{-E_1 t}{\eta_1}} \right) + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{\frac{-E_2 t}{\eta_2}} \right) + \frac{1}{E_3} \left(1 - e^{\frac{-E_3 t}{\eta_3}} \right) \right) (4.83)$$

Funkcja (4.82) przyjmuje również postać:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \left(1 - e^{\frac{-t}{t_1}} \right) + \varepsilon_2 \left(1 - e^{\frac{-t}{t_2}} \right) + \varepsilon_3 \left(1 - e^{\frac{-t}{t_3}} \right)$$
(4.84)

gdzie: t_1 , t_2 , t_3 – czasy retardacji:

$$t_1 = \frac{\eta_1}{E_1}, t_2 = \frac{\eta_2}{E_2} \text{ i } t_3 = \frac{\eta_3}{E_3}$$
(4.85)

Moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej obliczono na podstawie równań (4.82)–(4.85) budując prosty układ równań:

$$\overline{\varepsilon}_{0} = \frac{\sigma_{0}}{E_{0}} \rightarrow E_{0} = \frac{\sigma_{0}}{\overline{\varepsilon}_{0}}$$

$$\overline{\varepsilon}_{1} = \frac{\sigma_{0}}{E_{1}} \rightarrow E_{1} = \frac{\sigma_{0}}{\overline{\varepsilon}_{1}}$$

$$\overline{\varepsilon}_{2} = \frac{\sigma_{0}}{E_{2}} \rightarrow E_{2} = \frac{\sigma_{0}}{\overline{\varepsilon}_{2}}$$

$$\overline{\varepsilon}_{3} = \frac{\sigma_{0}}{E_{3}} \rightarrow E_{3} = \frac{\sigma_{0}}{\overline{\varepsilon}_{3}}$$

$$\overline{t}_{1} = \frac{\eta_{1}}{E_{1}} \rightarrow \eta_{1} = E_{1}\overline{t}_{1}$$

$$\overline{t}_{2} = \frac{\eta_{2}}{E_{2}} \rightarrow \eta_{2} = E_{2}\overline{t}_{2}$$

$$\overline{t}_{3} = \frac{\eta_{3}}{E_{3}} \rightarrow \eta_{3} = E_{3}\overline{t}_{3}$$
(4.86)

Z dyskusji nad wzorem (4.84) wnika że dla czasu t = 0 odkształcenie wynosi:

$$\varepsilon(0) = \varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_0} \tag{4.87}$$

Moduł zastępczy sprężystości dla siedmioparametrowego modelu przyjmuje postać:

$$\frac{1}{E_z} = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_3}$$
(4.88)

po przekształceniach:

$$E_{Z} = \frac{E_{0}E_{1}E_{2}E_{3}}{E_{1}E_{2}E_{3} + E_{0}E_{2}E_{3} + E_{0}E_{1}E_{3} + E_{0}E_{1}E_{2}}$$
(4.89)

Granica funkcji $\varepsilon(t)$ opisująca siedmioparametrowy model Kelvina-Voighta, gdzie $t \to \infty$, może być wyrażona:

$$\varepsilon_{tn} = \frac{\sigma_0}{E_z} = \lim_{t \to \infty} \varepsilon(t) \tag{4.90}$$

Opracowywanie modeli Kelvina-Voighta z coraz większą liczbą parametrów polega na modyfikacji równania (4.67).

Aktualnie wystarczający jest pięcioparametrowy model Kelvina-Voighta do opisu krzywych pełzania materiałów wytwarzanych przyrostowo, co potwierdzają badania zawarte w niniejszej pracy doktorskiej i innych publikacjach.

5. CEL I SPOSÓB REALIZACJI PRACY

5.1. Cel pracy

Sposób budowania modelu wytwarzanego przyrostowo i ciągły rozwój materiałów stosowanych w druku 3D determinują potrzebę prowadzenia badań nad właściwościami mechanicznymi (w tym też reologicznymi), właściwościami tribologicznymi i dokładnością wymiarowokształtową.

Elementy wytwarzane technologiami przyrostowymi wykazują relaksację naprężeń i pełzanie materiału, dlatego uzasadnione jest prowadzenie badań w tym kierunku. Badania te pozwalają na ocenę zachowania się wytworzonego przyrostowo modelu pod wpływem ciągłych naprężeń wraz z upływem czasu. Zachowanie ciała pod wpływem naprężeń można opisać, stosując modele ciał idealnych. Jednym z problemów jest określenie niepewności aproksymacji modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych, a także ocena czy model ciała idealnego jest wystarczający do opisu. Bez znajomości właściwości reologicznych elementów wytwarzanych przyrostowo niemożliwe jest zastosowanie ich w procesach, podczas których będą poddawane ciągłych naprężeniom, np. połączenia lub uszczelnienia.

Wyżej opisane problemy, a także analiza literatury przedstawiona w rozdziałach 1, 2, 3 pozwoliły na sformułowanie głównego celu pracy, którym jest:

Określenie właściwości reologicznych elementów wytwarzanych za pomocą technologii przyrostowych SLS i FDM z zastosowaniem modeli ciał idealnych.

Cele pomocnicze to:

- Opracowanie modelu wieloparametrowego (n>5) do oceny właściwości reologicznych.
- Ocena zastosowania modeli ciał idealnych do opisania właściwości reologicznych.
- Określenie parametrów technologicznych wpływających na właściwości reologiczne elementów wykonywanych technologiami przyrostowymi SLS i FDM.
- Określenie niepewności aproksymacji w doborze modelu reologicznego do krzywej relaksacji i pełzania materiału.

Poszerzenie wiedzy na temat właściwości reologicznych elementów wytwarzanych technologiami przyrostowymi, konkretnie FDM (technologia MEX zgodnie z normą PN-EN ISO/ASTM-52900), SLS, niezbędnych w obliczeniach inżynieryjnych i symulacjach komputerowych stanowi cel utylitarny pracy.

Dodatkowo poszerzono badania prowadzone w ramach rozprawy doktorskiej o technologie druku 3D: fotoutwardzania akrylowych żywic polimerowych PJM. Zdecydowano się na to ze względu na sposób przetwarzania materiałów polimerowych oraz materiał medyczny MED610 dostępny w tej technologii.

5.2. Hipoteza badawcza

Przedstawiony powyżej główny cel pracy pozwala na sformułowanie następującej hipotezy badawczej:

Zjawiska relaksacji naprężeń i pełzania występujące w materiałach wytwarzanych technologiami przyrostowymi przy założonych parametrach technologicznych, zwłaszcza technologią FDM i SLS, opisać można przy pomocy wieloparametrowych modeli reologicznych, których moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej wyznaczyć można z dokładnością umożliwiającą ich stosowanie w obliczeniach inżynierskich.

5.3. Sposób realizacji celów pracy

W celu udowodnienia postawionej hipotezy badawczej przeprowadzono obszerne badania dotyczące właściwości reologicznych elementów wytwarzanych technologiami selektywnego spiekania proszków, wytłaczania materiału i fotoutwardzania ciekłych żywic polimerowych, które zamieszczono w niniejszej pracy doktorskiej składającą się z ośmiu rozdziałów.

W rozdziale pierwszym przedstawiono rys historyczny technologii przyrostowych i ich podział. Opisano role badań właściwości mechanicznych modeli wytwarzanych przyrostowo. Ponadto w tym rozdziale wyjaśniono znaczenie badań właściwości reologicznych modeli wytwarzanych przyrostowo.
Rozdział drugi aktualnego stanu wiedzy związanego z badaniami reologicznymi w technologiach przyrostowych. Ponadto przedstawiono w tym rozdziale przewidywania i trendy związane z przemysłem druku 3D.

Rozdział trzeci skupia się na przybliżeniu technologii przyrostowych zastosowanych w badaniach. Scharakteryzowano wybrane technologie przyrostowe pod względem zasady działania, procesu i stosowanych materiałów. Dodatkowo zawarto w tym rozdziale zagrożenia występujące w technologiach przyrostowych istotne podczas pracy z nimi.

Rozdział czwarty to przedstawienie zagadnienia reologii ciała stałego. Zawarte tu też zostały charakterystyka modeli reologicznych stosowanych do opisu krzywych pełzania materiału i relaksacji naprężeń oraz sposób budowania modeli wieloparametrowych skupia się na przybliżeniu technologii przyrostowych zastosowanych w badaniach.

Rozdział piąty zawiera cel główny, cele pomocnicze, a także hipotezę badawczą pracy. Przedstawiono również układ oraz sposób realizacji pracy doktorskiej.

W rozdziale szóstym przedstawiono program badań, który zawiera parametry technologiczne zastosowane do wytworzenia modeli wybranymi technologiami przyrostowymi. W rozdziale tym opisano również aparaturę, aparaturę badawczą i materiały zastosowane w testach, a także przedstawiono sposób doboru modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych.

Rozdział siódmy dotyczy analizy wyników badań. Przedstawiono krzywe relaksacji i pełzania materiału dla technologii ekstruzji materiału, fotoutwardzania akrylowych żywic polimerowych oraz selektywnego spiekania proszków. Zaprezentowano wyniki dopasowań modeli Maxwella-Wiecherta i Kelvina-Voighta. Wyznaczono wartości parametrów równań modeli reologicznych, a także wartości współczynników lepkości dynamicznej i modułów sprężystości.

Rozdział ósmy przedstawia wnioski wynikające z przeprowadzonych badań eksperymentalnych i rozważań teoretycznych w ramach realizacji niniejszej pracy doktorskiej.

Na końcu przedstawiono bibliografię, którą podzielono na: artykuły, książki, normy, patenty i źródła internetowe.

W trakcie realizacji rozprawy doktorskiej część badań została już opublikowana w artykułach naukowych i przedstawiona na konferencjach naukowych.

6. Program badań

W ramach pracy doktorskiej zaplanowano i wykonano szereg zadań, których przedstawiono na rysunku 6.1.

Rozeznanie literaturowe w zakresie: badań właściwości mechanicznych i reologi ciała stałego Określenie hipotezy badawczej, celu głownego i celów pomocniczych

Wybór: technologi druku 3D, parametetrów technologicznych druku 3D i materiałow do druku 3D

Wybór paramtrów badań dla zjawisk relaksacji naprężęn i pełzania

Opracowanie wyników badań, których celem było:

ocena wpływu parametrów technologicznych na właściwości reologiczne,

ocena zastosowania modeli reologicznych do oceny krzywych relaksacji naprężeń i pełzania modeli wytwarzanych przyrostowo,

wyznaczenie modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej dla wybranych materiałów wytwarzanych przyrostowo,

ocena niepewności aproksymacji modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych.





Wytworzenie próbek do badań opracowanych na podstawie norm ISO 527 i ISO 3384

Rys. 6.1. Zadania zrealizowane w ramach badań

Do badań wytypowano technologie: wytłaczania materiału MEX, selektywnego spiekania proszku SLS i fotoutwardzania akrylowych żywic polimerowych PJM. Technologie te wybrano ze względu na różne metody przetwarzania materiału polimerowego. Materiały wybrane do badań to:

- MED610, RGD720 technologia PJM,
- ABS-P430, PLA MakerBot, ROSA-Flex 96A technologia MEX,
- PA2200 technologia SLS.

Materiały wytypowano ze względu na ich koszt i zastosowanie do wytwarzania modeli użytkowych.

Obliczenia statystyczne i matematyczne z zastosowaniem programów Microsoft Excel i Origin. Aproksymacje modeli reologicznych do krzywych eksperymentalnych wykonano z wykorzystaniem algorytmu Levenberga-Marquardta i oprogramowania Origin.

W dalszej części tego rozdziału przedstawiono metodykę badań. Wyniki badań przedstawiono w rozdziale 7, natomiast wnioski odnoszące się do badań w rozdziale 8.

6.1. Kształt próbek i zastosowane parametry technologiczne

Próbki do badań opracowano na podstawie norm: PN-EN ISO 527-1:2020-01: Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 1. Zasady ogólne [N6], PN-EN ISO 527-2:2012: Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 2. Warunki badań tworzyw sztucznych przeznaczonych do różnych technik formowania [N7] i PN-EN ISO 3384-1:2019: Guma i kauczuk termoplastyczny – Oznaczanie relaksacji naprężenia przy ściskaniu – Część 1. Badanie w stałej temperaturze. [N8]. Rysunek próbki ISO 527 typ 1BA i próbki ISO3384 wraz z wymiarami przedstawiono na rysunku 6.2.



Rys. 6.2. Wymiary próbek użytych do badań: a) ISO 527 typ 1BA, b) ISO 3384

Oba rodzaje próbek zapisano w formacie STL (Stereolithography Language – stereolitograficzny format plików). Zapisu pliku STL przedstawiono na rysunku 6.3.



Rys. 6.3. Zapis STL próbek do badań: a) ISO 527 typ 1BA, b) ISO 3384

Parametry zapisu pliku STL:

- dla próbki ISO 527: tolerancja cięciwy (odchylenie) $Ch_t = 0,0047$ mm, tolerancja kątowa (kąt) $Agl_t = 5$ stopni, liczba wygenerowanych trójkątów 348,
- dla próbki ISO 3384: tolerancja cięciwy (odchylenie) $Ch_t = 0,0016$ mm, tolerancja kątowa (kąt) $Agl_t = 5$ stopni, liczba wygenerowanych trójkątów 568.

Parametry zapisu pliku STL dobrano tak, aby uzyskać pliki o małym rozmiarze, ale jednocześnie zachować kształt próbki. W tym przypadku pojedyncze próbki miały rozmiar: ISO 527 – 18 KB; ISO 3384 – 28 KB.

Próbki wytworzono z zadanymi parametrami technologicznymi druku 3D takimi jak: wysokość warstwy L_t , orientacja wydruku P_d , liczba konturów N_s i gęstość energii E_d . Rodzaj parametru i jego wartość wybrano ze względu na drukarkę 3D oraz na podstawie przeglądu literatury w zakresie tematu rozprawy doktorskiej. W tabeli 6.1 podano parametry technologiczne druku 3D zmienne, które analizowano po zakończeniu przeprowadzonych testów relaksacji naprężeń i pełzania. Pozostałe parametry technologiczne druku 3D stałe zostały przedstawione w rozdziale 7 dotyczącym wyników badań. **Tabela 6.1.** Wartości parametrów technologicznych zmiennych zastosowanych w badaniach

Technologia	Parametry technologiczne
	L _t (0,254 mm i 0,33 mm)
MEX	P _d (0°, 45°, 90°)
	N _s (2, 4, 6,10)
	$P_{d}(0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ})$
SLS	$E_{d} \left(0,056 \ \frac{J}{mm^{2}}, 0,076 \ \frac{J}{mm^{2}} \right)$
PJM	$P_{d}(0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ})$

Parametry technologiczne druku 3D: orientacja wydruku P_d i liczba konturów N_s wymagają wyjaśnienia w postaci ilustracji ponieważ mogą być intepretowane w różny sposób. W związku z tym ich graficzne przedstawienie pokazano na rysunku 6.4.



Rys. 6.4. Interpretacja parametrów technologicznych: a) orientacja wydruku, b) liczba konturów

Gęstość energii E_d zastosowana do wytworzenia próbek w technologii selektywnego spiekania proszku została obliczona zgodnie ze wzorem [81]:

$$E_d = \frac{P}{vh}x\tag{6.1}$$

gdzie: P – moc lasera, W; v – prędkość wiązki lasera, mm/s.; h = 0,25 mm (odległość pomiędzy kolejnymi wiązkami lasera); d = 0,42 mm (średnica wiązki skupionej); x = 1,68 (współczynnik nakładania). Pozostałe wartości parametrów składających się na gęstość energii przedstawiono w tabeli 6.2. Tabela 6.2. Parametry składające się na gęstość energii

Parametr	Gęstość energii, $E_d, J/mm^2$				
1 arameu	0,056	0,076			
Р	21 W	22 W			
v	2500 mm/s	1970 mm/s			

W rozdziale z wynikami badań przyjęto oznaczenia, które ułatwiają identyfikacje. Przykładowy zapis oznaczenia zaprezentowano poniżej:

 $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^0 - 1)^R$, co oznacza:

 T^{MEX} – technologia przyrostowa MEX.

 M^{ABS} – materiał ABS.

 L_t^{0254} – wysokość warstwy 0,254 mm.

 P_d^0 – orientacja wydruku 0°.

1 - numer powtórzenia w jednej serii.

 $(...)^{R}$ – próbka poddana testowi relaksacji.

Każdą pojedynczą próbkę przed testami relaksacji naprężeń i pełzania zmierzono suwmiarką noniuszową Mitutoyo o rozdzielczości 0,05 mm w celu wyznaczenia pola przekroju według wzoru (6.2):

$$S = a \cdot b \tag{6.2}$$

gdzie: *a* – grubość próbki, mm; *b* – szerokość próbki, mm.

6.2. Aparatura i materiały użyte do wytworzenia próbek

W Laboratorium Niekonwencjonalnych Technik Wytwarzania Politechniki Świętokrzyskiej wytworzono próbki do badań właściwości reologicznych. Aparatura wykorzystana do badań to drukarki 3D: Objet 350 Connex, EOS Formiga P100, MakerBot Replicator 5th, Stratasys Dimension 1200es. Wygląd drukarek 3D przedstawiono na rysunku 6.5.



Rys. 6.5. Widok drukarek 3D: a) Dimension 1200es, b) Connex 350, c) MakerBot Replicator 5th, d) Formiga P100

W tabeli 6.3 przedstawiono: technologię druku 3D, drukarkę 3D, materiał modelowy i rodzaj próbki.

Tabela 6.3. Podział technologii druku 3D zastosowanych w badaniach ze względu na rodzaj: drukarki 3D, materiału i próbki

Technologia druku 3D	Drukarka 3D	Materiał	Rodzaj próbki
MEX	Stratasys Dimension 1200es, MakerBot Replicator 5th	ABS P430, ROSA-Flex 96A, PLA MakerBot	ISO 527 1BA
PJM	Objet 350 Connex	MED610, RGD720	ISO 527 1BA, ISO 3384
SLS	EOS Formiga P100	EOS PA2200	ISO 527 1BA

Wybrane właściwości mechaniczne dla każdego z materiałów przedstawiono w tabeli 6.4 w formie porównania .

Tabela6.4.Wybranewłaściwościmechanicznemateriałówzastosowanychdobadań [O5-O10]

	MED610	RGD720	ROSA- Flex 96A	PLA	ABS P400	PA 2200
Technologia w której zastosowano materiał	PJ	М	MEX			SLS
Wytrzymałość na rozciąganie	50 – 65 MPa (ASTM D638)	50 – 65 MPa (ASTM D638)	55 MPa (EN 12803)	53 MPa (ISO 527)	22 MPa (ASTM D638)	50 MPa (ISO 527)

Wydłużenie przy zerwaniu	10% – 25% (ASTM D638)	15% - 25% (ASTM D638)	350% (EN 12803)	6% (ISO 527)	6% (ASTM D638)	20% (ISO 527)
Moduł Younga	2000 – 3000 MPa (ASTM D790)	2000 – 3000 MPa (ASTM D790)	Brak informa- cji	3500 MPa (ISO 527)	1,834 MPa (ASTM D790)	1500 MPa (ISO 527)
Wytrzymałość na zginanie	75 – 110 MPa (ASTM D790)	80 – 110 MPa (ASTM D790)	Brak informa- cji	81 MPa (ISO178)	41 MPa (ASTM D790)	58 MPa (ISO 527)
Twardość w skali Shore'a	83 – 86 D	83 – 86 D	96 A	83 D	108 D	75 D

Producenci materiałów stosowanych do druku 3D w karcie charakterystyki materiałowej nie podają właściwości reologicznych. Informacja ta jest dość istotna dla konstruktorów zajmujących się wytwarzaniem elementów użytkowych z druku 3D. Przykładem takich elementów użytkowych mogą być: protezy, uszczelnienia mechaniczne, połączenia zatrzaskowe, elementy wyposażenia wnętrz samochodów.

6.3. Aparatura badawcza

Badania dotyczące właściwości reologicznych wykonano z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej Inpect mini. W programie Labmaster, będącym na wyposażeniu maszyny wytrzymałościowej, ustawiono parametry testu, stosując programowanie blokowe. Pierwszy blok obejmował zadanie wartości przemieszczenia programu i prędkości przemieszczenia talerza/szczęk. Drugi blok programu obejmował ruchu talerza/szczek i utrzymanie zatrzymanie stałej wartości przemieszczenia (testy relaksacji naprężeń) lub naprężenia (testy pełzania) przez określony czas. Trzeci blok programu obejmował przeprowadzenie odciażenia próbki, co oznacza powrót uchwytów do pozycji wyjściowej. Do ściskania próbek walcowych zastosowano płaskie talerze, przy czym talerz dolny był wahliwy. Użycie wahliwego talerza poprawia równomierne obciażenie obu powierzchni płaskich próbki. Do rozciagania próbek w kształcie wiosełek zastosowano uchwyty nożycowe. Wygląd systemu pomiarowego przedstawiono na rysunku 6.6.



Rys. 6.6. Widok stanowiska do pomiarów właściwości mechanicznych modeli wytwarzanych technologiami przyrostowymi

Relaksacja naprężeń po założonym czasie ekspozycji została wyznaczona z zależności (6.3):

$$R_{\sigma} = \frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_0} \cdot 100\% \tag{6.3}$$

gdzie: σ_0 – początkowe naprężenie, MPa; σ_t – naprężenie po czasie t, MPa.

Obliczono procentowy wzrost odkształcenia według wzoru (6.4):

$$R_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\rm t} - \varepsilon_o}{\varepsilon_{\rm t}} \cdot 100\% \tag{6.4}$$

gdzie: ε_0 – początkowe odkształcenie, %; ε_t – odkształcenie po czasie t, %.

Wartości parametrów odkształceń są podane w procentach, dlatego należy zamienić je w niektórych przypadkach na liczbę według wzoru (6.5):

$$p\% = \frac{p}{100} \tag{6.5}$$

gdzie: p% – procent, p – liczba.

6.4. Algorytm Levenberga – Marquardta

Metode Levenberga-Marquardta zastosowano w aproksymacji modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych. Realizację dopasowania wykorzystaniem tej metody przeprowadzono Z zastosowaniem \mathbf{Z} oprogramowania Origin. Algorytm Levenberga-Marquardta, został opracowany niezależnie przez Kennetha Levenberga i Donalda Marquardta. Dostarcza on rozwiązania numerycznego problemu minimalizacji funkcji nieliniowej. Algorytm ten łaczy w sobie cechy metody Gaussa-Newtona (szybkości) i metody najszybszego spadku (stabilności) [111].

Przy dopasowaniu funkcji modelu $\hat{y}(t;p)$ zmiennej niezależnej t i wektora *n* parametrów *p* do zestawu *m* punktów danych (t_i, y_i) korzystnie jest zminimalizować sumę ważonych kwadratów błędów między danymi y_i , a funkcją dopasowania krzywej $\hat{y}(t;p)$ [111,112]:

$$\chi^{2}(p) = \sum_{i=1}^{m} \left[\frac{y(t_{i}) - \hat{y}(t_{i}; p)}{\sigma_{y_{i}}} \right]^{2}$$
(6.6)

$$= (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}(\mathbf{p}))^T \mathbf{W}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}(\mathbf{p}))$$
(6.7)

$$= \mathbf{y}^T \mathbf{W} \mathbf{y} - 2\mathbf{y}^T \mathbf{W} \widehat{\mathbf{y}} + \widehat{\mathbf{y}}^T \mathbf{W} \widehat{\mathbf{y}}$$
(6.8)

gdzie: σ_{y_i} – błąd pomiaru dla danych $y(t_i)$, W – macierz wag, która jest diagonalna z $W_{ii} = 1/\sigma_{y_i}^2$.

Ta skalarna miara dobroci dopasowania jest nazywana kryterium błędu chi-kwadrat, ponieważ suma kwadratów normalnie dystrybuowanych zmiennych losowych jest rozłożona jako rozkład chi-kwadrat [111,112].

W przypadku gdy funkcja $\hat{y}(t; \boldsymbol{p})$ jest nieliniowa w parametrach modelu \boldsymbol{p} , wówczas minimalizacja χ^2 względem parametrów musi być przeprowadzona iteracyjnie [111,112]. Celem każdej iteracji jest znalezienie perturbacji \boldsymbol{h} do parametrów \boldsymbol{p} , która zmniejsza χ^2 [117,118]. Algorytm Levenberga-Marquardta adaptacyjnie zmienia aktualizacje parametrów między aktualizacją gradientową, a aktualizacją Gaussa-Newton [111, 112].

$$[\boldsymbol{J}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{J} + \lambda \boldsymbol{I}] \boldsymbol{h}_{lm} = \boldsymbol{J}^T \boldsymbol{W} (\boldsymbol{y} - \hat{\boldsymbol{y}})$$
(6.9)

gdzie małe wartości parametru tłumienia λ powodują aktualizację metodą Gaussa Newtona, a duże wartości λ powodują aktualizację metodą gradientową. Parametr tłumienia λ jest inicjowany jako duży, aby pierwsze aktualizacje były małymi skokami w kierunku najbardziej stromego zejścia [111]. Jeśli jakakolwiek iteracja spowoduje gorsze przybliżenie $(\chi^2(\mathbf{p} + \mathbf{h}_{lm}) > \chi^2(\mathbf{p}))$, wówczas λ jest zwiększane [112]. W przeciwnym razie, w miarę poprawy rozwiązania, λ jest zmniejszane, metoda Levenberga-Marquardta zbliża się do metody Gaussa Newtona, a rozwiązanie zwykle zbliża się do lokalnego minimum [111]. W relacji aktualizującej Marquardta parametr tłumienia λ jest skalowany przez przekątną hesjanu **J**^T**WJ** dla każdego parametru [111,112]:

$$[\boldsymbol{J}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{J} + \lambda \, diag(\boldsymbol{J}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{J})] \boldsymbol{h}_{lm} = \boldsymbol{J}^T \boldsymbol{W} (\boldsymbol{y} - \hat{\boldsymbol{y}}) \tag{6.10}$$

Algorytm Levenberga-Marquardta jest realizowany w oprogramowaniu Origin według następujących kroków [W16]:

- 1. Oblicz wartość $\chi^2(b)$ na podstawie podanych wartości początkowych: *b*.
- 2. Wybierz niską wartość dla λ , np. $\lambda = 0,001$.
- 3. Rozwiąż funkcje Levenberga-Marquardta dla δb i oblicz $\chi^2(\beta + \delta b)$.
- Jeżeli χ²(β + δb) > χ²(b), zwiększ λ o współczynnik 10 i wróć do kroku 3.
- 5. Jeżeli $\chi^2(\beta + \delta b) < \chi^2(b)$, zmniejsz λ o współczynnik 10, zaktualizuj wartość parametrów do δb i wróć do kroku 3.
- 6. Zatrzymaj aż wartości χ^2 obliczone w dwóch kolejnych iteracjach będą wystarczając małe (w porównaniu z tolerancją).

6.5. Ocena dopasowania modelu reologicznego do krzywej eksperymentalnej

Dopasowanie modelu reologicznego do krzywej eksperymentalnej oceniono nie tylko na podstawie wizualnej, ale również sugerując się kilkoma parametrami: testu zgodności Chi^2 , determinacji R^2 , odchyleniem standardowym *SD*, niepewności typu A u_A i niepewności całkowitej u_C [113].

Interpretując wartość współczynnika *Chi*², im są one bliżej wartości "0" tym rozbieżność miedzy danymi eksperymentalnymi, a danymi otrzymanymi na podstawie modelu są mniejsze, co oznacza uzyskanie silnego dopasowania [113]. Wartość tego współczynnika obliczana jest na podstawie wzoru (6.6).

W przypadku współczynnika determinacji R^2 jest on podniesionym do kwadratu współczynnikiem korelacji R [113]. Wartości współczynnika R^2 zawsze zmieniają się w przedziale od zera do jednego i są miarą przydatności równania regresji [113]. Wartości R^2 w pobliżu zera wykazują, że równanie regresji w praktyce jest nieprzydatne [113]. Natomiast wartości R^2 zbliżone do "1" wskazują, że równanie regresji jest bardzo przydatne do przewidywania wartości zmiennej zależnej Y za pomocą za pomocą zmiennej niezależnej X [113]. W praktyce oznacza to że zastosowano prawidłowy model regresji [113]. Wartość współczynnika determinacji R^2 obliczana jest według wzoru (6.11) [113] :

$$R^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_{i} - \bar{y})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \bar{y})^{2}}$$
(6.11)

gdzie: \hat{y}_i – wartość teoretyczna zmiennej objaśnianej (na podstawie modelu), \bar{y} – średnia arytmetyczna empirycznych wartości zmiennej objaśnianej, $y_i - i$ -ta obserwacja zmiennej y.

Najczęściej obliczanym parametrem przez programy komputerowe jest odchylenie standardowe *SD* według równania (6.12) [O11] :

$$SD = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$
(6.12)

gdzie: x_i – kolejne wartości danej zmiennej losowej w próbie, \bar{x} – średnia arytmetyczna z próby, n – liczba elementów w próbie.

W języku potocznym "niepewność" oznacza watpliwość, a stad "niepewność dopasowania" oznacza watpliwość, co do wartości parametrów uzyskanych w wyniku aproksymacji [O11]. Według przewodnika GUM niepewność (pomiaru) jest to parametr zwiazany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać menzurandowi [O11]. Na niepewność pomiaru ma wiele składowych niepewności. Ich wyznaczanie można dokonać w oparciu o ocenę estymatorów odchyleń standardowych dla otrzymanego rozrzutu wyników serii pomiarów lub w przypadku pomiarów pojedynczych za standardowych, odchyleń wyznaczonych podstawie pomoca na przewidywanych rozkładów prawdopodobieństwa [O11]. Taki sposób szacowania niepewności stanowi kryterium ich podziału na dwa typy [O11]:

- niepewność typu A wyznaczana metodami statystycznymi,
- niepewność typu B wyznaczana innymi metodami.

W przypadku badań nad właściwościami mechanicznym można spotkać się zarówno niepewnościami typu A jak i B. Dla niepewności dopasowania zastosowano metodę typu A, a niepewność standardową wyznaczono według wzoru (6.13) [O11]:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$
(6.13)

gdzie: x_i – kolejne wartości danej zmiennej losowej w próbie, \bar{x} – średnia arytmetyczna z próby, n – liczba elementów w próbie, SD – odchylenie standardowe.

Niepewność rozszerzoną obliczono według równania (6.14) [O11]:

$$u_C = k_p \cdot u_A \tag{6.14}$$

gdzie: k_p – współczynnik rozszerzenia, który przyjmuje wartość 2,26 dla rozkładu t-Studenta na poziomu ufności 95%, u_A – niepewność typu A.

7. Wyniki badań relaksacji naprężeń i pełzania materiałów wytwarzanych przyrostowo

Wiele elementów maszyn lub mechanizmów poddawana jest podczas pracy naprężeniom ciągłym. Taki rodzaj naprężeń jest niekorzystny dla połączeń np.: śrubowych, nitowych i zatrzaskowych. Mocowanie takie musi utrzymywać ciągły taki sam poziom naprężenia, aby zapewnić niezawodność. Również naprężenia ciągłe negatywnie wpływają na uszczelnienia, które tak samo jak w przypadku połączeń, muszą utrzymywać odpowiedni poziom naprężenia. Brak wiedzy na temat właściwości reologicznych, bardzo często prowadzi do uszkodzeń elementów.

Właściwości reologiczne ciał stałych można opisać stosując odpowiednie wieloparametrowe modele ciał idealnych. Do opisu krzywych relaksacji naprężeń i pełzania zastosowano odpowiednio modele Maxwella-Wiecherta i Kelvina-Voighta. Badania obejmowały również ocenę wpływu wybranych parametrów technologicznych na właściwości reologiczne modeli wytwarzanych przyrostowo i wyznaczenie niepewności aproksymacji modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych.

W rozdziale tym przedstawiono wyniki badań relaksacji naprężeń i pełzania dla materiałów MED610, ABS P430, ROSA-Flex 96A, PLA, PA2200.

7.1. Dobór modelu ciała idealnego do opisu krzywej relaksacji lub pełzania

Istotnym problemem jest opis krzywej relaksacji/pełzania przy pomocy modelu ciała idealnego w taki sposób, aby ten miał fizykalne znaczenie. W wyniku przeprowadzania testów relaksacji naprężeń lub pełzania otrzymuje się wykres kompletny testu. Wykres podobny kompletny testu dla materiału wytworzone technologią fotoutwardzania akrylowych żywic polimerowych przedstawiono. W publikacji [B21] przedstawiono podobne wykresy ilustrujące kompletne testy relaksacji naprężeń i pełzania z tą różnica, że dla materiału wytworzonego technologią fotoutwardzania akrylowych żywic polimerowych Przykładowe kompletne wykresy testów relaksacji naprężeń i pełzania uzyskanych dla materiału ABS P430 przedstawiono na rysunku 7.1.



Rys. 7.1. Przykładowe wykresy (materiał ABS P430): a) test relaksacji naprężeń, b) test pełzania

Wykresy widoczne na rysunku 7.1 podzielono na 3 odcinki.

Pierwszy odcinek:

- 1_P odkształcenie wywołane quasi-jednostkowym skokiem naprężenia,
- 1_R skok naprężenia quasi-jednostkowy.

Skok jednostkowy teoretycznie powinien odbywać się z niekończenie dużą prędkością, co w warunkach realnych (laboratoryjnych) nie jest możliwe do

zrealizowania. W związku z tym na potrzeby testów realizowany jest on z odpowiednio dużą prędkością; prędkość tę oznaczano v_{mm} .

Drugi odcinek:

- $2_P krzywa pełzania,$
- $2_R krzywa$ relaksacji naprężeń.

W dalszej części pracy to krzywe pełzania i relaksacji naprężeń będą przedmiotem aproksymacji modelu reologicznego.

Odcinek oznaczony numerem "3" nazywany jest odciążeniem, czyli zakończeniem testu.

Ostateczny wygląd krzywej relaksacji/pełzania otrzymuje się po odpowiedniej obróbce wykresu kompletnego, a dokładniej po opracowaniu danych, które otrzymano w wyniku przeprowadzenia eksperymentów.

W celu doboru modelu o odpowiedniej liczbie parametrów do opisu krzywych relaksacji naprężeń lub pełzania należało przeprowadzić procedurę przedstawioną na rysunku 7.2.



Rys. 7.2. Procedura doboru modelu reologicznego o odpowiedniej ilości parametrów do krzywych eksperymentalnych

Zastosowanie procedury przedstawionej na rysunku 7.2 gwarantuje poprawność doboru modelu reologicznego o odpowiedniej ilości parametrów do krzywych eksperymentalnych. Dopasowanie przeprowadzono metodą Levenberga-Marquardta.

Aproksymacja modelu reologicznego do krzywej relaksacji naprężeń

Efekt przeprowadzonej procedury przedstawiono na krzywej relaksacji naprężeń dla materiału ABS P430 o oznaczeniu: $(L_t^{0,254} - P_d^0 - 1)^R$ – rysunek 7.3.



Rys. 7.3. Dopasowanie modeli reologicznych: a) model podstawowy Maxwella, b) model standardowy II, c) model pięcioparametrowy Maxwella-Wiecherta, d) model siedmioparametrowy Maxwella-Wiecherta

Dopasowanie modelem podstawowym Maxwella nie nadaje się do opisu doświadczalnej krzywej relaksacji naprężeń, co wyraźnie widać na rysunku 7.3 (a). Teoretyczna krzywa modelu podstawowego Maxwella dąży do zera, natomiast krzywa eksperymentalna dąży do asymptoty wskazującej wartości naprężenia. Uzyskana aproksymacja modelu podstawowego Maxwella jest słaba (pokazuje linie prostą), co potwierdzają otrzymane wartości parametrów dopasowania $R^2 = 0,711$ i $Chi^2 = 0,01735$, dlatego trzeba zastosować model bardziej złożony.

Aproksymacja przedstawiona na rysunku 7.3 (b) z zastosowaniem modelu standardowego II jest znacznie lepsza niż w przypadku modelu podstawowego Maxwella, ale stosowanie go do celów praktycznych może być obarczone błędem z uwagi na wartości współczynników dopasowania $R^2 = 0,9226$ i $Chi^2 = 0,00464$. W związku z należało zastosować model o wyższej liczbie parametrów.

Model pięcioparametrowy Maxwella-Wiecherta przedstawiono na rysunku 7.3 (c). Zauważyć można, że model ten jest silnie dopasowany do doświadczalnej krzywej relaksacji naprężeń, co potwierdzają otrzymane wartości współczynników dospawania $R^2 = 0,9913$ i $Chi^2 = 0,00005$.

Aktualnie model pięcioparametrowy model Maxwell-Wiecherta jest wystarczający do opisu krzywych relaksacji naprężeń, potwierdza to literatura tematu i badania przedstawione w dalszej części tego rozdziału.

Aproksymacja modelu reologicznego do krzywej pełzania

Efekt przeprowadzonej procedury przedstawionej na rysunku 7.2 przeprowadzono na krzywej pełzania w materiale ABS P430 o oznaczeniu: $(L_t^{0,254} - P_d^0 - 1)^P$ i zaprezentowano na rysunku 7.4.



Rys. 7.4. Dopasowanie modeli reologicznych: a) model podstawowy Kelvina, b) model standardowy I, c) model pięcioparametrowy Kelvina-Voighta, d) model siedmioparametrowy Kelvina-Voighta; R², Chi² – współczynniki dopasowania

Aproksymacja modelem podstawowym Kelvina nie nadaje się do opisu doświadczalnej krzywej pełzania, co pokazano na rysunku 7.4 (a). Teoretyczna krzywa modelu podstawowego Kelvina, tworzy kąt prosty (ucięty fragment kwadratu/prostokąta), natomiast krzywa eksperymentalna dąży do asymptoty wskazującej wartość odkształcenia. Otrzymane dopasowanie jest słabe, co potwierdzają uzyskane współczynniki dopasowania $Chi^2 = 0,00393$ i $R^2 = -0,18383$. Wartość ujemna współczynnika determinacji jest niepoprawna, ponieważ współczynnik ten zawsze zmienia się w przedziel $\langle 0,1 \rangle$. Błędna wartość współczynnika determinacji wynika z zastosowanej metody Levenberga-Marquardta. Z racji tego, że dopasowanie modelu podstawowego Kelvina jest bardzo słabe należy zastosować bardziej złożony model.

Aproksymacja przedstawiona na rysunku 7.4 (b) jest znacznie lepsza od tej wykonanej modelem podstawowym Kelvina, ale stosowanie go do celów praktycznych może być obarczone zbyt dużym błędem, z uwagi na uzyskane współczynniki dopasowania $Chi^2 = 0,00007$ i $R^2 = 0,9785$. W związku z tym przeprowadzono dopasowanie krzywej opisującej model Kelvina-Voighta drugiego rzędu przedstawiony na rysunku 7.4 (c). Czyli do eksperymentalnej krzywej relaksacji naprężeń w próbce z materiału ABS P430 aproksymowano model pięcioparametrowy Kelvina-Voighta. Uzyskanie silnego dopasowania potwierdzają współczynniki dopasowania $Chi^2 = 0,000002$ i $R^2 = 0,9994$. Przeprowadzony przegląd literatury [43,52,59–61,114] i badania przedstawione w niniejszej rozprawie doktorskiej potwierdzają, że przyjęty pięcioparametrowy model Kelvina-Voighta jest wystarczający do opisu krzywych pełzania.

Modele siedmioparametrowe Maxwella-Wiecherta i Kelvina-Voighta

Chociaż modele z wieloma parametrami dokładnie odwzorowują dane eksperymentalne, zwykle występują w nich problemy, takie jak brak istotności parametru (tj. przedział ufności dla szacowanego parametru jest większy niż sama szacowana wartość), niska wrażliwość parametryczna (tj. silne zmiany wartości parametru powodują niewielkie zmiany wyniku modelu), nie identyfikowalność (tj. wysoka korelacja między dwoma parametrami) i nadmierne dopasowanie (tj. więcej parametrów niż jest to konieczne do wyjaśnienia określonego zachowania) [115]. Wszystkie te sytuacje skutkują wieloma kombinacjami wartości parametrów, które dają ten sam wynik symulacji [115]. W konsekwencji nierealistyczne prognozy modelu powstają, gdy model jest stosowany w różnych warunkach eksperymentalnych, dlatego celem powinno być znalezienie odpowiedniej liczby parametrów modelu, które dają dokładne prognozowanie w szerokim zakresie warunków użytkowania [115].

Problem nadmiernego dopasowania widoczny jest w przypadku gdy do opisu krzywej relaksacji lub krzywej pełzania zastosujemy model siedmioparametrowy. Wygląd przykładowych dopasowań tych modeli przedstawiono na rysunkach 7.3 (d) i 7.4 (d). Wstępna analiza tych rysunków pokazuje że modele siedmioparametrowe znacznie lepiej pokrywają się z krzywymi eksperymentalnymi, niż w przypadku modeli pięcioparametrowych. Wyniki dopasowań przeprowadzonych krzywych relaksacji naprężeń i krzywych pełzania stosując modele pięcioparametrowe i siedmioparametrowe przedstawiono odpowiednio w tabelach 7.1 i 7.2.

Tabela7.1Wartości parametrów równania modelu pięcioparametrowegoi siedmioparametrowego Maxwella-Wiecherta – materiał ABS P430

Model		Siedmioparametrowy Maxwella-Wiecherta									
Nr próbki	σ 0, MPa	σ ₁ , MPa	σ ₂ , MPa	σ 3, MPa	t ₁ ^R , s	t ^R ₂ ,	t ^R 3,	Chi ²	R ²		
1	8,1	0,7	0,6	1,0	22	254	1	0,00006	0,9990		
2	7,7	0,7	0,7	1,0	21	252	1	0,00006	0,9989		

							r		
3	8,3	0,7	0,7	1,0	21	253	1	0,00007	0,9990
4	8,3	0,7	0,6	1,0	23	289	2	0,00007	0,9988
5	8,2	0,7	0,7	1,0	22	271	1	0,00007	0,9990
6	8,7	0,7	0,7	1,0	23	295	2	0,00008	0,9988
7	8,3	0,7	1,0	0,7	23	282	2	0,00006	0,9990
8	8,2	0,7	0,7	1,0	20	272	1	0,00006	0,9990
9	8,3	0,7	0,6	1,0	24	329	2	0,00007	0,9988
10	8,2	0,7	0,6	1,0	22	278	2	0,00007	0,9989
\overline{x}	8,2	0,7	0,7	1,0	22	277	1	0,00007	0,9989
SD	0,2	0,02	0,1	0,1	1	23	0,1	0,00001	0,0001
u_A	0,1	0,01	0,03	0,03	0,3	7	0,02	0,000002	0,00003
u _c	0,2	0,02	0,07	0,07	0,8	16	0,05	0,000005	0,00007
Model			Pięciopa	arametr	owy M	axwell	la-Wie	cherta	
Nu pućble:	σ 0,	σ 1,	σ_2 ,	t_1^R ,	$t_{2}^{R},,$			Chi ²	D ²
Nr prodki	MPa	MPa	MPa	s	S	-	-	Cni-	K-
1	8,2	1,0	0,7	9	185	-	-	0,00052	0,9912
2	7,8	1,0	0,8	9	187	-	-	0,00053	0,9912
3	8,3	1,0	0,8	9	189	-	-	0,00053	0,9919
4	8,3	1,0	0,8	9	202	-	-	0,00055	0,9908
5	8,3	1,0	0,8	9	199	-	-	0,00054	0,9915
6	8,8	1,0	0,8	9	205	-	-	0,00059	0,9906
7	8,4	1,0	0,8	9	202	-	-	0,00052	0,9915
8	8,3	1,0	0,7	8	200	-	-	0,00053	0,9909
9	8,3	1,0	0,7	9	223	-	-	0,00055	0,9903
10	8,3	1,0	0,8	9	200	-	-	0,00052	0,9914
\overline{x}	8,3	1,0	0,8	9	199	-	-	0,00054	0,9911
SD	0,2	0,02	0,02	0,4	11	-	-	0,00002	0,0005
u _A	0,1	0,01	0,01	0,1	3,5	-	-	0,00001	0,0002
11 -	0.2	0.02	0.02	0.2	8	-	-	0,00002	0,0005

Tabela7.2.Wartości parametrów równania modelu pięcioparametrowegoi siedmioparametrowego Kelvina-Voighta – materiał ABS P430

Model	Siedmioparametrowy Kelvina-Voighta									
Nr próbki	ε ₀ ,	ε ₁ ,	ε ₂ ,	ɛ ₃ ,	t ₁ ^P ,	t_2^P ,	t ₃ ^P ,	Chi ²	R^2	
	%	%	%	%	S	S	S			
1	1,8	0,2	0,1	0,1	413	57	11	0,0000006	0,9999	
2	1,5	0,1	0,1	0,1	366	42	8	0,00000011	0,9999	
3	1,8	0,2	0,1	0,1	412	53	10	0,00000007	0,9999	

4	1,5	0,1	0,1	0,1	406	50	10	0,0000006	0,9999
5	1,6	0,1	0,1	0,1	405	48	9	0,0000009	0,9999
6	1,3	0,1	0,1	0,1	376	41	7	0,00000010	0,9999
7	1,8	0,2	0,1	0,05	479	61	13	0,0000002	0,9999
8	1,4	0,2	0,1	0,1	423	50	9	0,00000011	0,9999
9	1,4	0,2	0,1	0,1	377	47	8	0,0000018	0,9999
10	1,3	0,1	0,1	0,1	354	40	7	0,00000014	0,9999
\overline{x}	1,5	0,1	0,1	0,1	401	49	9	0,00000009	0,9999
SD	0,2	0,02	0,01	0,01	36	7	2	0,00000005	0,00002
u_A	0,07	0,01	0,003	0,004	11	2	1	0,00000001	0,00001
u _c	0,16	0,02	0,007	0,009	25	5	2	0,00000002	0,00002
Model			Pięcio	parame	etrowy	Kelv	ina-V	oighta	
Nr próbki	ε ₀ ,	ε ₁ ,	ε ₂ ,	t ^P ₁ ,	t ₂ ^P ,			Ch;2	D ²
	%	%	%	S	s	-	-	Cni-	K-
1	1,9	0,2	0,1	276	26	-	-	0,0000019	0,9994
2	1,5	0,2	0,1	261	20	-	-	0,000028	0,9989
3	1,8	0,2	0,1	282	24	-	-	0,0000022	0,9994
4	1,5	0,1	0,1	283	23	-	1	0,0000013	0,9993
5	1,6	0,1	0,1	278	21	-	-	0,0000017	0,9991
6	1,3	0,1	0,1	259	18	-	-	0,0000028	0,9985
7	1,8	0,2	0,1	318	30	-	-	0,0000010	0,9996
8	1,4	0,2	0,1	276	22	-	-	0,0000025	0,9990
9	1,4	0,2	0,1	254	20	-	-	0,0000032	0,9989
10	1,3	0,1	0,1	251	19	-	-	0,0000029	0,9986
\overline{x}	1,5	0,2	0,1	274	22	-	-	0,0000022	0,9991
SD	0,2	0,02	0,01	19	4	-	-	0,0000008	0,0004
u _A	0,1	0,01	0,005	6	1	-	-	0,0000002	0,0001
u_c	0,2	0,02	0,013	14	2	-	-	0,0000005	0,0002

Z danych zawartych w tabelach 7.1 i 7.2 należy zwrócić na wartości średnie parametrów σ_3 , σ_4 , t_3^R , t_3^P , które nie różnią się od powstałych parametrów modelu. Wartości średnie współczynników dopasowania *Chi*², R^2 , nie różnią się zanadto miedzy modelem pięcioparametrowym, a siedmioparametrowym. W związku z tym nie jest konieczne dla testów relaksacji naprężeń i pełzania przedstawionych w niniejszej pracy stosowania odpowiednio modelu siedmioparametrowego Maxwella-Wiecherta i modelu siedmioparametrowego Kelvina-Voighta. Niewątpliwie nie wyklucza to stosowania modeli siedmioparametrowych do opisu krzywych relaksacji i pełzania dla materiałów wytwarzanych przyrostowo.

7.2. Materiał MED610

Wykonano testy relaksacji naprężeń i pełzania w próbkach z materiału o nazwie handlowej MED610 zgodnie z opisaną wcześniej procedurą.

Wyniki przeprowadzonych badań nad wybranymi właściwościami reologicznymi materiału MED610 zostały zamieszczone w artykule [116].

Parametrem technologiczny druku 3D analizowany dla materiału MED610 to zmienna w trzech wartościach orientacja wydruku: 0°, 45°, 90°. Pozostałe parametry technologiczne druku 3D i parametry badania zostały przedstawione w tabeli 7.3.

Parametr technologiczny	Wartość
Wysokość warstwy, L _t	0,016 µm
Wykończenie powierzchni	glossy
Temperatura głowic	72°C
Parametr badań	
Obciążenie wstępne, F _p	20 N
Prędkość przemieszczenia poprzeczki maszyny w celu osiągnięcia zadanej wartości wydłużenia, v_{mm}	0,17 mm/s
Czas trwania próby, t	600 s
Relaksacja naprężeń	

Tabela 7.3. Parametry technologiczne druku 3D i parametry badań dla materiału MED 610

Odkształcenie stałe, ε_{const}	1 mm
Pełzanie	
Naprężenie stałe, σ_{const}	10 MPa

Wartości odkształcenia stałego ε_{const} i naprężenia stałego σ_{const} zostały dobrane na podstawie wcześniej przeprowadzonych testów wstępnych. Wytworzono 60 sztuk próbek dla materiału MED610 i poddano naprężeniom rozciągającym. Pojedyncza seria miała 10 powtórzeń.

Relaksacja naprężeń materiału MED610

Przed przystąpieniem do przeprowadzania testów relaksacji naprężeń każdą próbkę zmierzono i wyznaczono pole przekroju (przekrój prostokątny). Wartości średnie i odchylenia standardowe dla przekrojów prostokątnych przedstawiono w tabeli 7.4.

Tabela 7.4. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla przekrojów prostokątny próbek do testów relaksacji naprężeń – materiał MED610

Orientacja wydruku	0 °	45 °	90 °
\overline{x}	20,19 mm ²	21,02 mm ²	20,83 mm ²
SD	0,24 mm ²	$0,32 \text{ mm}^2$	$0,32 \text{ mm}^2$

Wyniki testów relaksacji dla trzech orientacji wydruku 0°, 45°, 90° przedstawiono na rysunku 7.5 wraz z oznaczeniami pojedynczych próbek.



Rys. 7.5. Zbiorcze wykresy testów relaksacji naprężeń w próbkach z materiału MED 610: a) orientacja wydruku P_d^0 , b) orientacja wydruku P_d^{45} , c) orientacja wydruku P_d^{90}

Dla każdej eksperymentalnej krzywej relaksacji naprężeń dokonano aproksymacji za pomocą równania (4.49) pięcioparametrowego Maxwell-Wiecherta. Wynikiem dopasowania są parametry równania: σ_0 , σ_1 , σ_2 , t_1 , t_2 oraz współczynniki Chi^2 , R^2 . Przykładowe dopasowania modelu do krzywych eksperymentalnych próbek oznaczonych: (T^{PJM} – M^{MED610} –

$$P_d^0 - 1)^R$$
, $(T^{PJM} - M^{MED610} - P_d^{45} - 1)^R$, $(T^{PJM} - M^{MED610} - P_d^{90} - 1)^R$

przedstawiono na rysunku 7.6.



Rys. 7.6. Wykresy przykładowych dopasowań modelu Maxwella-Wiecherta do wybranych krzywych eksperymentalnych dla materiału MED610: a) próbka o kodzie: $(T^{PJM} - M^{MED610} - P_d^0 - 1)^R$, b) próbka o kodzie: $(T^{PJM} - M^{MED610} - P_d^{45} - 1)^R$,

c) próbka o kodzie:
$$(T^{PJM} - M^{MED610} - P_d^{90} - 1)^R$$

Dopasowanie modelu pięcioparametrowego Maxwella-Wiecherta do poszczególnych krzywych uzyskanych Z eksperymentu zostało przeprowadzone z zastosowaniem programu Origin. Analizując pod względem optycznym wykres 7.6 można zauważyć, że krzywa modelu (kolor czarny) pokrywa się z krzywą relaksacji (kolor czerwony). W tabeli 7.5 przedstawiono również uzyskane w wyniku aproksymacji Maxwella-Wiecherta: $\sigma_0, \sigma_0, \sigma_0, t_1^R, t_2^R$ parametry modelu oraz współczynników dopasowania Chi², R².

 Tabela 7.5. Wartości parametrów równania modelu Maxwella-Wiecherta i współczynników dopasowania dla materiału MED 610

Nr próbki	σ 0, MPa	σ ₁ , MPa	σ 2, MPa	t ₁ ^R , s	t ₂ ^R , s	Chi ²	R ²				
Kod:	$\left(\mathbf{P}_{d}^{0}-\right)^{\mathrm{R}}$										
1	7,2	2,0	1,9	13	218	0,002260	0,9941				
2	7,5	2,0	1,8	14	233	0,002620	0,9924				
3	8,4	2,0	1,8	13	214	0,002550	0,9925				
4	8,7	1,9	1,7	13	202	0,002430	0,9926				
5	9,0	1,9	1,9	18	369	0,001560	0,9953				
6	7,2	1,9	1,9	11	187	0,001070	0,9970				
7	8,0	1,9	1,8	11	181	0,001920	0,9941				
8	9,0	1,7	1,9	10	179	0,001340	0,9960				
9	8,3	2,1	2,2	11	205	0,001380	0,9971				
10	6,6	1,9	2,0	11	183	0,001090	0,9971				
\overline{x}	8,0	1,9	1,9	12	217	0,001822	0,9948				
SD	0,8	0,1	0,1	2	56	0,000609	0,0019				
u_A	0,3	0,03	0,05	1	18	0,000193	0,0006				
u _c	0,7	0,07	0,11	2	41	0,000436	0,0014				
Kod:	$\left(\mathbf{P}_{d}^{45}-\right)^{R}$										
1	7,2	1,9	1,8	16	327	0,001340	0,9957				
2	7,0	1,9	1,7	16	259	0,002780	0,9916				
3	7,6	2,0	1,8	14	257	0,001580	0,9955				
4	5,3	1,6	1,6	11	249	0,000781	0,9967				
5	6,1	1,5	1,5	11	192	0,000757	0,9967				

u _c	0,7	0,07	0,2	0,5	9	0,000131	0,0002		
u_A	0,3	0,03	0,1	0,2	4	0,000058	0,0001		
SD	0,9	0,1	0,2	1	12	0,000184	0,0003		
\overline{x}	7,0	2,0	1,9	13	222	0,001391	0,9962		
10	8,8	2,0	2,1	13	236	0,001590	0,9965		
9	6,7	2,0	1,9	13	221	0,001400	0,9961		
8	8,0	2,2	2,1	13	220	0,001720	0,9962		
7	6,5	2,0	1,8	12	214	0,001370	0,9960		
6	6,6	2,0	1,9	13	219	0,001430	0,9960		
5	7,1	1,9	1,9	11	251	0,001080	0,9968		
4	5,7	1,7	1,6	12	215	0,001180	0,9957		
3	6,2	2,0	1,8	13	211	0,001380	0,9961		
2	6,6	1,9	1,7	12	218	0,001300	0,9959		
1	7,5	2,0	2,0	13	213	0,001460	0,9964		
Kod:	$\left(\mathbf{P}_{d}^{90}-\right)^{\mathrm{R}}$								
u _c	0,7	0,2	0,2	2	34	0,000476	0,0016		
u _A	0,3	0,1	0,1	1	15	0,000211	0,0007		
SD	0,9	0,2	0,2	3	46	0,000668	0,0022		
\overline{x}	6,9	1,7	1,6	13	244	0,001247	0,9954		
10	7,1	1,9	1,9	11	251	0,001070	0,9969		
9	7,4	1,5	1,5	9	163	0,000604	0,9971		
8	6,3	1,6	1,5	13	256	0,000974	0,9955		
7	8,4	1,5	1,4	17	276	0,001820	0,9913		
6	6,3	1,5	1,6	11	210	0,000761	0,9969		

Wartości średnie współczynników Chi^2 , R^2 , przedstawione w tabeli 7.2 potwierdzają uzyskanie silnego dopasowania pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta do krzywych eksperymentalnych.

Z zawartych w tabeli 7.5 wartości niepewności aproksymacji obliczonej metodą typu A i standardowego odchylenia wynika, że dopasowanie równania (4.48) do krzywych eksperymentalnych jest właściwe. Małe wartości niepewności i odchylenia standardowego dla poszczególnych parametrów modelu wynikają z tego że parametry te zależą
od właściwości materiałowych takich jak moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej. Wyższe wartości niepewności pomiarów parametru σ_0 wynikają z trudności technicznej realizacji skoku jednostkowego podczas wykonywania testów relaksacji naprężeń. Trudność realizacji skoku jednostkowego jest widoczna na rysunku 7.5 poprzez rozrzut krzywych. W przypadku czasu relaksacji t_2^R wartości odchylenia standardowego i niepewności aproksymacji są duże. Czas relaksacji t_2^R powiązany jest z m.in. z współczynnikiem lepkości dynamicznej η_2^R , który jak pokazują przedstawione badania ma wpływ na wysokie wartości niepewności pomiarów. Przyczyna może być związana z budową fizyczną materiału w tym przypadku MED610.

Wartości średnie i odchylenia standardowe parametrów modelu Maxwella-Wiecherta i współczynników lepkości dynamicznej, uwzględniając badane orientacje wydruku 0°, 45°, 90° przedstawiono w tabeli 7.6.

Tabela 7.6. Średnie wartości i odchylenia standardowe parametrów modelu Maxwella-Wiecherta oraz współczynniki dopasowania dla materiału MED610 z uwzględnieniem orientacji wydruku.

	σ_0 , MPa	$\boldsymbol{\sigma_1},$ MPa	σ_2 , MPa	t_1^R , s	t_2^R , s	Chi ²	R ²
\overline{x}	7,3	1,9	1,8	13	228	0,001487	0,9955
SD	1,0	0,2	0,2	2	43	0,000571	0,0017

Na podstawie tabeli 7.6 można zauważyć wysokie wartości odchylenia standardowego dla parametru t_2^R jak i dla t_1^R . Dla pozostałych parametrów modelu Maxwella-Wiecherta uzyskano niskie wartości odchylenia standardowego.

Uzyskane średnie wartości parametrów naprężeń $\bar{\sigma}_0$, $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$, średnich czasów relaksacji \bar{t}_1^R , \bar{t}_2^R zawartych w tabeli 7.5 i stałego zadanego odkształcenia ε_0 (0,02) wyznaczono moduły sprężystości E_0^R , E_1^R , E_2^R oraz współczynniki lepkości dynamicznej η_1^R , η_2^R . Wartości tych modułów sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej przedstawiono odpowiednio na rysunkach 7.7 i 7.8.



Rys. 7.7. Wartości modułów sprężystości dla materiału MED610 - relaksacja naprężeń

Moduł zastępczy E_z^R to suma pojedynczych modułów sprężystości. Orientacja wydruku 0° była tą dla której osiągnięto najwyższą wartość modułu zastępczego. Największą wartość osiągnięto dla modułu sprężystości E_0^R , natomiast pozostałe moduły sprężystości E_1^R , E_2^R nie różniły się zbytnio między sobą.



Rys. 7.8. Wartości współczynników lepkości dynamicznej dla materiału MED610 – relaksacja naprężeń

Różnice w wartościach współczynników η_1^R nie są zbyt duże, tak samo w przypadku współczynnika η_2^R .

Wykresy relaksacji dla próbek drukowanych w trzech orientacjach wydruku 0° , 45° , 90° , otrzymane na podstawie równania i parametrów zawartych w tabeli 7.5. przedstawiono na rysunkach 7.9-7.11.



Rys. 7.9. Wykres relaksacji naprężeń w materiale MED610 dla orientacji wydruku P_d^0 : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R , t_2^R – czasy relaksacji



Rys.7.10. Wykres relaksacji naprężeń w materiale MED610 dla orientacji wydruku P_d^{45} : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R , t_2^R – czasy relaksacji



Rys. 7.11. Wykres relaksacji naprężeń w materiale MED610 dla orientacji wydruku P_d^{90} : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R , t_2^R – czasy relaksacji

Na rysunkach 7.9-7.11 zaznaczono czasy relaksacji t_1^R i t_2^R , które są związkami modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej, oraz naprężenia początkowe σ_{t0} i naprężenie końcowe σ_{tn} . Naprężenie końcowe σ_{tn} to granica funkcji $\sigma(t)$ do której dążą otrzymane drogą aproksymacji krzywej relaksacji. Trzeba tu podkreślić, że eksperymenty wykonujemy w określonym czasie (600 s), ale otrzymanie poprzez dopasowanie określonych współczynników pozwala ekstrapolować krzywą relaksacji na dalsze obszary czasowe.

Wartości relaksacji naprężeń po założonym czasie ekspozycji (600 s) obliczone na podstawie wzoru (6.3) przedstawiono w tabeli 7.7.

Tabela 7.7. Wartości relaksacji naprężeń po założonym czasie ekspozycji dla materiału MED610

$R_{\sigma},\%$									
Orientacja wydruku	0°	45 [°]	90°						
\overline{x}	36,5	36,2	39,6						
SD	3,1	3,4	1,9						

Analizując tabele 7.7 można zauważyć, że największa średnia relaksacji naprężeń była dla orientacji wydruku 90° (39,6%). Natomiast najmniejszą średnią wartość relaksacji naprężeń uzyskano dla orientacji wydruku 45° (36,2%).

Podsumowanie

Technologia PJM bardzo często znajduje zastosowanie do wytwarzania elementów medycznych np.: protez, ortez. W związku z tym istotne jest poszerzenie wiedzy na temat właściwości materiałowych. W tym przypadku badano pod względem właściwości relaksacyjnych materiał MED610.

Obliczenie niepewności aproksymacji parametrów modelu Maxwell-Wiecherta i współczynników Chi^2 , R^2 potwierdza silne dopasowanie. Opis eksperymentalnych krzywych relaksacji przy pomocy modelu ciała idealnego ma duże znaczenie z uwagi na otrzymanie modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej, mających fizykalne znaczenie.

Badania wykazały anizotropię właściwości z uwagi na orientacje wydruku, czyli ustawienie obiektu na platformie roboczej. Anizotropia ta nie była duża jak pokazują różnice w wartościach współczynników lepkości dynamicznej.

Porównując wartości modułów sprężystości przedstawionych na rysunku 7.3 można stwierdzić że nie ma znaczących różnic między nimi dla poszczególnych orientacji wydruku. Istotne różnice istnieją, ale w ramach tej samej orientacji wydruku np.: E_0^R jest wielokrotnie większy niż moduły E_1^R , E_2^R .

Wyniki badań potwierdzają tezę, która brzmi: zjawisko relaksacji naprężeń występujące w materiale MED 610 wytworzonym technologią utwardzania akrylowych żywic polimerowych PJM, przy założonych parametrach technologicznych, opisać można przy pomocy modelu pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta, którego moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej wyznaczyć można z dokładnością umożliwiającą ich stosowanie w obliczeniach inżynierskich.

Pełzanie materiału MED610

Przed przystąpieniem do przeprowadzania testów pełzania każdą próbkę zmierzono i wyznaczono pole przekroju (przekrój prostokątny).

Wartości średnie i odchylenia standardowe dla przekrojów kwadratowych przedstawiono w tabeli 7.8.

Tabela 7.8. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla przekrojów prostokątny próbek do testów pełzania – MED 610

Orientacja wydruku	0 °	45 °	90°
\overline{x}	20,43 mm ²	20,67 mm ²	21,40 mm ²
SD	0,08 mm ²	0,52 mm ²	0,29 mm ²

W wyniku przeprowadzonych testów pełzania uzyskano krzywe pełzania modeli wytwarzanych przyrostowo w technologii PJM z materiału medycznego MED610 i zaprezentowano je na rysunku 7.12.



Rys. 7.12. Zbiorcze wykresy testów pełzania dla materiału MED 610: a) orientacja wydruku P_d^0 , b) orientacja wydruku P_d^{45} , c) orientacja wydruku P_d^{90}

Dla każdej krzywej pełzania przeprowadzono aproksymacje modelu pięcioparametrowego Kelvina-Voighta. Wynikiem dopasowania są parametry równania: $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, t_1^P, t_2^P$ oraz współczynniki *Chi*², *R*². Aproksymacje równania do poszczególnych wyników uzyskanych eksperymentów zostało przeprowadzone z zastosowanie oprogramowania Origin. Przykładowe wyniki tych dospawań na próbkach o oznaczeniu: $(T^{PJM} - M^{MED610} - P_d^0 - 1)^P$, $(T^{PJM} - M^{MED610} - P_d^{45} - 1)^P$, $(T^{PJM} - M^{MED610} - P_d^{90} - 1)^P$ przedstawiono na rysunku 7.13.



Rys. 7.13. Wykresy przykładowych dopasowań modelu Kelvina-Voighta do krzywych eksperymentalnych – materiał MED 610: a) próbka o kodzie: $(T^{PJM} - M^{MED610} - P_d^0 - 1)^P$, b) próbka o kodzie: $(T^{PJM} - M^{MED610} - P_d^{45} - 1)^P$, c) próbka o kodzie: $(T^{PJM} - M^{MED610} - P_d^{90} - 1)^P$

Na podstawie rysunku 7.13 można zauważyć, pokrycie krzywej eksperymentalnej (kolor czarny) z krzywą modelu reologicznego (kolor czerwony).

Parametry równania $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, t_1^P, t_1^P$ pięcioparametrowego modelu Kelvina-Voighta i współczynniki dopasowania *Chi*², *R*² uzyskane w wyniku aproksymacji dla każdej pojedynczej próbki przedstawiono w tabeli 7.9.

Nr próbki	ε ₀ , %	ε ₁ ,%	ε2, %	<i>t</i> ^{<i>P</i>} ₁ , s	t ₂ ^{<i>P</i>} , s	Chi ²	R ²
Kod:				$\left(\mathbf{P}_{d}^{0}-\right)^{\mathrm{P}}$			
1	1,5	0,3	0,2	300	25	0,000003	0,9995
2	1,3	0,3	0,2	280	21	0,000008	0,9989
3	1,5	0,3	0,2	281	22	0,000009	0,9991
4	1,5	0,3	0,2	284	24	0,000008	0,9993
5	1,5	0,3	0,2	288	22	0,000006	0,9991
6	1,5	0,3	0,2	288	23	0,000005	0,9993
7	1,4	0,3	0,2	283	22	0,000006	0,9992
8	1,3	0,3	0,2	284	23	0,000006	0,9992
9	1,5	0,3	0,2	268	21	0,000007	0,9990
10	1,5	0,3	0,2	293	24	0,000005	0,9993
x	1,4	0,3	0,2	285	23	0,000006	0,9992
SD	0,1	0,03	0,02	9	1	0,000001	0,0001
u _A	0,02	0,01	0,01	3	0,5	0,000001	0,0001
u _c	0,05	0,02	0,02	7	1	0,000002	0,0002
Kod:				$\left(\mathbf{P}_{d}^{45}-\right)^{\mathrm{I}}$	2		
1	1,7	0,3	0,2	305	36	0,000006	0,9994
2	1,6	0,3	0,2	274	22	0,000003	0,9997
3	1,7	0,3	0,2	251	21	0,000003	0,9997
4	1,4	0,3	0,2	357	27	0,000010	0,9989
5	1,4	0,3	0,2	300	24	0,000005	0,9995
6	1,4	0,3	0,2	322	25	0,000005	0,9993
7	1,4	0,4	0,2	301	23	0,000008	0,9993
8	1,4	0,3	0,2	293	22	0,000009	0,9990
9	1,4	0,3	0,2	289	25	0,000007	0,9994

 Tabela 7.9. Wartości parametrów równania modelu Kelvina-Voighta i współczynników dopasowania – materiał MED610

10	1,5	0,3	0,2	325	30	0,000004	0,9996
x	1,5	0,3	0,2	302	26	0,000006	0,9994
SD	0,1	0,0	0,0	29	4	0,000002	0,0003
u _A	0,05	0,01	0,01	9	1	0,000001	0,0001
u _c	0,11	0,02	0,02	20	2	0,000002	0,0002
Kod:				$\left(\mathbf{P}_{d}^{90}-\right)^{l}$	P		
1	1,3	0,3	0,2	284	23	0,000007	0,9992
2	1,5	0,3	0,2	271	20	0,000008	0,9990
3	1,5	0,3	0,2	291	24	0,000005	0,9993
4	1,5	0,3	0,2	286	22	0,000007	0,9991
5	1,5	0,3	0,2	292	24	0,000006	0,9993
6	1,4	0,3	0,2	295	24	0,000005	0,9993
7	1,5	0,3	0,2	295	25	0,000005	0,9994
8	1,4	0,3	0,2	270	20	0,000009	0,9991
9	1,6	0,3	0,2	302	25	0,000005	0,9994
10	1,4	0,3	0,2	272	21	0,000008	0,9990
x	1,5	0,3	0,2	286	23	0,000007	0,9992
SD	0,1	0,01	0,02	11	2	0,000002	0,0002
u _A	0,02	0,003	0,01	4	1	0,000001	0,0001
u _c	0,05	0,007	0,02	9	2	0,000002	0,0002

Z zawartych w tabeli 7.9 wartości niepewności aproksymacji obliczonej metodą typu A wynika że osiągnięto silne dopasowane równania do krzywych eksperymentalnych. Małe wartości niepewności obliczone dla poszczególnych parametrów $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, t_1^P, t_1^P$ zależą od właściwości materiałowych takich jak moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej. Rozrzut krzywych pełzania przedstawiony na rysunku 7.8 wynika z trudności technicznej związanej z realizacją skoku jednostkowego podczas przeprowadzania eksperymentów.

Należy pamiętać, że w przypadku pełzania czasy t_1^P , t_2^P są czasami retardacji, czyli opóźnienia sprężystego modeli składowych. Dla czasu retardacji t_1^P wartości odchylenia standardowego i niepewności aproksymacji są duże. Czas retardacji t_1^P powiązany jest z m.in. z współczynnikiem lepkości dynamicznej η_1^P , który jak pokazują przedstawione badania ma wpływ na wysokie wartości niepewności pomiarów. Przyczyna może być związana z budową fizyczną materiału w tym przypadku MED610.

Wartości średnie i odchylenie standardowe parametrów modelu pięcioparametrowego Kelvina-Voighta i współczynników dopasowania, uwzględniając badane orientacje wydruku 0°, 45°, 90° przedstawiono w tabeli 7.10.

Tabela 7.10. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla parametrów modelu Kelvina-Voighta oraz współczynniki dopasowania – materiał MED610

	ε ₀ ,%	ε ₁ ,%	ε ₂ ,%	t ₁ ^{<i>p</i>} , s	t ₂ ^{<i>p</i>} , s	Chi ²	R ²
x	1,5	0,3	0,2	291	24	0,000006	0,9993
SD	0,1	0,03	0,02	20	3	0,000002	0,0002

Z zwartych w tabeli 7.10 danych można zauważyć wysokie wartości odchylenia standardowego dla parametru t_2^P jak i dla t_1^P . Dla pozostałych parametrów modelu Kelvina-Voighta uzyskano niskie wartości odchylenia standardowego.

Na podstawie średnich wartości parametrów $\bar{\varepsilon}_0$, $\bar{\varepsilon}_1$, $\bar{\varepsilon}_2$, \bar{t}_1^P , \bar{t}_2^P i zadanego stałego naprężenia σ_{const} (10 MPa) obliczono moduły sprężystości E_0^P , E_1^P , E_2^P oraz współczynniki lepkości dynamicznej η_1^P , η_2^P . Wartości modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej przedstawiono na rysunkach odpowiednio 7.14 i 7.15.



Rys. 7.14. Wartości modułów sprężystości dla materiału MED610 – pełzanie

Najwyższą wartość modułu zastępczego E_z^P obliczoną ze wzoru (4.80) osiągnięto dla orientacji wydruku 0°. Pozostałe wartości modułów sprężystości nie różniły się zbytnio między sobą dla poszczególnych orientacji wydruk.



Rys. 7.15. Wartości współczynników lepkości dynamicznej dla materiału MED610 – pełzanie

Z rysunku 7.15 wynika że najwyższą wartość współczynnika lepkości dynamicznej η_1^P uzyskano dla orientacji wydruku 0°. W przypadku współczynnika lepkości dynamicznej η_2^P , największą wartość osiągnięto dla orientacji wydruku 45°.

Krzywe pełzania otrzymane na podstawie otrzymanych parametrów, których wartości zawarto w tabeli 7.9 i równania (4.75) przedstawiono na rysunkach 7.16-7.18.



Rys. 7.16. Krzywa pełzania w materiale MED610 dla orientacji wydruku P_d^0 : ε_{t0} – odkształcenie początkowe, ε_{EZ} – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^P , t_2^P – czasy retardacji



Rys. 7.17. Krzywa pełzania w materiale MED610 dla orientacji wydruku P_d^{45} : ε_{t0} – odkształcenie początkowe, ε_{EZ} – odkształcenie dla $t \to \infty$, t_1^P , t_2^P – czasy retardacji



Rys. 7.18. Krzywa pełzania w materiale MED610 dla orientacji wydruku P_d^{90} : ε_{t0} – odkształcenie początkowe, ε_{EZ} – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^P , t_2^P – czasy retardacji

Czasy retardacji t_1^p i t_2^p , które są związkami modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej, oraz odkształcenie początkowe ε_{t0} i odkształcenie końcowe ε_{EZ} oznaczono na rysunkach 7.16-7.18. Odkształcenie końcowe ε_{EZ} to granica funkcji $\varepsilon(t)$ do której dążą otrzymane drogą aproksymacji krzywej pełzania. Trzeba tu podkreślić, że eksperymenty wykonujemy w czasie (600 s), ale otrzymanie poprzez dopasowanie określonych współczynników pozwala ekstrapolować krzywą pełzania na dalsze obszary czasowe.

Wartości procentowego wzrostu odkształcenia obliczono na podstawie równania (6.4) i przedstawiono w tabeli 7.11.

Tabela 7.11. Wartości pełzania po założonym czasie ekspozycji dla materiału MED610

$R_{\varepsilon}, \%$									
Orientacja wydruku	0°	45 [°]	90°						
\overline{x}	25,6	25,9	25,7						
SD	2,1	2,6	2,1						

Najniższą wartość wzrostu odkształcenia osiągnięto dla orientacji wydruku 0°. Jednak jak można zauważyć różnice są bardzo małe.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych testów pełzania oraz otrzymanych w wyniku aproksymacji parametrów zastosowanego modelu Kelvina-Voighta stwierdzić można, że materiał MED610 wykazuje anizotropię właściwości w zależności od kierunku wydruku. Anizotropia nie jest duża co pokazują wartości współczynników lepkości dynamicznej η_1^P , η_2^P .

W przypadku porównania modułów sprężystości przedstawionych na rysunku 7.14 można stwierdzić, że nie ma istotnych różnic między tymi współczynnikami dla poszczególnych orientacji wydruku. Wysokie różnice można zauważyć w ramach tej samej orientacji wydruku np. moduł E_0^P jest kilkakrotnie większy od modułów E_1^P , E_2^P .

Wyniki badań potwierdzają tezę, która brzmi: zjawisko pełzania występuje w materiale MED 610 wytworzonym technologią utwardzania akrylowych żywic polimerowych PJM, przy założonych parametrach technologicznych, opisać można przy pomocy pięcioparametrowego modelu Kelvina-Voighta, którego moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej wyznaczyć można z dokładnością umożliwiającą ich stosowanie w obliczeniach inżynierskich.

Przeprowadzone eksperymenty poszerzają wiedzę o właściwościach pełzania materiału MED610 kształtowanego technologią PJM, co może być przydatne w projektowaniu np. protez lub ortez.

162

7.3. Materiał RGD720

Wykonano testy relaksacji naprężeń według opisane procedury w podrozdziale 7.1.

Wyniki badań zostały opublikowane oraz zaprezentowane podczas konferencji "From Smart City to Smart Factory for Sustainable Future (SCFF24)", która odbyła się 14-16 maja w Ostrawie, Czechy.

Parametrem zmiennym technologicznym druku 3D analizowanym podczas prowadzenia badań nad właściwościami relaksacyjnymi materiału RGD720 jest orientacja wydruku: 0°, 45°, 90°. Pozostałe parametry druku 3D oraz parametry badań zostały przedstawione w tabeli 7.12.

Parametr technologiczny	Wartość
Wysokość warstwy, L _t	0,016 µm
Wykończenie powierzchni	glossy
Temperatura głowic	72°C
Parametr badań	
Obciążenie wstępne, F _p	20 N
Prędkość przemieszczenia poprzeczki maszyny w celu osiągnięcia zadanej wartości wydłużenia, v_{mm}	10 mm/s
Czas trwania próby, t	600 s
Relaksacja naprężeń	
Odkształcenie stałe, ε_{const}	0,63 mm

Tabela 7.12. Parametry technologiczne druku 3D i parametry badań dla materiału RGD720

Wartość odkształcenia stałego ε_{const} zostało dobrane na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań wstępnych. Wytworzono łącznie 30 próbek, po 10 sztuk dla każdej orientacji wydruku. Próbki poddano naprężeniom ściskającym.

Relaksacja naprężeń materiału RGD720

Przed przystąpieniem do przeprowadzania testów relaksacji naprężeń zmierzono i obliczono pole przekroju (przekrój okrągły) próbek. Wartości przekroju przedstawiono w tabeli 7.13.

Tabela 7.13. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla przekrojów okrągłych próbek do testów relaksacji – materiał RGD720

Orientacja wydruku	0 °	45 °	90 °
\overline{x}	132,63 mm ²	131,92 mm ²	132,33 mm ²
SD	0,32 mm ²	1,95 mm ²	1,28 mm ²

Wyniki testów relaksacji naprężeń w postaci zbiorczych krzywych dla poszczególnych orientacji wydruków zaprezentowano na rysunku 7.19.



Rys. 7.19. Zbiorcze wykresy testów relaksacji naprężeń dla materiału RGD720: a) orientacja wydruku P_d^0 , b) orientacja wydruku P_d^{45} , c) orientacja wydruku P_d^{90}

Dla każdej krzywej relaksacji naprężeń dokonano aproksymacji przy pomocy równania (4.48). Dopasowanie zostało przeprowadzone z zastosowanie programu Origin, a wyniki tych działań pokazano na przykładowych krzywych eksperymentalnych o oznaczeniach: $(T^{PJM} - M^{RGD720} - P_d^0 - 1)^P$, $(T^{PJM} - M^{RGD720} - P_d^{45} - 1)^P$, $(T^{PJM} - M^{RGD720} - P_d^{90} - 1)^P$ znajdujących się na rysunku 7.20.



Rys. 7.20. Wykresy przykładowych dopasowań modelu Kelvina-Voighta do krzywych eksperymentalnych – materiał RGD720: a) próbka o kodzie: $(T^{PJM} - M^{RGD720} - P_d^0 - 1)^R$, b) próbka o kodzie: $(T^{PJM} - M^{RGD720} - P_d^{45} - 1)^R$, c) próbka o kodzie: $(T^{PJM} - M^{RGD720} - P_d^{45} - 1)^R$

Na podstawie rysunku 7.20 można zauważyć, że krzywa modelu Kelvina-Voighta (kolor czerwony) pokrywa się z krzywą eksperymentalną (kolor czarny). Wyniki dopasowań w postaci parametrów modelu σ_0 , σ_1 , σ_2 , t_1^R , t_2^R oraz współczynniki dopasowania Chi^2 , R^2 zestawiono w tabeli 7.14.

Nr próbki	σ 0, MPa	σ ₁ , MPa	σ 2, MPa	t_1^R , s	t_2^R , s	Chi ²	R ²
Kod:				$\left(\mathbf{P}_{d}^{0}-\right)^{\mathrm{R}}$			
1	10,0	0,2	0,3	14	296	0,000024	0,9967
2	10,2	0,2	0,4	16	297	0,000023	0,9978
3	9,0	0,3	0,4	16	293	0,000028	0,9981
4	9,6	0,3	0,5	18	318	0,000034	0,9981
5	9,4	0,2	0,3	16	296	0,000020	0,9980
6	9,8	0,2	0,4	17	305	0,000027	0,9980
7	9,5	0,3	0,6	19	315	0,000042	0,9983
8	9,8	0,2	0,4	16	299	0,000020	0,9981
9	8,9	0,2	0,4	19	307	0,000017	0,9988
10	10,0	0,2	0,3	17	290	0,000024	0,9976
\overline{x}	9,6	0,2	0,4	17	302	0,000026	0,9979
SD	0,4	0,03	0,1	1	9	0,000008	0,0005
u_A	0,1	0,01	0,02	0,4	3	0,000002	0,0002
u _c	0,2	0,02	0,05	0,9	7	0,000005	0,0005
Kod:				$\left(\mathbf{P}_{d}^{45}-\right)^{\mathrm{R}}$			
1	9,0	0,4	0,5	14	260	0,000068	0,9968
2	9,8	0,3	0,5	17	277	0,000048	0,9979
3	9,9	0,3	0,5	17	307	0,000043	0,9977
4	9,0	0,4	0,6	16	274	0,000073	0,9975
5	9,4	0,4	0,7	19	316	0,000065	0,9982
6	9,2	0,4	0,6	16	275	0,000063	0,9976
7	9,0	0,3	0,4	15	281	0,000045	0,9971
8	8,8	0,4	0,5	15	277	0,000071	0,9972
9	9,7	0,3	0,4	16	278	0,000038	0,9977
10	9,6	0,4	0,5	17	291	0,000052	0,9978
\overline{x}	9,3	0,4	0,5	16	284	0,000057	0,9975
SD	0,4	0,04	0,1	1	16	0,000013	0,0004

Tabela7.14.Wartości parametrów równania modelu Maxwella-Wiechertai współczynników dopasowania dla materiału RGD720

u _A	0,1	0,01	0,02	0,4	5	0,000004	0,0001
u _c	0,2	0,02	0,05	0,9	11	0,000009	0,0002
Kod:				$\left(\mathbf{P}_{d}^{90}-\right)^{\mathrm{R}}$			
1	9,7	0,4	0,4	14	252	0,000059	0,9966
2	9,9	0,2	0,3	14	260	0,000027	0,9967
3	9,1	0,4	0,6	15	269	0,000091	0,9972
4	9,7	0,3	0,4	15	291	0,000033	0,9973
5	9,2	0,4	0,5	16	292	0,000059	0,9976
6	10,2	0,3	0,4	14	279	0,000035	0,9969
7	9,8	0,2	0,3	16	284	0,000032	0,9970
8	9,5	0,3	0,4	16	297	0,000035	0,9972
9	10,0	0,2	0,3	16	300	0,000020	0,9971
10	9,5	0,4	0,5	15	283	0,000055	0,9976
\overline{x}	9,7	0,3	0,4	15	281	0,000045	0,9971
SD	0,4	0,1	0,1	1	16	0,000021	0,0003
u_A	0,1	0,02	0,03	0,2	5	0,000007	0,0001
u _c	0,2	0,05	0,07	0,5	11	0,000016	0,0002

Z zawartych w tabeli 7.14 wartości niepewności aproksymacji i odchylenia standardowego wynika że dopasowanie modelu pięcioparametrowego Maxwella-Wiecherta do krzywych eksperymentalnych jest właściwe. Małe wartości niepewności i odchylenia standardowego dla poszczególnych parametrów krzywych eksperymentalnych, wynikają z tego, że parametry te zależą od właściwości materiałowych takich jak moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej. Rozrzut krzywych relaksacji naprężeń widoczny na rysunku 7.19 oraz na wyższych wartościach niepewności pomiaru parametru σ_0 wynika z trudności technicznej, polegającej na realizacji skoku jednostkowego podczas wykonywania testów relaksacji.

Dla czasu relaksacji t_2^R wartości odchylenia standardowego i niepewności aproksymacji są duże. Czas relaksacji t_2^R powiązany jest z m.in.

z współczynnikiem lepkości dynamicznej η_2^R , który jak pokazują przedstawione wyniki badań ma wpływ na wysokie wartości niepewności pomiarów. Ma to związek z budową fizyczną materiału |w tym przypadku RGD720.

Wartości średnie i odchylenia standardowe parametrów modelu Maxwella-Wiecherta i współczynników lepkości dynamicznej, uwzględniając badane orientacje wydruku 0°, 45°, 90° przedstawiono w tabeli 7.15.

 Tabela 7.15. Wartości średnie i odchylenia standardowe parametrów modelu Maxwella

 Wiecherta oraz współczynniki dopasowania z uwzględnieniem badanych orientacji wydruku

 – materiał RGD720

	σ_0 , MPa	σ_1 , MPa	σ_2 , MPa	t_{1}^{R} , s	t ₂ ^{<i>R</i>} , s	Chi ²	R ²
\overline{x}	9,5	0,3	0,4	16	289	0,000042	0,9975
SD	0,4	0,1	0,1	1	17	0,000019	0,0005

Na podstawie zwartych w tabeli 7.15 wartości można zauważyć wysokie wartości odchylenia standardowego dla parametru t_1^R jak i dla t_2^R . Dla pozostałych parametrów modelu Maxwella-Wiecherta uzyskano niskie wartości odchylenia standardowego.

Z zwartych w tabeli 7.14 średnich wartości parametrów $\bar{\sigma}_0, \bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{t}_1^R, \bar{t}_2^R$ oraz stałego odkształcenia obliczono moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej które przedstawiono na wykresach odpowiednio 7.21 i 7.22.



Rys. 7.21. Wartości modułów sprężystości dla materiału RGD720 - relaksacja naprężeń

Na podstawie rysunku 7.21 można stwierdzić, że największą wartość modułu zastępczego E_z^R osiągnięto dla orientacji wydruku 90°, natomiast najmniejsza wartość dla 45°.



Rys. 7.22. Wartości współczynników lepkości dynamicznej dla materiału RGD720 – relaksacja naprężeń

Największe wartości współczynników lepkości dynamicznej η_1^R , η_2^R osiągnięto dla orientacji wydruku 45°.

Krzywe relaksacji naprężeń otrzymane na podstawie parametrów, których wartości zawarto w tabeli 7.14 i równania (4.46) przedstawiono na rysunkach 7.23-7.25.



Rys. 7.23. Wykres relaksacji naprężeń w materiale RGD720 dla orientacji wydruku P_d^0 : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R , t_2^R – czasy relaksacji



Rys. 7.24. Wykres relaksacji naprężeń w materiale RGD720 dla orientacji wydruku P_d^{45} : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R , t_2^R – czasy relaksacji



Rys. 7.25. Wykres relaksacji naprężeń w materiale RGD720 dla orientacji wydruku $P_d^0: \sigma_{t0}$ – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R, t_2^R – czasy relaksacji

Na rysunkach 7.23-7.25 zaznaczono czasy relaksacji t_1^R i t_2^R , które są związkami modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej. Naprężenia początkowe σ_{t0} i naprężenie końcowe σ_{tn} również oznaczono na tych rysunkach. Dzięki obliczeniu naprężenia końcowego σ_{tn} możliwe jest ekstrapolowanie krzywą relaksacji na dalsze obszary czasowe.

Wartości relaksacji naprężeń po założonym czasie ekspozycji (600 s) obliczone na podstawie wzoru przedstawiono w tabeli 7.16.

Tabela 7.16. Wartości relaksacji naprężeń po założonym czasie ekspozycji dla materiału RGD720

$R_{\sigma}, \%$						
Orientacja wydruku	0°	45 [°]	90°			
\overline{x}	6,6	9,3	7,6			
SD	1,0	1	1,8			

Analizując tabele 7.16 można zauważyć, że największa średnia relaksacji naprężeń była dla orientacji wydruku 45°. Natomiast najmniejszą średnią wartość relaksacji naprężeń uzyskano dla orientacji wydruku 0°.

Podsumowanie

Różnice między wartościami modułów sprężystości dla poszczególnych orientacji wydruku nie są znaczące. Istotne różnice istnieją, ale w ramach tego samego kierunku np. moduł sprężystości E_0^R jest kilkakrotnie większy od modułów sprężystości E_1^R , E_2^R .

Materiał RGD720 nie wykazuje dużej anizotropowości relaksacji naprężeń ze względu na orientacje wydruku, co widać na rysunkach 7.21 i 7.22.

Na podstawie wartości współczynników lepkości dynamicznej η_1^R i η_2^R stwierdzono, że występuje anizotropia właściwości reologicznych ze względu na orientacje wydruku.

Wartości współczynników dopasowania R^2 i *Chi*² oraz oszacowane w drodze aproksymacji wartości parametrów funkcji relaksacji potwierdzają przydatność przyjętego pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta do opisu krzywych eksperymentalnych. Opis krzywej relaksacji naprężeń przy pomocy modelu ciała idealnego z określoną dokładnością ma duże znaczenie z uwagi na fizykalny charakter otrzymanych parametrów.

7.4. Materiał ABS P430

Wykonano testy relaksacji naprężeń i pełzania zgodnie z przedstawioną w podrozdziale 7.1 procedurą.

Wyniki przeprowadzonych badań nad wybranymi właściwościami reologicznymi materiału ABS P430 zostały zamieszczone w artykule [117].

Parametr technologiczny druku 3D zmienny analizowany w badaniach to orientacja wydruku: 0°,45°,90° i wysokość warstwy: 0,254 mm i 0,33 mm. Pozostałe parametry technologiczne druku 3D jak i parametry badań zostały przedstawione w tabeli 7.17.

Parametr technologiczny	Wartość		
Wypełnienie	high density		
Temperatura komory roboczej	75°C		
Temperatura dysz	285°C		

Tabela 7.17. Parametry technologiczne druku 3D i parametry badań dla materiału ABS P430

Parametr badań				
Obciążenie wstępne, F _p	50 N			
Prędkość przemieszczenia poprzeczki maszyny w celu osiągnięcia zadanej wartości wydłużenia, v_{mm}	10 mm/s			
Czas trwania próby, <i>t</i>	600 s			
Relaksacja naprężeń				
Odkształcenie stałe, $\varepsilon_{const.}$	1 mm			
Pełzanie				
Naprężenie stałe, $\sigma_{const.}$	0,5 MPa			

Łączna liczba próbek wytworzonych w technologii MEX dla materiału ABS P430 to 120; 60 sztuk dla testów relaksacji i 60 sztuk dla testów pełzania. Dla jednej serii wykonano 10 potworzeń. Próbki poddano naprężeniom rozciągającym.

Relaksacja naprężeń materiału ABS P430

Przed przystąpieniem do przeprowadzania testów relaksacji naprężeń każdą próbkę zmierzono i wyznaczono pole przekroju (przekrój prostokątny). Wartości średnie i odchylenia standardowe dla przekrojów prostokątny przedstawiono w tabeli 7.18.

Tabela 7.18. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla przekrojów kwadratowych próbek do testów relaksacji naprężeń – materiał ABS P430.

Orientacja wydruku	0 °	45 °	90 °	L _t , mm	
\overline{x}	21,71 mm ²	21,68	21,42		
		mm ²	mm ²	0,254	
SD	0,01 mm ²	$0,02 \text{ mm}^2$	0,01 mm ²		
\overline{x}	22,44	20,96	21,21		
	mm ²	mm ²	mm ²	0,33	
SD	0,02 mm ²	0,01 mm ²	0,01 mm ²		

Wyniki testów relaksacji naprężeń dla trzech orientacji wydruku 0° , 45°, 90° i dwóch orientacji wydruku 0,254 mm; 0,33 mm przedstawiono na rysunku 7.26 i 7.27 wraz z oznaczeniami pojedynczych próbek.



Rys. 7.26. Wykresy testów relaksacja naprężeń dla materiału ABS P430 i wysokości warstwy L_t^{0254} : a) orientacja wydruku P_d^0 , b) orientacja wydruku P_d^{45} , c) orientacja wydruku P_d^{90}



Rys. 7.27. Wykresy testów relaksacji naprężeń dla materiału ABS P430 i wysokości warstwy L_t^{033} : d) orientacja wydruku P_d^0 , e) orientacja wydruku P_d^{45} , f) orientacja wydruku P_d^{90}

Dla każdego pojedynczego przeprowadzonego testu relaksacji naprężeń dokonano aproksymacji pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta przy pomocy równania (4.48). Rysunki 7.28 i 7.29 przedstawiają przykładowe dopasowania modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych próbek: $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^0 - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0554} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0554} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0554} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0554} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0554} - P_d^{05} - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0554} - P_d^{05} - 1)^R$

$$M^{ABS} - L_t^{033} - P_d^0 - 1)^{R}, \quad (T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{033} - P_d^{45} - 1)^{R}, \quad (T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{033} - P_d^{90} - 1)^{R}.$$



Rys. 7.28. Wykresy dopasowania modelu Maxwella-Wiecherta do wybranych krzywych eksperymentalnych dla materiału ABS P430 i wysokości warstwy L_t^{0254} : a) próbka o kodzie ($T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^0 - 1$)^R, b) próbka o kodzie ($T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{45} - 1$)^R, c) próbka o kodzie ($T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^{90} - 1$)^R



Rys. 7.29. Przykładowe wykresy dopasowania modelu Maxwella-Wiecherta do wybranych krzywych eksperymentalnych dla materiału ABS P430 i wysokości warstwy

 L_t^{033} : d) próbka o kodzie $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{033} - P_d^0 - 1)^R$, e) próbka o kodzie $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{033} - P_d^{45} - 1)^R$, f) próbka o kodzie $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{033} - P_d^{90} - 1)^R$

Widoczne na rysunkach 7.28 i 7.29 krzywe modelu Maxwella-Wiecherta (kolor czerwony) pokrywają się z krzywymi eksperymentalnymi (kolor czarny).

W wyniku przeprowadzenia aproksymacji uzyskano wartości parametrów modelu Maxwella-Wiecherta σ_0 , σ_1 , σ_2 , t_1^R , t_2^R i współczynniki dopasowania *Chi*², R^2 , które przedstawiono w tabelach 7.19 i 7.20.
Nr próbki	σ 0,MPa	σ ₁ , MPa	σ ₂ , MPa	t ₁ ^{<i>R</i>} , s	t ₂ ^{<i>R</i>} , s	Chi ²	R ²			
Kod		$\left(L_t^{0254} - P_d^0 - *\right)^R$								
1	8,2	1,0	0,7	9	185	0,000516	0,9912			
2	7,8	1,0	0,8	9	187	0,000525	0,9912			
3	8,3	1,0	0,8	9	189	0,000529	0,9919			
4	8,3	1,0	0,8	9	202	0,000546	0,9908			
5	8,3	1,0	0,8	9	199	0,000544	0,9915			
6	8,8	1,0	0,8	9	205	0,000590	0,9906			
7	8,4	1,0	0,8	9	202	0,000516	0,9915			
8	8,3	1,0	0,7	8	200	0,000527	0,9909			
9	8,3	1,0	0,7	9	223	0,000546	0,9903			
10	8,3	1,0	0,8	9	200	0,000522	0,9914			
\overline{x}	8,3	1,0	0,8	9	199	0,000536	0,9911			
SD	0,2	0,02	0,02	0,4	11	0,000022	0,0005			
u_A	0,1	0,01	0,01	0,1	3	0,000007	0,0002			
u _c	0,2	0,02	0,02	0,2	7	0,000016	0,0005			
Kod:			(L_t^{025})	$^{4} - P_{d}^{45}$	-*) ^R					
1	7,8	1,1	0,8	10	211	0,000669	0,9902			
2	7,3	1,1	0,9	8	181	0,000467	0,9941			
3	7,9	1,2	0,9	8	191	0,000595	0,9927			
4	7,3	1,1	0,8	9	191	0,000671	0,9911			
5	7,5	1,2	0,9	8	193	0,000662	0,9921			
6	7,0	1,2	0,9	8	188	0,000692	0,9912			
7	7,5	1,1	0,8	10	209	0,000633	0,9915			
8	7,3	1,2	0,9	9	186	0,000630	0,9920			
9	7,6	1,1	0,9	9	190	0,000641	0,9916			
10	7,4	1,1	0,9	9	189	0,000585	0,9924			
\overline{x}	7,5	1,1	0,9	9	193	0,000624	0,9919			
SD	0,3	0,03	0,03	1	10	0,000065	0,0011			
<i>u</i> _A	0,1	0,01	0,01	0,2	3	0,00002	0,0003			
u _c	0,2	0,02	0,02	0,5	7	0,00005	0,0007			
Kod:			(L_t^{025})	$\frac{4}{2} - P_d^{90}$	$-*)^{R}$					
1	7,9	1,0	0,8	9	177	0,000589	0,9904			

Tabela7.19.Wartości parametrów równania modelu Maxwella-Wiechertai współczynników dopasowania dla materiału ABS P430; LtL0254

2	7,9	1,0	0,8	8	186	0,000471	0,9929
3	7,5	1,1	0,8	8	200	0,000530	0,9917
4	7,9	1,1	0,8	8	189	0,000517	0,9924
5	8,4	1,1	0,9	9	206	0,000649	0,9916
6	8,1	1,1	0,8	9	187	0,000571	0,9916
7	7,8	1,1	0,9	8	185	0,000592	0,9922
8	7,4	1,1	0,8	9	213	0,000572	0,9921
9	8,1	1,1	0,9	8	178	0,000568	0,9922
10	8,5	1,1	0,8	9	191	0,000589	0,9913
\overline{x}	7,9	1,1	0,8	9	191	0,000565	0,9918
SD	0,3	0,03	0,04	0,4	12	0,000049	0,0007
u_A	0,1	0,01	0,01	0,1	4	0,000015	0,0002
u _c	0,2	0,02	0,02	0,2	9	0,000034	0,0005

Z zawartych w tabeli 7.19 wartości niepewności aproksymacji i standardowego odchylenia wynika, że dopasowanie równania (4.48) do krzywych eksperymentalnych jest właściwe. Małe wartości odchylenia standardowego i niepewności obliczone dla poszczególnych parametrów krzywych relaksacji wynikają z tego, że parametry te zależą od właściwości materiałowych takich jak moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej. Widoczny na rysunku 7.28 rozrzut krzywych jest związany z trudnością w realizacji skoku jednostkowego realizowanego podczas wykonywania testów relaksacji naprężeń. Trudność ta ma wpływ również na duże wartości niepewności i odchylenia standardowego dla parametru σ_0 modelu Maxwella-Wiecherta. Wysokie wartości odchylenia standardowego i niepewności dla czasu relaksacja t_2^R są związane z współczynnikiem lepkości dynamicznej η_2^R . Lepkość dynamiczna jest związana m.in. z budową fizyczną materiału w tym przypadku ABS P430.

Nr próbki	$\pmb{\sigma_0}$, MPa	σ 1, MPa	σ ₂ , MPa	t ₁ ^{<i>R</i>} , s	t ₂ ^{<i>R</i>} , s	Chi ²	R ²
Kod:			(L_t^{03})	${}^{3}-P_{d}^{0}$	$-*)^{R}$		
1	8,3	1,1	0,8	9	187	0,000612	0,9901
2	8,1	1,1	0,8	8	174	0,000555	0,9914
3	7,9	1,1	0,8	8	182	0,000523	0,9917
4	8,2	1,0	0,7	9	198	0,000577	0,9900
5	8,3	1,0	0,8	8	185	0,000464	0,9930
6	7,9	1,0	0,8	8	197	0,000488	0,9920
7	8,6	1,1	0,8	8	167	0,000645	0,9907
8	8,2	1,2	0,9	9	195	0,000705	0,9915
9	8,4	1,1	0,8	8	189	0,000579	0,9913
10	7,3	1,1	0,7	8	198	0,000559	0,9902
\overline{x}	8,1	1,1	0,8	8	187	0,000571	0,9912
SD	0,4	0,1	0,05	0,4	11	0,000072	0,0009
u_A	0,1	0,02	0,01	0,1	3	0,000023	0,0003
u _C	0,2	0,05	0,02	0,2	7	0,000052	0,0007
Kod:			(L_t^{033})	$B - P_d^{45}$	$(-*)^{R}$		
1	7,0	1,3	0,9	8	200	0,000805	0,9907
2	7,2	1,2	0,9	9	201	0,000718	0,9910
3	7,7	1,3	0,9	9	198	0,000868	0,9909
4	7,3	1,2	0,9	9	202	0,000715	0,9908
5	7,6	1,3	0,9	9	197	0,000837	0,9912
6	7,3	1,1	0,8	8	201	0,000617	0,9913
7	7,6	1,2	0,9	9	214	0,000761	0,9907
8	7,1	1,2	0,9	9	207	0,000833	0,9902
9	6,8	1,3	1,0	9	198	0,000849	0,9912
10	7,2	1,3	1,0	9	196	0,000865	0,9916
\overline{x}	7,3	1,3	0,9	9	201	0,000787	0,9910
SD	0,3	0,1	0,1	0,3	5	0,000082	0,0004
u_A	0,1	0,02	0,02	0,1	2	0,000026	0,0001
u _c	0,2	0,05	0,05	0,2	5	0,000059	0,0002
Kod:			(L_t^{033})	$B^{3} - P_{d}^{90}$	$-*)^{R}$		
1	7,9	1,1	0,9	9	198	0,000656	0,9922
2	7,8	1,1	0,9	9	194	0,000636	0,9915
3	7,8	1,1	0,8	9	198	0,000580	0,9920

Tabela7.20.Wartości parametrów równania modelu Maxwella-Wiechertai współczynników dopasowania dla materiału ABS P430; L_t^{033}

4	8,7	1,1	0,8	8	181	0,000651	0,9913
5	7,7	1,1	0,8	9	196	0,000618	0,9916
6	7,5	1,0	0,7	8	182	0,000492	0,9913
7	8,5	1,1	0,8	9	192	0,000586	0,9915
8	7,6	1,1	0,8	9	204	0,000564	0,9916
9	8,6	1,1	0,9	9	205	0,000671	0,9916
10	7,2	1,1	0,8	9	195	0,000611	0,9917
\overline{x}	7,9	1,1	0,8	9	195	0,000607	0,9916
SD	0,5	0,05	0,05	0,3	8	0,000053	0,0003
u_A	0,2	0,01	0,01	0,1	3	0,000017	0,0001
u _c	0,5	0,02	0,02	0,2	7	0,000038	0,0002

Małe wartości odchyleń standardowych i niepewności dla parametrów modelu potwierdzają, że model pięcioparametrowy Maxwella-Wiecherta został właściwie dobrany do opisu krzywych relaksacja naprężeń. Duże wartości niepewności i odchylenia standardowego dla parametru σ_0 są związane z trudnością realizacji skoku jednostkowego. Rozrzut krzywych widoczny na rysunku 7.29 jest związany ze skokiem jednostkowym, a dokładnie z trudnościami w jego realizacji. Wysokie wartości dla czasu relaksacji t_2^R są związane ze współczynnikiem lepkości dynamicznej η_2^R na którego wpływ ma zachowanie budowy fizycznej materiału ABS P430 podczas testów relaksacji.

Wartości średnie i odchylenia standardowe parametrów modelu Maxwella-Wiecherta i współczynników lepkości dynamicznej, uwzględniając badane orientacje wydruku 0°, 45°, 90° oraz wysokości warstwy 0,254 mm, 0,33 mm przedstawiono w tabeli 7.21.

	σ ₀ , MPa	σ 1, MPa	σ 2, MPa	t_{1}^{R} , s	t ₂ ^R , s	Chi ²	R ²
\overline{x}	7,8	1,1	0,8	9	194	0,000615	0,9914
SD	0,5	0,1	0,1	0,4	10	0,000101	0,0008

Tabela 7.21. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla parametrów modelu Maxwella-Wiecherta oraz współczynniki dopasowania – ABS P430

Na podstawie tabeli 7.21 można zauważyć że największe wartości odchylenia uzyskano dla czasu relaksacja t_2^R . Porównując wartości parametrów modelu, można zauważyć, że nie ma istotnych różnic miedzy nimi dla poszczególnych orientacji wydruku i wysokości warstw, co potwierdzają wartości odchyleń standardowych przedstawionych w powyższej tabeli.

Korzystając ze średnich wartości parametrów $\bar{\sigma}_0, \bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{t}_1^R, \bar{t}_2^R$ i stałego odkształcenia ($\varepsilon_{const.} = 1 mm$) obliczono modułów sprężystości E_0^R, E_1^R, E_2^R , współczynników lepkości dynamicznej η_1^R, η_2^R dla materiału ABS P430. Wartości te przedstawiono na rysunkach 7.30 i 7.31.



Rys. 7.30. Wartości modułów sprężystości dla materiału ABS P430 przy wysokościach warstw L_t^{0254} oraz L_t^{033} – relaksacja naprężeń

Na podstawie danych zawartych na rysunku 7.30 można stwierdzić że największe wartości modułu zastępczego E_z^R uzyskano dla orientacji wydruku 0° w przypadku obu analizowanych wysokości warstwy. Najniższe wartości natomiast dla orientacji 45° w przypadku obu wysokości warstw.



Rys. 7.31. Wartości współczynników lepkości dynamicznej ABS P430 przy wysokościach warstw L_t^{0254} oraz L_t^{033} – relaksacja naprężeń

Z danych zawartych na rysunku 7.31 można zaobserwować, że największe wartości współczynników lepkości dynamicznej η_1^R , η_2^R uzyskano dla orientacji wydruku 45° w obu analizowanych wysokościach warstw.

Natomiast najniższe wartości tych współczynników uzyskano dla orientacji wydruk 0° w obu analizowanych wysokości warstw.

Krzywe relaksacja naprężeń uzyskane dla materiału ABS P430 ze średnich wartości parametrów modelu Maxwella-Wiecherta przedstawiono na rysunkach 7.32-7.37.



Rys. 7.32. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ABS P430 dla orientacji wydruku P_d^0 i wysokości warstwy L_t^{0254} : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R, t_2^R – czasy relaksacji



Rys. 7.33. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ABS P430 dla orientacji wydruku P_d^{45} i wysokości warstwy L_t^{0254} : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R, t_2^R – czasy relaksacji



Rys. 7.34. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ABS P430, orientacji wydruku P_d^{90} i wysokości warstwy L_t^{0254} : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R, t_2^R – czasy relaksacji



Rys. 7.35. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ABS P430 dla orientacji wydruku P_d^0 i wysokości warstwy L_t^{033} : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R, t_2^R – czasy relaksacji



Rys. 7.36. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ABS P430 dla orientacji wydruku P_d^{45} i wysokości warstwy L_t^{033} : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R, t_2^R – czasy relaksacji



Rys. 7.37. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ABS P430, orientacji wydruku P_d^{90} i wysokości warstwy L_t^{033} : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R, t_2^R – czasy relaksacji

Na rysunkach 7.32-7.37 zaznaczono czasy relaksacji t_1^R , t_2^R , które są związkami modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej. Naprężenie początkowe σ_{t0} i naprężenie końcowe σ_{tn} również zostały oznaczone na tych rysunkach. Naprężenie końcowe σ_{tn} jest asymptotą do której dąży krzywa relaksacji. Uzyskanie asymptoty pozwala ekstrapolować krzywą relaksacji na dalsze obszary czasowe.

Relaksacja naprężeń po założonym czasie ekspozycji wyznaczona została na podstawie wzoru 7.1 i przedstawiona w tabeli 7.22.

Tabela 7.22. Wyniki badań procentowy spadek naprężenia dla materiału ABS P430

		R _σ , %									
		L ⁰²⁵⁴			L ⁰³³						
	0°	45 [°]	90°	0°	45 [°]	90°					
\overline{x}	23,6	27,5	25,3	24,8	29,9	26,0					
SD	0,6	0,9	0,8	0,9	1,4	1,1					

Największe wartości średnie spadku naprężenia \overline{R}_{σ} uzyskano dla orientacji wydruku 45° dla obu wysokości warstw. Najniższą wartość średnia spadku naprężenia \overline{R}_{σ} osiągnięto dla orientacji wydruku 0° dla obu wysokości warstw. Odchylenia standardowe osiągnęły niskie wartości.

Podsumowując

Zaobserwowano anizotropię właściwości relaksacji naprężeń ze względu na orientacje wydruku, co zostało potwierdzone wartościami współczynników lepkości dynamicznej przedstawionymi na rysunku 7.31.

Porównując wartości modułów sprężystości przedstawionych na rysunku 7.30, można stwierdzać, że nie ma istotnych różnic między tymi współczynnikami dla poszczególnych orientacji wydruków oraz wysokości warstw. Istotne różnice występują dla tej samej orientacji wydruku, czyli moduł sprężystości E_0^R jest kilkukrotnie wyższy od modułów sprężystości E_1^R , E_2^R .

Wartości współczynników dopasowania Chi^2 i R^2 oraz odchylenia standardowe i niepewności potwierdzają silne dopasowanie modelu Maxwella-Wiecherta do krzywych eksperymentalnych.

Wyniki badań potwierdzają tezę, która brzmi: zjawisko relaksacji naprężeń występuje w materiale ABS P430 wytworzonym technologią ekstruzji materiału MEX, przy założonych parametrach technologicznych, opisać można przy pomocy modelu Maxwella-Wiecherta, którego moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej wyznaczyć można z dokładnością umożliwiającą ich stosowanie w obliczeniach inżynierskich.

Pełzanie materiału ABS P430

Przed przystąpieniem do testów pełzania każdą wytworzoną próbek zmierzono i obliczono pole przekroju (przekrój prostokątny). Wartości średnie i odchylenia standardowe dla pól przekrojów przedstawiono w tabeli 7.23.

Tabela 7.23. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla przekrojów prostokątny próbek do testów pełzania – materiał ABS P430

Orientacja wydruku	0 °	45 °	90°	L _t , mm
\overline{x}	21,42	21,16	20,7 mm ²	
	mm ²	mm ²		0,254
SD	0,1 mm ²	$0,2 \text{ mm}^2$	0,1 mm ²	
\overline{x}	21,90	20,7 mm ²	20,75	
	mm ²		mm ²	0,33
SD	0,81 mm ²	0,3 mm ²	0,25 mm ²	

Wyników przeprowadzonych testów pełzania materiału ABS P430 przedstawiono na rysunku 7.38 i 7.39.



Rys. 7.38. Wykresy testów pełzania dla materiału ABS P430 i wysokości warstwy L_t^{0254} : a) orientacja wydruku P_d^0 , b) orientacja wydruku P_d^{45} , c) orientacja wydruku P_d^{90}



Rys. 7.39. Wykresy testów pełzania dla materiału ABS P430 i wysokości warstwy L_t^{033} : d) orientacja wydruku P_d^0 , e) orientacja wydruku P_d^{45} , f) orientacja wydruku P_d^{90}

Dla każdej krzywej pełzania dopasowano model pięcioparametrowy Kelvina-Voighta. W wyniku tego otrzymano parametry ε_0 , ε_1 , ε_2 , t_1^P , t_2^P oraz współczynniki *Chi*², R^2 . Przykładowe aproksymacje modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych przedstawiono na przykładzie próbek $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^0 - 1)^P$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^0 - 1)^P$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^0 - 1)^P$, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^0 - 1)^P$,

$$(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^0 - 1)^P$$
, $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^0 - 1)^P$

zaprezentowano na rysunkach 7.40 i 7.41.



Rys. 7.40. Wykresy dopasowania modelu Kelvina-Voighta do wybranych krzywych eksperymentalnych dla materiału ABS P430 i wysokości warstwy L_t^{0254} : a) próbka o kodzie $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^0 - 1)^P$, b) próbka o kodzie $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^4 - 1)^P$, c) próbka o kodzie $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{0254} - P_d^4 - 1)^P$,



Rys 7.41. Wykresy dopasowania modelu Kelvina-Voighta do wybranych krzywych eksperymentalnych dla materiału ABS P430 i wysokości warstwy L_t^{033} : d) próbka o kodzie $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{033} - P_d^0 - 1)^P$, e) próbka o kodzie $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{033} - P_d^{45} - 1)^P$, f) próbka o kodzie $(T^{MEX} - M^{ABS} - L_t^{033} - P_d^{45} - 1)^P$,

Na rysunkach 7.40 i 7.41 widać pokrycie się krzywych modelu Kelvina-Voighta (kolor czerwony) z krzywymi eksperymentalnymi (kolor czarny).

W wyniku dopasowania uzyskano parametry modelu ε_0 , ε_1 , ε_2 , t_1^P , t_1^P i współczynniki dopasowania Chi^2 , R^2 . Wartości uzyskanych

parametrów, a także współczynników dopasowania przedstawiono w tabelach 7.24 i 7.25.

Nr próbki	ε ₀ , %	ε ₁ , %	ε ₂ , %	t ₁ ^P , s	t ₁ ^P , s	Chi ²	R ²
Kod:				$(L_t^{0254} -$	P_d^0) ^P		
1	1,9	0,2	0,1	276	26	0,000002	0,9994
2	1,5	0,2	0,1	261	20	0,000003	0,9989
3	1,8	0,2	0,1	282	24	0,000002	0,9994
4	1,5	0,1	0,1	283	23	0,000001	0,9993
5	1,6	0,1	0,1	278	21	0,000002	0,9991
6	1,3	0,1	0,1	259	18	0,000003	0,9985
7	1,8	0,2	0,1	318	30	0,000001	0,9996
8	1,4	0,2	0,1	276	22	0,000003	0,9990
9	1,4	0,2	0,1	254	20	0,000003	0,9989
10	1,3	0,1	0,1	251	19	0,000003	0,9986
\overline{x}	1,5	0,2	0,1	274	22	0,000002	0,9991
SD	0,2	0,02	0,01	19	4	0,000001	0,0004
u_A	0,1	0,01	0,005	6	1	0,0000005	0,0001
u _C	0,1	0,01	0,01	12	2	0,000001	0,0003
Kod:				$(L_t^{0254} -$	$\left(P_d^{45}\right)^P$		
1	1,8	0,2	0,2	255	21	0,000005	0,9989
2	2,0	0,2	0,2	240	19	0,000007	0,9984
3	1,6	0,2	0,1	269	21	0,000003	0,9990
4	1,5	0,2	0,1	284	24	0,000002	0,9992
5	1,6	0,2	0,1	257	21	0,000003	0,9991
6	1,6	0,2	0,1	265	22	0,000003	0,9991
7	1,8	0,2	0,2	253	19	0,000005	0,9986
8	1,7	0,2	0,2	250	20	0,000005	0,9986
9	1,7	0,2	0,1	256	20	0,000004	0,9986
10	1,6	0,2	0,1	269	24	0,000002	0,9994
\overline{x}	1,7	0,2	0,1	260	21	0,000004	0,9989
SD	0,2	0,01	0,02	12	2	0,000001	0,0003
u_A	0,1	0,004	0,01	4	1	0,000001	0,0001
u _C	0,1	0,01	0,01	9	1	0,000001	0,0002

Tabela 7.24. Wartości parametrów równania modelu Kelvina-Voighta i współczynników dopasowania dla materiału ABS P430; L_t^{0254}

Kod:				$(L_t^{0254} -$	$P_{d}^{90})^{P}$		
1	1,8	0,2	0,2	234	17	0,000006	0,9983
2	1,7	0,2	0,1	267	22	0,000004	0,9989
3	1,8	0,2	0,2	268	19	0,000005	0,9986
4	1,4	0,2	0,2	242	17	0,000005	0,9982
5	1,7	0,2	0,1	269	21	0,000003	0,9989
6	1,8	0,2	0,1	271	21	0,000004	0,9988
7	1,7	0,2	0,1	318	25	0,000003	0,9992
8	1,9	0,2	0,1	293	26	0,000002	0,9994
9	1,8	0,2	0,1	306	28	0,000001	0,9996
10	1,8	0,2	0,2	265	18	0,000006	0,9983
\overline{x}	1,7	0,2	0,1	273	21	0,000004	0,9988
SD	0,1	0,01	0,02	26	4	0,000002	0,0005
u _A	0,039	0,003	0,007	8	1	0,000001	0,0002
<i>u</i> _C	0,1	0,01	0,01	19	3	0,000001	0,0003

Wartości niepewności i odchylenia standardowego przedstawione w tabeli 7.24 potwierdzają właściwe dobranie modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych. Parametry modelu są związane z właściwościami materiału takimi jak moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej. Rozrzut krzywych widoczny na rysunku 7.38 jest związany z trudnością techniczną osiągniecia skoku jednostkowego. Problem ten potwierdzają również wartości odchylenia standardowego i niepewności parametru σ_0 . Największe wartości niepewności i odchylenia dla standardowego osiągnięto dla czasu retardacji t_1^P . Czas retardacji t_1^P zależy od współczynnika lepkości dynamicznej η_1^P . Budowa fizyczna materiału w tym przypadku ABS P430 ma wpływ na współczynniki lepkości dynamicznej.

Tabela 7.25. Wartości parametrów równania modelu Kelvina-Voighta i współczynnikówdopasowania dla materiału ABS P430; L_t^{033}

$ \mathbf{N} \mathbf{\Gamma} \mathbf{P} \mathbf{I} \mathbf{O} \mathbf{K} \mathbf{I} \mathbf{\epsilon}_{0}, 70 \mathbf{\epsilon}_{1}, 70 \mathbf{\epsilon}_{2}, 70 \mathbf{\iota}_{1}, 8 \mathbf{\iota}_{1}, 8 \mathbf{\iota}_{1}, 8 \mathbf{\iota}_{1} \mathbf{K}$

Kod:				$\left(L_t^{033} - P_t^{033}\right)$	$(1 - *)^{P}$		
1	1,3	0,2	0,1	288	26	0,000001	0,9995
2	1,9	0,2	0,1	257	21	0,000003	0,9989
3	1,5	0,2	0,2	281	21	0,000004	0,9987
4	1,4	0,2	0,1	245	20	0,000002	0,9992
5	1,4	0,2	0,1	240	18	0,000004	0,9982
6	1,5	0,1	0,1	292	26	0,000001	0,9994
7	2,0	0,2	0,1	226	18	0,000003	0,9991
8	1,4	0,2	0,2	244	18	0,000005	0,9985
9	1,5	0,2	0,1	311	31	0,000001	0,9996
10	2,0	0,2	0,1	278	24	0,000002	0,9993
\overline{x}	1,6	0,2	0,1	266	22	0,000003	0,9990
SD	0,3	0,01	0,02	28	4	0,000002	0,0005
u _A	0,1	0,004	0,01	9	1	0,000001	0,0001
u _c	0,2	0,01	0,02	18	3	0,000001	0,0003
Kod:		_		$\left(L_t^{033} - P_d^4\right)$	⁵ -*) ^P		
1	1,7	0,2	0,2	251	19	0,000006	0,9988
2	2,1	0,2	0,2	236	18	0,000008	0,9986
3	1,8	0,2	0,2	246	21	0,000003	0,9992
4	1,9	0,2	0,2	260	22	0,000005	0,9988
5	1,7	0,2	0,2	255	20	0,000005	0,9990
6	1,7	0,2	0,1	272	23	0,000003	0,9992
7	2,0	0,2	0,2	240	20	0,000005	0,9990
8	1,6	0,2	0,2	263	22	0,000004	0,9991
9	2,1	0,2	0,2	267	23	0,000004	0,9993
10	1,9	0,2	0,1	264	26	0,000003	0,9993
\overline{x}	1,9	0,2	0,2	255	21	0,000005	0,9990
SD	0,2	0,02	0,02	12	2	0,000002	0,0002
u_A	0,1	0,01	0,01	4	1	0,000001	0,0001
<i>u</i> _C	0,1	0,01	0,01	9	2	0,000001	0,0002
Kod:				$\left(L_t^{033} - P_d^9\right)$	$(0^{0} - *)^{P}$		
1	1,8	0,2	0,1	308	27	0,000001	0,9996
2	1,2	0,2	0,1	265	22	0,000003	0,9991
3	2,0	0,2	0,1	303	26	0,000002	0,9995
4	1,9	0,2	0,2	264	20	0,000005	0,9989
5	1,6	0,2	0,2	258	21	0,000005	0,9990
6	1,7	0,2	0,1	274	21	0,000004	0,9990
7	1,7	0,2	0,2	276	21	0,000004	0,9990
8	1,9	0,2	0,1	286	24	0,000003	0,9992

9	1,8	0,2	0,2	250	19	0,000005	0,9985
10	1,8	0,2	0,1	274	22	0,000003	0,9991
\overline{x}	1,7	0,2	0,1	276	22	0,000003	0,9991
SD	0,2	0,01	0,02	18	3	0,000001	0,0003
u_A	0,1	0,003	0,01	6	1	0,0000004	0,0001
u _c	0,2	0,01	0,01	13	2	0,000001	0,0002

Z danych zawartych w tabeli 7.25 tak samo jak w przypadku tabeli 7.24, można stwierdzić, że wartości odchyleń standardowych i niepewności potwierdzają odpowiedni dobór modelu reologicznego do krzywych eksperymentalnych. W przypadku czasu retardacji t_1^p osiągnięto najwyższe wartości niepewności i odchylenia standardowego. Związane jest to z współczynnikiem lepkości dynamicznej η_1^p , który zależy od budowy fizycznej materiału.

Wartości średnie i odchylenia standardowe parametrów modelu Kelvina-Voighta uwzględniając wszystkie badane wartości parametrów technologicznych przedstawiono w tabeli 7.26.

Tabela 7.26. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla parametrów modelu Kelvina-Voighta oraz współczynniki dopasowania – materiał ABS P430

	ε ₀ , %	$\varepsilon_1,\%$	ɛ ₂ , %	t ₁ ^{<i>p</i>} , s	t ₂ ^{<i>P</i>} , s	Chi ²	R ²
\overline{x}	1,7	0,2	0,1	267	22	0,000003	0,9990
SD	0,2	0,02	0,02	21	3	0,000002	0,0004

Z danych zawartych w tabeli 7.26 wynika, że największe wartości odchylenia standardowego uzyskano dla czasu retardacji t_1^P . Na podstawie tej tabeli można też stwierdzić, że nie ma istotnych różnic między orientacjami wydruku i wysokościami warstw w uzyskanych parametrach.

Korzystając ze średnich wartości parametrów $\overline{\varepsilon}_0$, $\overline{\varepsilon}_1$, $\overline{\varepsilon}_2$, \overline{t}_1^P , \overline{t}_1^P i stałego naprężenia ($\sigma_{const.} = 7$ MPa) obliczono korzystając ze wzoru : modułów sprężystości E_0^P , E_1^P , E_2^P , współczynników lepkości dynamicznej η_1^P , η_2^P dla próbek z wysokością warstwy 0,254 mm i 0,33 mm. W celu łatwiejsze interpretacji wyniki tych wartości przedstawiono na rysunkach 7.42-7.43.



Rys. 7.42. Wartości modułów sprężystości w materiale ABS P430 dla wysokości warstw L_t^{0254} i L_t^{033} – pełzanie



Rys. 7.43. Wartości współczynników lepkości dynamicznej w materiale ABS P430 dla wysokości warstw L_t^{0254} i L_t^{033} – pełzanie

Z zawartych danych przedstawionych na rysunkach 7.42 i 7.43 można zauważyć, że największe wartości modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej uzyskano dla orientacji wydruku 0° w przypadku obu analizowanych wysokości warstw. W przypadku porównań między wysokościami warstw 0,254 mm, a 0,33 mm, to dla modułów sprężystości większe wartości osiągnięto odpowiednio dla pierwszej wysokości warstwy. Natomiast dla współczynników lepkości dynamicznej wyższe wartości uzyskano dla wysokości warstwy 0,254 mm, z wyjątkiem orientacji wydruku 90° i współczynnikiem lepkości dynamicznej η_2^P .

Krzywe pełzania dla materiału ABS P430 uzyskano ze średnich wartości parametrów modelu Kelvina-Voighta i przedstawiono na rysunkach 7.44–7.49.



Rys. 7.44. Krzywa pełzania w materiale ABS P430 dla wysokości warstwy L_t^{0254} i orientacji wydruku P_d^0 : ε_{t0} – odkształcenie początkowe, ε_{EZ} – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^P, t_2^P – czasy retardacji



Rys. 7.45. Krzywa pełzania w materiale ABS P430; dla wysokości warstwy L_t^{0254} i orientacji wydruku P_d^{45} : ε_{t0} – odkształcenie początkowe, ε_{EZ} – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t_{1}^P, t_2^P – czasy retardacji



Rys. 7.46. Krzywa pełzania w materiale ABS P430 dla wysokości warstwy L_t^{0254} i orientacji wydruku P_d^{90} : ε_{t0} – odkształcenie początkowe, ε_{EZ} – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^P, t_2^P – czasy retardacji



Rys. 7.47. Krzywa pełzania w materiale ABS P430 dla wysokości warstwy L_t^{033} i orientacji wydruku P_d^0 : ε_{t0} – odkształcenie początkowe, ε_{EZ} – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^P, t_2^P – czasy retardacji



Rys. 7.48. Krzywa pełzania w materiale ABS P430 dla wysokości warstwy L_t^{033} i orientacji wydruku P_d^{45} : ε_{t0} – odkształcenie początkowe, ε_{EZ} – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^P, t_2^P – czasy retardacji



Rys. 7.49. Krzywa pełzania w materiale ABS P430 dla wysokości warstwy L_t^{033} i orientacji wydruku P_d^{90} : ε_{t0} – odkształcenie początkowe, ε_{EZ} – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^P, t_2^P – czasy retardacji

Na rysunkach 7.44–7.49 zaznaczono czasy retardacji t_1^P , t_2^P , które są związkami modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej. Oznaczono również na tych rysunkach naprężenie początkowe ε_{t0} oraz naprężenie końcowe ε_{EZ} . Warto zaznaczyć, że wyznaczona asymptota ε_{EZ} funkcji $\sigma(t)$ pozwala ekstrapolować krzywą pełzania na dalsze obszary czasowe.

Korzystają ze wzoru 7.2 obliczono procentowy wzrost odkształcenia, który zamieszczono w tabeli 7.27.

Tabela 7.27. Wyniki badań procentowy wzrost odkształcenia dla materiału ABS P430.

	$R_{\varepsilon},\%$							
		$L_t^{0,254}$		$L_{t}^{0,33}$				
	0°	45 [°]	90°	0°	45 [°]	90°		
\overline{x}	15,6	17,1	16,1	16,3	17,6	18,2		
SD	2,3	0,7	2,1	3,1	1,4	4,8		

Największą wartość odchylenia standardowego uzyskano dla orientacji wydruku 90° i wysokości warstwy 0,33 mm. Najniższa wartość odchylenia standardowego wystąpiła dla orientacji wydruku 45° i wysokości warstwy 0,254 mm. Największy średni wzrost odkształcenia 18,24% uzyskano dla wysokości warstwy 0,33 mm i orientacji wydruku 90°. Natomiast najmniejszy średni wzrost odkształcenia 15,59% wystąpiło dla wysokości warstwy 0,254 mm i orientacji wydruku 0°.

Podsumowanie

Uzyskane wartości odchylenia standardowego i niepewności aproksymacji przedstawione w tabeli 7.24 i 7.25 potwierdzają że model pięcioparametrowy Kelvina-Voighta jest silnie dopasowany do krzywych eksperymentalnych.

Moduł sprężystości E_0^P jest kilkakrotnie mniejszy od modułów sprężystości E_1^P , E_2^P . Współczynnik lepkości dynamicznej η_1^P jest około dziesięciokrotnie wyższy od współczynnika η_2^P .

Wyznaczone krzywe pełzania dla materiału ABS P430 mogą posłużyć w symulacjach komputerowych. Dodatkowo wyznaczona asymptota ε_{EZ} funkcji pełzania, pozwala ekstrapolować krzywą pełzania na dalsze obszary czasowe.

Uzyskano anizotropię właściwości pełzających w zależności od orientacji wydruku, co potwierdzają uzyskane wartości współczynników lepkości dynamicznej przedstawione na rysunku 7.42.

Wyniki badań potwierdzają tezę, która brzmi: zjawisko pełzania występują w materiale ABS P430 wytworzonym technologią ekstruzji materiału MEX, przy założonych parametrach technologicznych, opisać można przy pomocy modelu Kelvina-Voighta, którego moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej wyznaczyć można z dokładnością umożliwiającą ich stosowanie w obliczeniach inżynierskich.

7.5. Materiał ROSA-Flex 96A

Badania nad materiałem ROSA-Flex 96A wykonano zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziale 7.1.

Parametr technologiczny druku 3D zmienny analizowany w badaniach to liczba konturów (shells): 2, 4, 6. Pozostałe parametry technologiczne stałe druku 3D jaki parametry badań zostały przedstawione w tabeli 7.28.

Tabela 7.28. Parametry technologiczne druku 3D i parametry badań dla materiału ROSA-Flex 96A

Parametr technologiczny	Wartość
Wypełnienie	95%
Rodzaj wypełnienia	Hexagonal
Prędkość druku	15 mm/s
Temperatura dysz	220°C
Parametr badania	
Obciążenie wstępne, F _p	70 N
Prędkość przemieszczenia poprzeczki maszyny w celu osiągnięcia zadanej wartości wydłużenia, V _{mm}	10 mm/s
Czas trwania próby, t	600 s
Relaksacja naprężeń	
Odkształcenie stałe, $\varepsilon_{const.}$	2,5 mm

Wytworzono łącznie 15 sztuk próbek: 3 serie po 5 powtórzeń. Próbki poddano naprężeniom ściskającym.

Relaksacja naprężeń materiału ROSA Flex 96A

Przed przystąpieniem do testów relaksacji naprężeń każdą pojedynczą próbek zmierzono. Wyznaczono pola przekrojów dla próbek (przekrój okrągły), których wartości przedstawiono w tabeli 7.29.

Tabela 7.29. Wartości pól przekrojów próbek dla materiału ROSA-Flex 96A

Liczba konturów	N_s^2	$N_{\rm s}^{4}$	$N_{\rm s}^{6}$
\overline{x}	21,97 mm ²	21,49 mm ²	21,29 mm ²
SD	0,58 mm ²	0,46 mm ²	0,43 mm ²

Wyniki testów relaksacja naprężeń dla materiału ROSA-Flex 96A przedstawiono na rysunku 7.50.



Rys. 7.50. Wyniki testów relaksacji naprężeń dla materiału ROSA-Flex 96A: a) liczba konturów 2, b) liczba konturów 4, c) liczba konturów 6

Aproksymacje modelu pięcioparametrowego Maxwella-Wiecherta przeprowadzono do każdej pojedynczej krzywej eksperymentalnej. Przykładowe dopasowania dla próbek oznaczonych kodami:

 $(T^{MEX} - M^{Flex96A} - N_s^2 - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{Flex96A} - N_s^4 - 1)^R$, $(T^{MEX} - M^{Flex96A} - N_s^6 - 1)^R$ i przedstawiono na rysunku 7.51.



Rys. 7.51. Przykładowe wykresy dopasowań modelu Maxwella-Wiecherta do krzywych relaksacji naprężeń materiału ROSA-Flex 96A: a) próbka o kodzie ($T^{MEX} - M^{Flex96A} - P^{Flex96A}$

$$N_s^2 - 1$$
ⁿ, b) próbka o kodzie $(T^{MEX} - M^{Flex96A} - N_s^4 - 1)^n$, c) próbka o kodzie $(T^{MEX} - M^{Flex96A} - N_s^6 - 1)^n$

Na podstawie rysunków 7.51 można zauważyć, że krzywe modelu reologicznego Maxwella-Wiecherta (kolor czerwony) pokrywają się z krzywymi eksperymentalnymi (kolor czarny).

Przeprowadzone aproksymacje pozwoliły na uzyskanie parametrów $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, t_1, t_2$ modelu Maxwella-Wiecherta, których wartości przedstawiono w tabeli 7.30.

Nr próbki	σ_0 , MPa	σ_1 , MPa	σ_2 , MPa	t_1^R , s	t_2^R , s	Chi ²	R ²
Kod:	$(N_s^2 -)^R$						•
1*	0,5	1,3	0,8	6	164	0,000900	0,9859
2*	0,3	1,3	0,8	6	162	0,000800	0,9865
3*	0,4	1,3	0,8	6	165	0,000900	0,9869
4*	0,3	1,3	0,8	6	163	0,000900	0,9869
5*	0,4	1,3	0,8	6	162	0,000900	0,9868
\overline{x}	0,4	1,3	0,8	6	163	0,000880	0,9866
SD	0,1	0,02	0,02	0,05	1	0,000045	0,0004
u _A	0,03	0,01	0,01	0,02	1	0,000020	0,0002
u _c	0,1	0,02	0,02	0,05	1	0,000045	0,0004
Kod:	$(N_s^4 -)^{\mathrm{R}}$						
1*	0,7	1,4	0,8	6	165	0,000950	0,9871
2*	0,4	1,3	0,8	6	164	0,000830	0,9866
3*	0,6	1,3	0,8	6	163	0,000840	0,9870
4*	0,4	1,3	0,8	6	164	0,000900	0,9875
5*	0,7	1,4	0,8	6	165	0,000950	0,9871
\overline{x}	0,6	1,3	0,8	6	164	0,000894	0,9871
SD	0,2	0,04	0,03	0,1	1	0,000058	0,0003
u_A	0,1	0,02	0,01	0,1	0,3	0,000026	0,0001
u _c	0,2	0,04	0,03	0,1	1	0,000058	0,0003
Kod:	$(N_s^6 -)^R$						
1*	0,4	1,3	0,8	6	165	0,00086	0,9871
2*	0,6	1,2	0,7	6	166	0,00069	0,9873
3*	0,2	1,2	0,8	7	159	0,00076	0,9877
4*	0,5	1,2	0,7	6	167	0,00074	0,9869
5*	0,2	1,2	0,8	6	165	0,00077	0,9875
\overline{x}	0,4	1,2	0,8	6	164	0,000764	0,9873
SD	0,2	0,04	0,03	0,2	3	0,000062	0,0003
u_A	0,1	0,02	0,01	0,1	1	0,000028	0,0001
u_{c}	0,2	0,04	0,03	0,2	3	0,000063	0,0003

Tabela7.30.WartościparametrówrównaniamodeluMaxwella-Wiechertai współczynników dopasowania dla materiału ROSA-Flex96A

Uzyskane niskie wartości odchylenia standardowego i niepewności przedstawione w tabeli 7.30 potwierdzają właściwe dobranie modelu reologicznej do opisu krzywej eksperymentalnej. Najwyższe wartości niepewności i odchylenia standardowego uzyskano dla czasu relaksacji t_2^R . Czas ten jest związany ze współczynnikiem lepkości dynamicznej η_2^R , który zależy od budowy fizycznej materiału. Dla parametru σ_0 , również uzyskano wyższe wartości niepewności i odchylenia standardowego, co jest związane z trudnością realizacji skoku jednostkowego. Trudności te potwierdzone są rozrzutem krzywych relaksacji widocznych na rysunku 7.48.

Wartości średnie i odchylenia standardowe parametrów modelu Maxwella-Wiecherta uwzględniając wszystkie badane wartości parametrów technologicznych przedstawiono w tabeli 7.31.

Tabela 7.31. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla parametrów modelu Maxwella-Wiecherta oraz współczynniki dopasowania – materiał ROSA-Flex 96A

	σ ₀ , MPa	σ ₁ , MPa	σ̄ ₂ , MPa	$ar{t}_1^R,$ s	$ar{t}_2^R,$ s	Chi ²	R ²
\overline{x}	0,4	1,3	0,8	6	164	0,000846	0,9870
SD	0,2	0,1	0,03	0,1	2	0,000079	0,0004

Na podstawie tabeli 7.31 można zauważyć wysokie wartości niepewności i odchylenia standardowego dla parametru σ_0 i t_2^R . Uzyskane wartości współczynników dopasowania *Chi*² i R^2 potwierdzają silne dopasowanie modelu Maxwella-Wiecherta do krzywych eksperymentalnych.

Korzystając ze średnich wartości parametrów $\bar{\sigma}_0, \bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{t}_1^R, \bar{t}_2^R$ i stałego odkształcenia ($\varepsilon_{const.} = 2,5 mm$) obliczono moduły sprężystości E_0^R, E_1^R, E_2^R i współczynników lepkości dynamicznej η_1^R, η_2^R dla materiału ROSA-Flex 96A. Wartości tych modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej przedstawiono na rysunku 7.52 i 7.53.



Rys. 7.52. Wartości modułów sprężystości dla materiału ROSA Flex 96A – relaksacja naprężeń



Rys. 7.53. Wartości współczynników lepkości dynamicznej dla materiału ROSA Flex 96A – relaksacja naprężeń

Na podstawie rysunku 7.53 można zauważyć że największe wartości uzyskano dla liczby konturów 4 dla wszystkich modułów sprężystości. W przypadku wartości współczynników lepkości dynamicznej widocznych
na rysunku 7.50 największą wartość uzyskano dla 2 konturów – η_1^R i 4 konturów – η_2^R .

Z danych zawartych na rysunku 7.52 i 7.53 można wywnioskować, że występują niewielkie różnice między liczbą konturów 2, a 4 w przypadku modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej. Wiesze różnice można zaobserwować między liczbą konturów 2, 4, a 6. Z tym że wartości modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej dla liczby konturów 6 są niższe od pozostałych analizowanych konturów.

Krzywe relaksacji naprężeń dla materiału ROSA Flex 96A uzyskane ze średnich wartości parametrów modelu Maxwella-Wiecherta i równania (4.48) przedstawiono na rysunkach 7.54-7.56.



Rys. 7.54. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ROSA Flex 96A i liczbie konturów N_s^2 : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R , t_2^R – czasy relaksacji



Rys. 7.55. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ROSA Flex 96A i liczbie konturów N_s^4 : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R , t_2^R – czasy relaksacji



Rys. 7.56. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ROSA Flex 96A i liczbie konturów N_s^6 : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R , t_2^R – czasy relaksacji

Na rysunkach 7.54–7.56 zaznaczono i podano wartości dla naprężenia początkowego σ_{t0} , naprężenia końcowego σ_{tn} oraz czasów relaksacji t_1^R , t_2^R . Krzywa σ_{Ns6} dąży do prostej σ_{tn} , jest to granica funkcji. Uzyskanie asymptoty σ_{tn} pozwala ekstrapolować krzywą relaksacji na dalsze obszary czasowe.

W tabeli 7.32 przedstawiono relaksacje naprężeń po założonym czasie ekspozycji obliczoną na podstawie wzoru 7.1.

Tabela 7.32. Wyniki badań procentowy spadek naprężenia dla materiału ROSA-Flex 96A

Na anóhla	R _σ , %						
INF. prodki	2 kontury	4 kontury	6 konturów				
\overline{x}	89,2	85,3	89,1				
SD	1,7	3,1	4,9				

Na podstawie tabeli 7.32 można zauważyć największa procentową wartość spadku naprężenia dla liczby konturów 2. Również liczba konturów 6 wykazywała wysoki procentowy spadek naprężenia. Najniższy wartość procentowe spadku naprężenia uzyskano dla liczby konturów 4.

Podsumowanie

Uzyskano silne dopasowanie modelu pięcioparametrowego Maxwella-Wiecherta do krzywych eksperymentalnych co potwierdzają otrzymane wartości współczynników Chi^2 i R^2 przedstawione w tabeli 7.30.

W przypadku materiału elastycznego jakim jest ROSA Flex-96A uzyskano wysoki spadek naprężenia bo około aż 80%. Jest to w porównaniu do innych materiałów znacznie większa relaksacja naprężeń. W przypadku wartości modułu sprężystości E_0^R był on niższy od pozostałych modułów sprężystości E_1^R , E_2^R . Moduł zastępczy E_z^R największą wartość uzyskał dla liczby konturów 2.

Wyniki badań potwierdzają tezę, która brzmi: zjawiska relaksacji naprężeń występuje w materiale ROSA-Flex 96A wytworzonym technologią ekstruzji materiału MEX, przy założonych parametrach technologicznych, opisać można przy pomocy modelu Maxwella-Wiecherta, którego moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej wyznaczyć można z dokładnością umożliwiającą ich stosowanie w obliczeniach inżynierskich.

7.6. Materiał PA2200

Badania dla materiału PA 2200 w technologii selektywnego spiekania proszków wykonano zgodnie z procedura opisaną w podrozdziale 7.1. Część z tych badań opublikowano [118] i zaprezentowano na konferencji "Szybkie Prototypowanie, Druk 3D i 4D w zastosowaniach inżynierskich".

Parametry technologiczne druku 3D zmienne analizowane w badaniach to orientacja wydruku: 0°, 45°, 90° i gęstość energii: 0,056 J/mm²; 0,076 J/mm². Pozostałe parametry technologiczne druku 3D stałe jak i parametry badań zostały przedstawione w tabeli 7.33.

Tabela	7.33.	Parametry	technologiczne	stałe	druku	3D	i parametry	badań	dla	materiału
PA2200										

Parametr technologiczny	Wartość
Wysokość warstwy, L_t	0,1 mm
Parametr badań	

Obciążenie wstępne, F _p	40 N					
Prędkość przemieszczenia poprzeczki maszyny w celu osiągnięcia zadanej wartości wydłużenia, V _{mm}	10 mm/s					
Czas trwania próby, t	600 s					
Relaksacja naprężeń						
Odkształcenie stałe, $\varepsilon_{const.}$	1 mm					

Łączna liczba wytworzonych próbek to 60, z czego dla każdej serii wykonano po 10 powtórzeń. Próbki poddano naprężeniom rozciągającym.

Relaksacja naprężeń materiału PA2200

Przed rozpoczęciem testów relaksacji naprężeń każdą próbkę zmierzono i wyznaczono pole przekroju. Wartości średnie pól przekrojów (przekrój prostokątny) uzyskano z dziesięciu próbek i zawarto w tabeli 7.34.

Tabela 7.34. Wartości średnie pól przekrojów próbek dla materiału PA2200.

Orientacja wydruku	0 °	45 °	90°
\overline{x}	20,5 mm ²	20,5 mm ²	20,1 mm ²
SD	0,2 mm ²	0,2 mm ²	0,1 mm ²

Obliczone pola przekrojów pozwalają na wyznaczenie naprężeń w testach relaksacji. Zbiorcze wyniki testów relaksacji naprężeń badanego materiału PA 2200 przedstawiono na rysunkach 7.57 i 7.58.



Rys. 7.57. Wyniki testów relaksacji naprężeń dla materiału PA2200 i gęstości energii E_d^{0056} : a) orientacja wydruku P_d^0 , b) orientacja wydruku P_d^{45} , c) orientacja wydruku P_d^{90}



Rys. 7.58. Wyniki testów relaksacji naprężeń dla materiału PA2200 i gęstości energii E_d^{0076} : d) orientacja wydruku P_d^0 , e) orientacja wydruku P_d^{45} , f) orientacja wydruku P_d^{90}

Wstępna analiza otrzymanych krzywych relaksacji naprężeń wskazuje na różne właściwości relaksacyjne i różne rozrzuty otrzymanych wyników. Do każdej uzyskanej krzywej relaksacji naprężeń materiału PA2200 dopasowano pięcioparametrowy model Maxwella-Wiecherta przy pomocy równania (4.48). Wygląd dopasowania dla przykładowych próbek o kodach: $(T^{SLS} - M^{PA2200} - E_d^{0056} - P_d^0 - 1)^R$, $(T^{SLS} - M^{PA2200} - E_d^{0056} - P_d^0 - 1)^R$, $(T^{SLS} - M^{PA2200} - E_d^{0056} - P_d^0 - 1)^R$



 $E_d^{0056} - P_d^{45} - 1)^{\text{R}}$, $(T^{\text{SLS}} - M^{\text{PA2200}} - E_d^{0056} - P_d^{90} - 1)^{\text{R}}$,

 $M^{PA2200} - E_d^{0076} - P_d^0 - 1)^R$, $(T^{SLS} - M^{PA2200} - E_d^{0076} - P_d^{45} - P_d^{45})^R$

 $(T^{SLS} -$

Rys. 7.59. Przykładowe wykresy dopasowań modelu Maxwella-Wiecherta do krzywych relaksacji naprężeń materiału PA2200 dla gęstości energii E_d^{0056} : a) próbka o kodzie ($T^{SLS} - M^{PA2200} - E_d^{0056} - P_d^0 - 1$)^R, b) próbka o kodzie ($T^{SLS} - M^{PA2200} - E_d^{0056} - P_d^{056} - P_d^{45} - 1$)^R, c) próbka o kodzie ($T^{SLS} - M^{PA2200} - E_d^{0056} - P_d^{90} - 1$)^R



Rys. 7.60. Przykładowe wykresy dopasowań modelu Maxwella-Wiecherta do krzywych relaksacji naprężeń materiału PA2200 dla gęstości energii E_d^{0076} : d) próbka o kodzie ($T^{SLS} - M^{PA2200} - E_d^{0076} - P_d^0 - 1$)^R, e) próbka o kodzie ($T^{SLS} - M^{PA2200} - E_d^{0076} - P_d^{0076} - P_d^{45} - 1$)^R, f) próbka o kodzie ($T^{SLS} - M^{PA2200} - E_d^{0076} - P_d^{90} - 1$)^R

Krzywe modelu Maxwella-Wiecherta (kolor czerwony) pokrywają się z krzywymi eksperymentalnymi (kolor czarny) co widać na rysunkach 7.59 i 7.60.

Wyniki dopasowania, którymi są wartości parametrów $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, t_1^R, t_2^R$ oraz współczynniki dopasowania *Chi*², *R*² przedstawiono w tabeli 7.35 i 7.36.

Nr próbki	σ 0, MPa	σ ₁ , MPa	σ ₂ , MPa	t ₁ ^{<i>R</i>} , s	t ₂ ^{<i>R</i>} , s	Chi ²	R ²
Kod:			(1	$E_d^{0056} - P_d^0$	$)^R$		
1	7,8	0,9	0,8	11	232	0,000390	0,9942
2	8,4	0,7	0,8	10	252	0,000299	0,9945
3	8,4	0,7	0,8	10	239	0,000314	0,9947
4	7,9	0,9	0,9	11	233	0,000403	0,9947
5	7,8	0,8	0,9	11	241	0,000369	0,9948
6	8,7	0,8	0,8	11	252	0,000348	0,9942
7	8,5	0,8	0,7	11	247	0,000337	0,9937
8	8,2	0,7	0,7	11	251	0,000267	0,9941
9	8,3	0,7	0,8	11	255	0,000299	0,9949
10	8,0	0,7	0,7	11	240	0,000309	0,9938
\overline{x}	8,2	0,8	0,8	11	244	0,000334	0,9944
SD	0,3	0,1	0,1	0,3	8	0,000044	0,0004
u_A	0,1	0,02	0,02	0,1	3	0,000014	0,0001
u _c	0,2	0,05	0,04	0,2	6	0,000031	0,0003
Kod:			(<i>E</i>	$p_{d}^{0056} - P_{d}^{45}$	$)^{R}$		
1	8,6	0,9	1,0	12	243	0,000445	0,9951
2	7,9	0,9	0,9	11	241	0,000410	0,9944
3	6,3	1,0	1,2	12	263	0,000544	0,9958
4	5,8	1,0	1,0	12	249	0,000512	0,9944
5	8,1	0,7	0,7	11	267	0,000279	0,9943
6	7,6	0,7	0,7	11	259	0,000304	0,9941
7	7,7	0,7	0,7	11	252	0,000332	0,9936
8	7,0	0,7	0,7	10	264	0,000326	0,9930
9	7,9	0,7	0,8	11	258	0,000292	0,9947
10	7,4	0,7	0,7	10	249	0,000264	0,9943
\overline{x}	7,4	0,8	0,8	11	255	0,000371	0,9944
SD	0,8	0,1	0,2	1	9	0,000101	0,0008
<i>u</i> _A	0,3	0,04	0,1	0,2	3	0,000032	0,0002
u _c	0,6	0,1	0,1	0,4	7	0,000072	0,0005
Kod:			(<i>E</i>	$\frac{0056}{d} - P_d^{90}$) ^R		
1	8,4	0,9	0,9	12	257	0,000421	0,9948
2	8,0	0,9	0,9	11	245	0,000424	0,9945
3	7,9	0,9	0,9	11	245	0,000433	0,9945

Tabela 7.35. Parametry otrzymanych krzywych relaksacji naprężeń w materiale PA $2200; E_d^{0056}$

4	8,3	0,9	0,9	12	242	0,000393	0,9947
5	8,3	0,9	0,9	11	245	0,000408	0,9944
6	7,7	0,8	0,9	12	262	0,000367	0,9952
7	7,9	0,8	0,9	12	253	0,000369	0,9954
8	7,7	0,8	0,8	11	260	0,000364	0,9944
9	7,7	0,8	0,9	12	262	0,000353	0,9954
10	8,0	0,8	0,9	12	268	0,000391	0,9952
\overline{x}	8,0	0,8	0,9	12	254	0,000392	0,9948
SD	0,3	0,04	0,03	0,3	9	0,000028	0,0004
u_A	0,1	0,01	0,01	0,1	3	0,000009	0,0001
u _c	0,2	0,03	0,02	0,2	7	0,000020	0,0003

Tabela 7.36. Parametry otrzymanych krzywych relaksacji naprężeń w materiale PA 2200;E_d⁰⁰⁷⁶

Nr próbki	σ 0, MPa	σ 1, MPa	σ 2, MPa	t ₁ ^R , s	t ₂ ^R , s	Chi ²	R ²
Kod:			(8	$Z_d^{0076} - P_d^0$	$)^R$		
1	7,9	0,9	1,1	13	255	0,000464	0,9960
2	6,7	0,8	0,8	12	251	0,000377	0,9945
3	7,6	0,9	1,0	12	249	0,000404	0,9954
4	7,0	0,8	0,9	11	242	0,000382	0,9950
5	7,4	0,9	0,9	12	243	0,000425	0,9947
6	7,5	0,9	1,0	12	248	0,000412	0,9956
7	7,5	0,9	1,0	12	251	0,000439	0,9952
8	7,7	0,9	1,0	12	245	0,000434	0,9953
9	7,4	0,9	1,0	11	244	0,000402	0,9952
10	7,7	0,9	1,0	13	246	0,000434	0,9953
\overline{x}	7,4	0,9	1,0	12	247	0,000418	0,9952
SD	0,4	0,03	0,1	1	4	0,000027	0,0004
u_A	0,1	0,01	0,02	0,2	1	0,000009	0,0001
u _c	0,3	0,02	0,1	0,4	3	0,000019	0,0003
Kod:			(<i>E</i>	${}^{0076}_{d} - P_{d}^{45}$	$)^{R}$		
1	7,8	0,9	1,0	9	209	0,000264	0,9971
2	7,1	0,8	0,9	14	337	0,000558	0,9917
3	8,1	0,9	1,0	8	193	0,000226	0,9974
4	7,7	0,9	0,9	14	314	0,000579	0,9925
5	7,9	0,9	1,0	9	224	0,000252	0,9970
6	7,1	0,8	0,8	9	182	0,000303	0,9953

6,7	0,8	0,9	13	330	0,000343	0,9945
7,1	0,8	1,0	17	464	0,000635	0,9908
7,4	0,8	1,0	12	264	0,000395	0,9953
7,2	0,8	1,0	12	257	0,000394	0,9952
7,4	0,8	0,9	12	277	0,000395	0,9947
0,4	0,04	0,1	3	86	0,000147	0,0023
0,1	0,01	0,02	1	27	0,000047	0,0007
0,3	0,03	0,05	2	62	0,000105	0,0017
		(<i>E</i>	${}^{0076}_{d} - P_{d}^{90}$	$)^{R}$		
7,2	0,8	0,9	12	258	0,000373	0,9949
7,9	0,9	1,0	11	252	0,000415	0,9953
7,9	0,9	1,0	12	253	0,000446	0,9952
7,9	0,9	1,0	12	253	0,000430	0,9954
7,5	0,9	1,0	12	244	0,000415	0,9953
7,4	0,9	1,0	13	239	0,000444	0,9951
8,1	0,9	1,0	12	250	0,000458	0,9953
7,6	0,9	0,9	11	251	0,000414	0,9949
7,6	0,9	1,0	12	253	0,000430	0,9951
7,9	1,0	1,0	12	248	0,000482	0,9951
7,7	0,9	1,0	12	250	0,000431	0,9952
0,3	0,04	0,04	0,4	5	0,000029	0,0001
0,1	0,01	0,01	0,1	2	0,000009	0,0000
0,2	0,03	0,03	0,3	4	0,000021	0,0001
	6,7 7,1 7,4 7,2 7,4 0,4 0,1 0,3 7,2 7,9 7,9 7,9 7,9 7,9 7,9 7,9 7,9 7,9 7,5 7,4 8,1 7,6 7,6 7,6 7,9 7,7 0,3 0,1 0,2	6,7 0,8 7,1 0,8 7,4 0,8 7,2 0,8 7,4 0,8 7,2 0,8 7,4 0,8 7,4 0,8 7,4 0,8 0,4 0,04 0,1 0,01 0,3 0,03 7,2 0,8 7,9 0,9 7,9 0,9 7,9 0,9 7,5 0,9 7,6 0,9 7,6 0,9 7,9 1,0 7,7 0,9 0,3 0,04 0,1 0,01 0,2 0,03	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$6,7$ $0,8$ $0,9$ 13 $7,1$ $0,8$ $1,0$ 17 $7,4$ $0,8$ $1,0$ 12 $7,2$ $0,8$ $1,0$ 12 $7,4$ $0,8$ $0,9$ 12 $7,4$ $0,8$ $0,9$ 12 $7,4$ $0,8$ $0,9$ 12 $0,4$ $0,04$ $0,1$ 3 $0,1$ $0,01$ $0,02$ 1 $0,3$ $0,03$ $0,05$ 2 $(E_d^{0076} - P_d^{90}$ 2 $(E_d^{0076} - P_d^{90}$ $7,9$ $0,9$ $1,0$ 11 $7,9$ $0,9$ $1,0$ 12 $7,9$ $0,9$ $1,0$ 12 $7,6$ $0,9$ $1,0$ 12 $7,6$ $0,9$ $1,0$ 12 $7,9$ $1,0$ $1,0$ 12 $7,9$ $1,0$ $1,0$ 12 $7,9$ $1,$	$6,7$ $0,8$ $0,9$ 13 330 $7,1$ $0,8$ $1,0$ 17 464 $7,4$ $0,8$ $1,0$ 12 264 $7,2$ $0,8$ $1,0$ 12 257 $7,4$ $0,8$ $0,9$ 12 277 $0,4$ $0,04$ $0,1$ 3 86 $0,1$ $0,01$ $0,02$ 1 27 $0,3$ $0,03$ $0,05$ 2 62 ($E_d^{0076} - P_g^{90}$) ^R $7,2$ $0,8$ $0,9$ 12 258 $7,9$ $0,9$ $1,0$ 11 252 $7,9$ $0,9$ $1,0$ 12 253 $7,9$ $0,9$ $1,0$ 12 253 $7,6$ $0,9$ $0,9$ 11 251 $7,6$ $0,9$ $1,0$ 12 253 $7,9$ $1,0$ $1,0$ 12	$6,7$ $0,8$ $0,9$ 13 330 $0,000343$ $7,1$ $0,8$ $1,0$ 17 464 $0,000395$ $7,4$ $0,8$ $1,0$ 12 264 $0,000394$ $7,2$ $0,8$ $1,0$ 12 257 $0,000394$ $7,4$ $0,8$ $0,9$ 12 277 $0,000395$ $0,4$ $0,04$ $0,1$ 3 86 $0,000147$ $0,1$ $0,01$ $0,02$ 1 27 $0,000047$ $0,3$ $0,03$ $0,05$ 2 62 $0,000105$ $E_d^{0076} - P_d^{90}$ R R R R R $7,9$ $0,9$ $1,0$ 11 252 $0,000415$ $7,9$ $0,9$ $1,0$ 12 253 $0,000446$ $7,9$ $0,9$ $1,0$ 12 253 $0,000415$ $7,4$ $0,9$ $1,0$ 12

Z zawartych w tabelach 7.35 i 7.36 wartości niepewności aproksymacji i odchylenia standardowego że dopasowanie modelu pięcioparametrowego Maxwella-Wiecherta do krzywych eksperymentalnych jest właściwe. Najwyższe wartości niepewności aproksymacji i odchylenia standardowego uzyskano dla czasu relaksacji t_2^R . Czas ten jest związany ze współczynnikiem lepkości dynamicznej η_2^R , który z kolei ma związek z budową fizyczną materiału PA 2200. Rozrzut krzywych pokazanych na rysunkach 7.57–7.58, wynika z trudności technicznej realizacji skoku jednostkowego podczas wykonywania testów relaksacji naprężeń. Ma to również wpływ na wyższe wartości odchylenia standardowego i niepewności aproksymacji dla parametru σ_0 . Orientacja wydruku również może mieć wpływ dla 45° występują większe rozrzuty.

Wartości średnie i odchylenia standardowe parametrów modelu Maxwella-Wiecherta i w spółczynników dopasowania uwzględniając wszystkie badane wartości parametrów technologicznych druku 3D przedstawiono w tabeli 7.37.

Tabela 7.37. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla parametrów modelu Maxwella-Wiecherta oraz współczynniki dopasowania uwzględniając wszystkie analizowaneparametry druku 3D - materiał PA 2200

	σ 0, MPa	σ 1, MPa	σ 2, MPa	t ₁ ^{<i>R</i>} , s	t ₂ ^{<i>R</i>} , s	Chi ²	R ²
\overline{x}	7,7	0,8	0,9	12	255	0,000390	0,9948
SD	0,5	0,1	0,1	1	36	0,000081	0,0011

Na podstawie tabeli 7.37 można zauważyć, że największą wartość odchylenie standardowego zaobserwowano dla czasu relaksacji t_2^R . Dla pozostałych parametrów osiągnięto niskie wartości odchyleń standardowych.

Parametry krzywych relaksacji przedstawione w tabelach 7.30–7.31 są związane z właściwościami materiałowymi takimi jak moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej. Wartości tych modułów i współczynników przedstawiono na rysunkach 7.61–7.62.



Rys. 7.61. Wartości modułów sprężystości dla materiału PA 2200 i gęstości energii E_d^{0056} , E_d^{0076}

Z danych zawartych na rysunku 7.61 można zauważyć że największe wartości uzyskano dla modułu sprężystości E_0^R dla wszystkich analizowanych zmiennych parametrów technologicznych druku 3D. Najwyższą wartość moduł zastępczego E_z^R dla gęstości energii E_d^{0056} osiągnięto w przypadku orientacji wydruku 0°. Natomiast w przypadku energii E_d^{0076} największą wartość modułu zastępczego uzyskano dla orientacji wydruku 90°. Wartości między modułami sprężystości E_1^R , a E_2^R są niskie w przypadku zarówno orientacji wydruku jak i gęstościami energii.



Rys. 7.62. Wartości współczynników lepkości dynamicznej dla materiału PA 2200 i gęstości energii E_d^{0056} , E_d^{0076}

Na podstawie rysunku 7.62 można zauważyć, że dla gęstości energii E_d^{0076} osiągnięto wyższe wartości współczynników lepkości dynamicznej η_1^R , η_2^R . Analizując współczynnik lepkości dynamicznej η_1^R ,

stwierdzono, że najwyższą wartość osiągnięto dla orientacji wydruku 90° zarówno dla gęstości energii E_d^{0056} jaki i E_d^{0076} . Natomiast dla współczynnika lepkości dynamicznej η_2^R , najwyższą wartość uzyskano dla orientacji wydruku 90° i gęstości energii E_d^{0056} oraz orientacji wydruku 45° i gęstości energii E_d^{0076} .

Krzywe relaksacji naprężeń dla materiału PA 2200 uzyskane na podstawie średnich wartości parametrów $\bar{\sigma}_0$, $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$, \bar{t}_1^R , \bar{t}_2^R modelu Maxwella-Wiecherta przedstawiono na rysunkach 7.63–7.68.



Rys. 7.63. Wykres relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla gęstości energii \mathbf{E}_{d}^{0056} i orientacji wydruku \mathbf{P}_{d}^{0} : $\boldsymbol{\sigma}_{t0}$ – naprężenie początkowe, $\boldsymbol{\sigma}_{tn}$ – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_{1}^{R}, t_{2}^{R} – czasy relaksacji



Rys. 7.64. Wykres relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla gęstości energii E_d^{0056} i orientacji wydruku P_d^{45} : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R, t_2^R – czasy relaksacji



Rys. 7.65. Wykres relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla gęstości energii E_d^{0056} i orientacji wydruku P_d^{90} : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R, t_2^R – czasy relaksacji



Rys. 7.66. Wykres relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla gęstości energii \mathbf{E}_{d}^{0076} i orientacji wydruku \mathbf{P}_{d}^{0} : $\boldsymbol{\sigma}_{t0}$ – naprężenie początkowe, $\boldsymbol{\sigma}_{tn}$ – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_{1}^{R}, t_{2}^{R} – czasy relaksacji



Rys. 7.67. Wykres relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla gęstości energii E_d^{0076} i orientacji wydruku P_d^{45} : σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R, t_2^R – czasy relaksacji



Rys. 7.68. Wykres relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla gęstości energii \mathbf{E}_{d}^{0076} i orientacji wydruku \mathbf{P}_{d}^{90} : $\boldsymbol{\sigma}_{t0}$ – naprężenie początkowe, $\boldsymbol{\sigma}_{tn}$ – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, $\boldsymbol{t}_{1}^{R}, \boldsymbol{t}_{2}^{R}$ – czasy relaksacji

Na rysunkach 7.63–7.68 zaznaczono czasy relaksacji t_1^R , t_2^R , które są związkami modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej, oraz naprężenia początkowe σ_{t0} i naprężenia końcowe σ_{tn} . Naprężenie końcowe to σ_{tn} to asymptota funkcji $\sigma(t)$, dzięki której możliwe jest ekstrapolowanie krzywej relaksacji na dalsze obszary czasowe.

Dla materiału PA2200 wyznaczono relaksacje naprężeń po założonym czasie ekspozycji obliczoną na podstawie wzoru 7.1. Wyniki zawarto w tabeli 7.38.

Tabela 7.38. Wyniki badań procentowy spadek naprężenia dla materiału PA 2200

$R_{\sigma}, \%$							
E_{d}^{0056}							
Orientacja wydruku	0°	45°	90°				
\overline{x}	20,98	23,85	22,61				

SD	1,86	4,86	0,56					
E_{d}^{0076}								
\overline{x}	24,5	23,6	24,1					
SD	0,4	0,5	0,4					

Na podstawie tabeli 7.38 można zauważyć, że największy średni spadek naprężenia uzyskano dla orientacji wydruku 0° , natomiast najmniejszy średni spadek uzyskano dla orientacji wydruku 45° .

Podsumowanie

Zaobserwowano anizotropie właściwości reologicznych ze względu na orientacje wydruku. Na anizotropię właściwości badanego materiału mają wpływ współczynniki lepkości dynamicznej η_1^R , η_2^R , a dokładnie co pokazuje rysunek 7.62, współczynnik η_2^R .

W przypadku modułów sprężystości przedstawionych na rysunku 7.61, a dokładnie ich porównania, można stwierdzić że nie ma znaczących różnic miedzy tymi współczynnikami dla orientacji wydruku 0°, 45°, 90°. Istotne różnice istnieją, ale w ramach tej samej orientacji wydruku np. moduł E_0^R jest wielokrotnie większy niż moduły E_1^R , E_2^R .

Wyniki badań potwierdzają tezę, która brzmi: zjawisko relaksacji naprężeń występuje w materiale PA 2220 wytworzonym technologią selektywnego spiekania proszków SLS, przy założonych parametrach technologicznych, opisać można przy pomocy modelu Maxwella-Wiecherta, którego moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej wyznaczyć można z dokładnością umożliwiającą ich stosowanie w obliczeniach inżynierskich.

Uzyskane krzywe relaksacji naprężeń przedstawione na rysunkach 7.63– 7.68 oraz obliczone naprężenia początkowe σ_{t0} i naprężenia końcowe σ_{tn} pozwalają zastosować je do obliczeń symulacyjny w oprogramowaniach do tego przeznaczonych np. ANSYS.

7.7. Materiał PLA

Badania w materiale PLA przeprowadzono zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziale 7.1.

Przedstawione wyniki badań opublikowano w artykule [119].

Dla materiału PLA analizowano zmienny parametr technologiczny druku 3D liczba konturów (2, 10). Pozostałe parametry stałe technologiczne druku 3D zamieszczono w tabeli 7.39.

Parametry technologiczne	Wartość
Wysokość warstwy, L_t	0,1 mm
Rodzaj wypełnienia	Linear
Gęstość wypełnienia	95%
Orientacja wydruku, P _d	0°
Prędkość poruszania się ekstrudera	80 mm/s
Temperatura dyszy	220°C
Temperatura stołu roboczego	50°C
Parametry badań	
Obciążenie wstępne, F _p	50 N
Prędkość przemieszczenia poprzeczki maszyny w celu osiągnięcia zadanej wartości wydłużenia, V_{mm}	10 mm/s

Tabela 7.39. Parametry technologiczne druku 3D i parametry badań dla materiału PA2200

Czas trwania próby, <i>t</i>	600 s
Pełzanie	
Naprężenie stałe, $\sigma_{const.}$	10 MPa

Łącznie wytworzono 20 próbek w technologii wytłaczania warstwowego materiału MEX, z czego jedna seria miała dwadzieścia powtórzeń. Próbki do badan poddano naprężenią rozciągającym.

Testy pełzania

Wykonano testy pełzania w próbkach z materiału PLA. Zbiorcze wyniki testów pełzania przedstawiono na rysunku 7.69.



Rys. 7.69. Eksperymentalne krzywe pełzania w materiale PLA: a) liczba konturów 2,b) liczba konturów 10

Wstępna analiza krzywych pełzania wskazuje na różne właściwości pełzania i różne rozrzuty otrzymanych wyników ze względu na zastosowaną do druku 3D liczbą konturów. Dla każdej otrzymanej krzywej eksperymentalnej dopasowano pięcioparametrowy model Kelvina-Voighta opisany równaniem (4.75). Przykładowe dopasowania dla próbek o kodach

 $(T^{MEX} - M^{PLA} - N_s^2 - 1)^P$, $(T^{MEX} - M^{PLA} - N_s^{10} - 1)^P$ przedstawiono na

rysunku 7.70.



Rys. 7.70. Przykładowe dopasowania modelu Kelvina-Voighta do krzywych pełzania materiału PLA: a) próbka o kodzie $(T^{MEX} - M^{PLA} - N_s^2 - 1)^P$, b) próbka o kodzie $(T^{MEX} - M^{PLA} - N_s^{10} - 1)^P$

Na podstawie rysunku 7.70 można zauważyć pokrycie się krzywej modelu Kelvina-Voighta (kolor czerwony) z krzywą eksperymentalną (kolor czarny).

Dokonując aproksymacji z zastosowaniem metody Levenberga-Marquardta modelu pięcioparametrowego do krzywych pełzania uzyskano jego parametry. Wartości parametrów modelu Kelvina-Voighta przedstawiono w tabeli 7.40.

 Tabela 7.40. Wartości parametrów równania modelu Kelvina-Voighta i współczynników dopasowania dla materiału PLA

Nr próbki	ε ₀ , %	ε ₁ , %	ε ₂ , %	t ₁ ^P , s	t ₂ ^P , s	Chi ²	R ²
Kod:				$(N_s^2)^P$			
1	4,3	0,7	0,5	293	14	0,00010	0,997

u _C	0,2	0,02	0,1	12	2	0,000034	0,0014
u_A	0,1	0,01	0,02	5	1	0,000015	0,0006
SD	0,2	0,03	0,1	17	3	0,000047	0,002
\overline{x}	4,2	0,5	0,4	255	12	0,00008	0,9959
10	4,6	0,4	0,4	249	14	0,00005	0,997
9	4,4	0,4	0,3	258	16	0,00004	0,998
8	4,4	0,5	0,4	244	11	0,00009	0,995
7	4,1	0,5	0,4	242	12	0,00008	0,996
6	4,3	0,5	0,4	279	12	0,00009	0,996
5	4,0	0,4	0,4	270	15	0,00004	0,998
4	4,1	0,5	0,6	220	7	0,00020	0,991
3	3,9	0,5	0,4	261	11	0,00009	0,995
2	4,1	0,5	0,4	273	14	0,00005	0,997
1	4,2	0,4	0,4	250	11	0,00007	0,996
Kod:				$(N_{s}^{10})^{P}$			
u _c	0,2	0,1	0,03	31	3	0,000034	0,0005
u_A	0,1	0,1	0,02	14	1	0,000015	0,0002
SD	0,2	0,2	0,05	43	4	0,000048	0,0007
\overline{x}	4,6	0,8	0,5	294	16	0,000113	0,9973
10	4,9	0,7	0,6	284	15	0,00010	0,997
9	4,5	0,7	0,5	283	15	0,00009	0,997
8	4,5	0,6	0,5	246	14	0,00008	0,997
7	4,6	0,6	0,5	223	14	0,00010	0,997
6	4,5	1,2	0,5	372	25	0,00006	0,999
5	4,4	1,0	0,6	333	16	0,00010	0,998
4	4,5	0,7	0,5	279	13	0,00010	0,997
3	5,0	0,8	0,6	296	14	0,00020	0,997
2	4,6	0,9	0,6	332	15	0,00020	0,997

Z zawartych w tabeli 7.40 wartości niepewności i odchyleń standardowych wynika, że osiągnięto silne dopasowanie równania (4.75) do krzywych pełzania. Największe wartość niepewności aproksymacji i odchylenia standardowego uzyskano dla czasu retardacji t_1^P Czas retardacji t_1^P inaczej nazywany czasem opóźnienia sprężystego jest związany jak pokazuje wzór (4.74) z współczynnikiem lepkości dynamicznej η_1^P . Z kolei współczynnik ten jest związany z budową fizyczną materiału PLA. Dla parametru ε_0 osiągnięto duże wartości niepewności aproksymacji i odchylenia standardowego, co jest związane z trudnością techniczną realizacji skoku jednostkowego. Parametr ε_0 związany jest również z widocznym na rysunku 7.69 rozrzutem krzywych.

Wartości średnie i odchylenia standardowe parametrów modelu Kelvina-Voighta i współczynników dopasowania uwzględniając wszystkie badane wartości parametrów technologicznych druku 3D przedstawiono w tabeli 7.41.

Tabela 7.41. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla parametrów modelu Kelvina-Voighta oraz współczynniki dopasowania uwzględniając wszystkie analizowane parametry druku 3D – materiał PLA

	ε ₀ ,%	$\epsilon_1,\%$	ε ₂ , %	t ₁ ^{<i>p</i>} , s	t ₂ ^{<i>p</i>} , s	Chi ²	R^2
\overline{x}	4,4	0,6	0,5	274	14	0,000097	0,9966
SD	0,3	0,2	0,1	38	3	0,000049	0,0016

Na podstawie tabeli 7.41 można zauważyć, że największą wartość odchylenie standardowego uzyskano dla czasu retardacji t_1^p .

Z uzyskanych średnich wartości parametrów $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, t_1^P, t_2^P$ przedstawionych w tabeli 7.40 i zadanego stałego naprężenia 10 MPa obliczono wartości modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej. Zestawienie wartości modułów sprężystości, współczynników lepkości dynamicznej oraz współczynników dopasowania przedstawiono na rysunkach 7.71 i 7.72.



Rys. 7.71. Wartości modułów sprężystości dla analizowanych liczb konturów - materiał

PLA



Rys. 7.72. Wartości współczynników lepkości dynamicznej dla analizowanych liczb konturów – materiał PLA

Badania wykazały, że wartości modułów sprężystości E_0^P , E_1^P , E_2^P dla próbek wykonanych z 10 konturami są wyższe w stosunku do próbek wykonanych z 2 konturami.

Porównując wartości modułów sprężystości przedstawione na rysunku 7.71, można stwierdzić że są istotne równice między nimi np.: moduł E_0^P jest kilkakrotnie mniejszy niż moduły E_1^P , E_2^P . W przypadku współczynników lepkości dynamicznej η_1^P , η_2^P wyższe wartości osiągnięto dla próbek o liczbie konturów 10 w porównaniu z próbkami o liczbie konturów 2.

Krzywa pełzania otrzymane na podstawie równania (4.75) i wartości otrzymanych parametrów zamieszczonych w tabeli 7.36 przedstawiono na rysunkach 7.73 i 7.74.



Rys. 7.73. Wykres pełzania materiału PLA i dla liczby konturów N_s^2 : ε_{t0} – odkształcenie początkowe, ε_{EZ} – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^P , t_2^P – czasy retardacji



Rys. 7.74. Wykres pełzania materiału PLA i dla liczby konturów N_s^{10} : ε_{t0} – odkształcenie początkowe, ε_{EZ} – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^P , t_2^P – czasy retardacji

Na rysunkach 7.73–7.74 zaznaczono czasy retardacji t_1^P , t_2^P , które są związkami modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej. Odkształcenie początkowe ε_{t0} i odkształcenie końcowe ε_{EZ} również oznaczono na tych rysunkach. Obliczona asymptota ε_{EZ} funkcji $\varepsilon(t)$ pozwala ekstrapolować krzywą pełzania na dalsze obszary czasowe.

Procentowy wzrost odkształcenia obliczono korzystając ze wzoru (6.4), wyniki zamieszczono w tabeli 7.42.

Tabela 7.42. Procentowy wzrost odkształcenia dla materiału PLA

	R _ε	,%
	N_s^2	N_{s}^{10}
\overline{x}	25,3	20,3
SD	4,0	3,1

W przypadku procentowego wzrostu odkształcenia największą średnią wartość uzyskano dla liczby konturów 2.

Podsumowanie

Oszacowane na drodze dopasowania parametry funkcji pełzania (4.74) dają pełny obraz przeprowadzonej aproksymacji krzywych i potwierdzają przydatność modelu reologicznego do opisu materiału.

Osiągnięto silne dopasowanie przyjętego pięcioparametrowego modelu Kelvina-Voighta do otrzymanych doświadczalnych krzywych pełzania, co potwierdzają wartości współczynników dopasowania Chi^2 , R^2 oraz wartości niepewności aproksymacji i odchylenia standardowego przedstawione w tabeli 7.40.

Dla próbek o liczbie konturów 10 uzyskano wyższe wartości modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej w porównaniu do 2 konturów, ale za to uzyskano niższy wzrost odkształcenia w porównaniu do liczby konturów 2.

Uzyskane krzywe pełzania przedstawione na rysunkach 7.73 i 7.74 mogą zostać użyte do przeprowadzenia symulacji w programowaniach do tego przeznaczonych.

7.8. Zestawienie naprężeń relaksacyjnych ściskających i rozciągających

Badania nad relaksacją naprężeń w materiale PA 2200 zostały przeprowadzone zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziale 7.1.

Analizowany parametr zmienny to rodzaj naprężeń jakim jest poddawana próbka podczas testów relaksacji. Parametry technologiczne druku 3D zastosowane do wytworzenia próbek zostały przedstawione w tabeli 7.43.

Parametry technologiczne	Wartość		
Wysokość warstwy, L _t	0,1 mm		
Gęstość energii, E _d	0,056 J/mm ²		
Orientacja wydruku	0°		
Parametry badań			
Obciążenie wstępne, F_p	100 N		
Prędkość przemieszczenia poprzeczki maszyny w celu osiągnięcia zadanej wartości wydłużenia, V _{mm}	10 mm/s		
Czas trwania próby, <i>t</i>	600 s		
Naprężenia ściskające			
Odkształcenie stałe, ε_{const}	0,315		
Naprężenia rozciągające			
Odkształcenie stałe, ε_{const}	1 mm		

Tabela 7.43. Parametry technologiczne druku 3D i parametry badań dla materiału PA2200

Łączna liczba wytworzonych próbek w technologii selektywnego spiekania proszków to 20 z czego dla jednej serii wykonano 10 powtórzeń. Różnice w zadanych odkształceniach stałych ε_{const} wynikają z zastosowania dwóch typów próbek: wałeczka – ISO 3384 i kształtki – ISO 527.

Testy relaksacji naprężeń

Próbki wykonano z materiału PA 2200 i poddano dwóch rodzajom naprężeń: ściskającym i rozciągającym. Zbiorcze wyniki testów relaksacji naprężeń przedstawiono na rysunku 7.75.



Rys. 7.75. Zbiorcze wykresy testów relaksacji naprężeń w próbkach z materiału PA 2200: a) naprężenia ściskające, b) naprężenia rozciągające

Dla każdej eksperymentalnej krzywej relaksacji naprężeń dokonano dopasowania przy pomocy równania (4.48), określając wartości parametrów $\sigma_0, \sigma_0, \sigma_1, t_1^R, t_2^R$ oraz współczynniki dopasowania *Chi*² i *R*². Przykładowe dopasowania dla próbek o kodach ($T^{SLS} - M^{PA2200} - \sigma_C - 1$)^{*R*}, ($T^{SLS} - M^{PA2200} - \sigma_T - 1$)^{*R*} przedstawiono na rysunku 7.76.



Rys. 7.76. Dopasowanie pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta do krzywej relaksacji eksperymentalnej w materiale PA2200: a) próbka o kodzie ($T^{SLS} - M^{PA2200} - M^{PA2200}$

 $\sigma_{C} - 1)^{R}$, b) próbka o kodzie $(T^{SLS} - M^{PA2200} - \sigma_{T} - 1)^{R}$

Na rysunku 7.76 można zauważyć pokrycie krzywych modelu Maxwella-Wiecherta (kolor czerwony) z krzywymi eksperymentalnymi (kolor czarny).

Wyniki przeprowadzonej aproksymacji zestawiono w tabeli 7.44.

Tabela7.44.WartościparametrówrównaniamodeluMaxwella-Wiechertai współczynników dopasowania dla materiałuPA 2200 – rozciąganie/ściskanie

Nr próbki	σ 0, MPa	σ ₁ , MPa	σ ₂ , MPa	t_1^R , s	t ₂ ^{<i>R</i>} , s	Chi ²	R ²	
Kod:	σ _{Ściskanie}							
1	4,6	0,1	0,2	14	295	0,000006	0,997	
2	4,7	0,1	0,1	13	280	0,000004	0,996	
3	4,6	0,1	0,1	12	270	0,000004	0,996	
4	4,7	0,1	0,1	11	247	0,000003	0,994	
5	4,3	0,1	0,1	12	257	0,000003	0,995	
6	4,6	0,1	0,1	11	258	0,000003	0,995	
7	4,6	0,1	0,1	12	269	0,000003	0,995	
8	4,6	0,1	0,1	12	270	0,000004	0,996	
9	4,7	0,1	0,1	12	262	0,000003	0,996	
10	4,8	0,1	0,1	12	249	0,000004	0,992	
\overline{x}	4,6	0,1	0,1	12	266	0,000037	0,9952	
SD	0,1	0,01	0,02	1	14	0,0000011	0,0013	
u_A	0,05	0,003	0,01	0,2	5	0,0000003	0,0004	
u _c	0,1	0,01	0,02	0,5	9	0,0000007	0,0008	
Kod:				T _{Rozciągan}	nie			
1	8,3	0,7	0,7	10	233	0,00028	0,994	
2	8,3	0,7	0,8	11	246	0,00032	0,994	
3	8,6	0,7	0,8	10	241	0,00028	0,995	
4	8,1	0,7	0,8	11	249	0,00031	0,995	
5	8,2	0,7	0,7	10	249	0,00030	0,994	
6	8,8	0,7	0,8	12	291	0,00033	0,994	
7	8,4	0,7	0,7	11	247	0,00028	0,994	
8	8,5	0,7	0,8	11	256	0,00031	0,995	
9	8,6	0,8	0,9	11	255	0,00033	0,995	
10	8,0	0,7	0,8	12	261	0,00035	0,994	
\overline{x}	8,4	0,7	0,8	11	253	0,00031	0,9944	

SD	0,3	0,02	0,04	1	16	0,000026	0,0005
u _A	0,1	0,01	0,01	0,2	5	0,000083	0,0002
u _c	0,2	0,01	0,03	0,4	10	0,0000166	0,0003

Z zawartych w tabeli 7.44 wartości niepewności aproksymacji i standardowego odchylenia wynika, że dopasowanie równania (4.48) do krzywych eksperymentalnych jest silne. Najwyższą wartość odchylenia standardowego oraz niepewności aproksymacji uzyskano dla czasu relaksacji t_2^R , który związany jest ze współczynnikiem lepkości dynamicznej η_2^R . Współczynnik ten natomiast jest uzależniony od budowy fizycznej materiału w tym przypadku PA 2200. Rozrzut krzywych pokazany na rysunku 7.75 wynika raczej z trudności technicznej realizacji skoku jednostkowego. Ma to wpływ również na wyższe wartości niepewności aproksymacji i odchylenia standardowego parametru σ_0 .

Wartości średnie i odchylenia standardowe parametrów modelu Maxwella-Wiecherta i współczynników dopasowania uwzględniając badane naprężenia ściskające i rozciągające przedstawiono w tabeli 7.45.

Tabela 7.45. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla parametrów modeluMaxwella-Wiecherta oraz współczynniki dopasowania – uwzględniając naprężeniaściskające i rozciągające

	σ ₀ , MPa	σ 1, MPa	σ 2, MPa	t ₁ ^{<i>R</i>} , s	t ₂ ^{<i>R</i>} , s	Chi ²	R ²
\overline{x}	6,5	0,4	0,4	11	259	0,000157	0,995
SD	1,9	0,3	0,4	1	16	0,000158	0,001

Na podstawie tabeli 7.45 można zauważyć, największe odchylenia standardowe uzyskano dla wszystkich parametrów modelu Maxwella-Wiecherta, co potwierdza występowanie znaczących różnic pomiędzy próbkami poddanymi naprężeniom ściskającym, a próbkami poddanymi naprężeniom rozciągającymi.

Na podstawie uzyskanych wartości parametrów modelu zawartych w tabeli 7.44 obliczono moduły sprężystości E_0^R, E_1^R, E_2^R , współczynniki lepkości dynamicznej η_1^R, η_2^R . Wartości tych modułów i współczynników przedstawiono na rysunkach 7.77 i 7.78.



Rys. 7.77. Wartości modułów sprężystości dla poszczególnych naprężeń ściskających i rozciągających – PA2200



Rys. 7.78. Wartości współczynników lepkości dynamicznej dla poszczególnych naprężeń ściskających i rozciągających – PA2200

W celu łatwiejszej interpretacji wyniku dane zaprezentowane na rysunkach 7.77 i 7.78 zostały w skali logarytmicznej $\log_5 x$.

Z danych zwartych na rysunkach 7.77 i 7.78 wynika, że wartości modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej dla naprężeń
rozciągających były ponad czterokrotnie większe od swoich odpowiedników dla naprężeń ściskających. Porównując wartości modułów naprężeń w ramach tych samych analizowanych nieprężeniach to istnieją poważne różnice np. moduł E_0^R jest kilkakrotnie większy od pozostałych E_1^R , E_2^R .

Krzywe relaksacji naprężeń otrzymane na podstawie równania (4.46) i średnich wartości parametrów zamieszczonych w tabeli 7.44. przedstawiono na rysunkach 7.79–7.80.



Rys. 7.79. Krzywa relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla naprężeń ściskających: σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R , t_2^R – czasy relaksacji



Rys. 7.80. Krzywa relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla naprężeń rozciągających: σ_{t0} – naprężenie początkowe, σ_{tn} – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t_1^R, t_2^R – czasy relaksacji

Na rysunkach 7.79–7.80 zaznaczono czasy relaksacji t_1^R , t_2^R , które są związkami modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej oraz naprężenia początkowe σ_{t0} i naprężenia końcowe σ_{tn} . Wyznaczona asymptota σ_{tn} dla funkcji $\sigma(t)$ pozwala ekstrapolować krzywą relaksacji na dalsze obszary czasowe.

Dla materiału PA2200 wyznaczono relaksacje naprężeń po założonym czasie ekspozycji obliczoną na podstawie wzoru 7.1. Wyniki zawarto w tabeli 7.46.

Tabela 7.46. Wyniki badań procentowy spadek naprężenia dla materiału PA2200 – porównanie naprężeń

$R_{\sigma}, \%$	
Naprężenie	ściskające
\overline{x}	4,24
SD	0,65

Naprężenie	rozciągające
\overline{x}	19,58
SD	0,67

Z danych zawartych w tabeli 7.46 można zauważyć, że dla próbek poddanych naprężeniom ściskającym uzyskano ponad 4 krotnie większe wartości procentowego spadku naprężenia niż w przypadku naprężeń ściskających.

Podsumowanie

Uzyskane wartości niepewności aproksymacji i odchyleń standardowych przedstawione w tabeli 7.44 potwierdzają silne dopasowanie pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta do krzywych relaksacji.

W przypadku modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej uzyskujemy dla naprężeń ściskających ponad dziesięciokrotnie mniejsze wartości niż w przypadku naprężeń rozciągających, co może być związane z adhezją pomiędzy warstwami w modelu wytwarzanym przyrostowo. Również budowa polimerów tzw. kłębkowa czyli długie łańcuchy węglowodorów tworzą potocznie tzw. kłębek czyli zwijają się. Taki "kłębek" inaczej zachowuje się podczas ściskania, a inaczej podczas rozciągania.

8. Wnioski

Szczegółowe wnioski dotyczące omówionych w rozprawie doktorskiej wyników badań zostały zaprezentowane w poszczególnych podrozdziałach dotyczących badanych materiałów. Poniżej przedstawiono jedynie końcowe konkluzje ogólne.

- 1. Pięcioparametrowy model Maxwella-Wiecherta oraz pięcioparametrowy model Kelvina-Voighta jest wystarczający do opisu krzywych relaksacji naprężeń, co zostało potwierdzone graficznie oraz poprzez obliczone wartości odchyleń standardowych SD i niepewności typu u_A . Wartości współczynników dopasowania R^2 i Chi^2 przedstawione w tabelach w rozdziale 7 potwierdzają, że modele te są silnie dopasowane do krzywych eksperymentalnych.
- 2. Czasy t_1^P (zjawisko pełzania) i t_2^R (zjawisko relaksacji naprężeń) są związane ze współczynnikami lepkości dynamicznej. Wysokie wartości niepewności całkowitej dla tych czasów mogą wynikać ze złożoności struktury materiału, ponieważ wytworzony model jest zbudowany z warstw nałożonych na siebie.
- 3. Dla wszystkich badanych materiałów wytwarzanych technologiami: selektywnego spiekania proszków (SLS), ekstruzji materiału (MEX) i utwardzania fotoakrylowych żywic polimerowych (PJM) zaobserwowano występowanie anizotropii właściwości reologicznych. Anizotropia ta wynikała z orientacji modelu na platformie roboczej drukarki 3D podczas procesu druku, w tym przypadku 0°, 45°, 90°.
- 4. W przypadku zjawiska relaksacji naprężeń dla modułu sprężystości E_0 uzyskano wyższe wartości niż w pozostałych modułach

sprężystości E_1 , E_2 . Spowodowane jest to tym, że moduł E_0 odpowiada za natychmiastową odpowiedź sprężystą materiału na przyłożone odkształcenie. Warto dodać że moduł ten odpowiada modelowi Hooke'a, który w całym układzie modelu Maxwella-Wiecherta jest połączony równolegle z pozostałymi poszczególnymi modelami. Model Hooke'a, związany z modułem sprężystości E_0 nie jest połączony szeregowo, z modelem Newtona, związanym ze współczynnikiem lepkości dynamicznej.

- 5. Dla zjawiska pełzania uzyskano wartości modułu sprężystości E_0 niższe niż w przypadku pozostałych modułów sprężystości E_1 , E_2 . Spowodowane jest to tym że w przypadku modelu Kelvina-Voighta występuje połączenie równoległe poszczególnych modeli. Model Hooke'a związany z modułem sprężystości E_0 jest dołączony szeregowo do modelu Maxwella.
- 6. W przypadku współczynników lepkości dynamicznej η_1 i η_2 ich wartości różnią się od siebie w zależności od zjawiska reologicznego. Dla relaksacji naprężeń wartości współczynnika lepkości dynamicznej η_1 uzyskano wyższe niż w przypadku współczynnika lepkości dynamicznej η_2 . W zjawisku pełzania jest odwrotnie. Spowodowane jest to różnymi skalami czasowymi odpowiedzi lepkosprężystych. W modelu Maxwella-Wiecherta wartości czasu relaksacji t_1 są wyższe od czasu relaksacji t_2 . Dla zjawiska pełzania czas retardacji t_1 jest niższy od czasu retardacji t_2 . Czasy te mają związek ze współczynnikami lepkości dynamicznej.
- Stwierdzono istotne różnice między relaksacją naprężeń ściskających, a relaksacją naprężeń rozciągających. W przypadku materiałów

otrzymywanych technologiami addytywnymi, różnice wynikają w głównej mierze z warstwowej budowy modeli przy czym siły występujące miedzy warstwami są to głownie siły adhezyjne.

- 8. Wartości modułów spreżystości i współczynników lepkości dynamicznej będą różne w zależności od zastosowanego procesu wytwarzania druku 3D, parametrów technologicznych druku 3D oraz materiału zastosowanego do druku. W zwiazku z tym ich jest bardzo istotne w przypadku gdy chcemy dany materiał i technologie zastosować do wytworzenia elementu pracujacego pod wpływem naprężenia w czasie oraz gdy chcemy porównywać materiały wytworzone technologiami przyrostowymi. Porównanie pozwoli na wybranie odpowiedniego materiału do wytwarzania elementu. Również wyznaczenie krzywych relaksacji naprężeń i pełzania dla materiału na podstawie obliczonych modułów sprężystości i współczynników lepkości dynamicznej jest istotne, ponieważ można je zaaplikować na potrzeby symulacji komputerowych.
- 9. Wyznaczone moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej mogą znaleźć praktyczne zastosowanie w projektowaniu oraz optymalizacji elementów mechanicznych, takich jak uszczelki mechaniczne, kompozyty lub połączenia zatrzaskowe. Umożliwiają one dokładne modelowanie zachowań materiałów pod obciążeniem, co pozwala na poprawę trwałości i efektywności projektowanych rozwiązań inżynieryjnych. Ponadto dane te wykorzystane mogą być w programach do symulacji wykorzystujących metody elementów skończonych np.: ANSYS, Abaqus.

Podsumowując należy stwierdzić, że cel główny pracy został osiagniety. Określono właściwości reologiczne elementów wytwarzanych za pomocą technologii przyrostowych SLS i FDM (technologia MEX) zastosowaniem modeli ciał idealnych (Maxwella-Wiecherta Z i Kelvina-Voighta). Została również potwierdzona hipoteza badawcza która naprężeń brzmi: Ziawiska relaksacii i pełzania wystepujace w materiałach wytwarzanych technologiami przyrostowymi przy założonych parametrach technologicznych, zwłaszcza technologia FDM (technologia MEX) i SLS, opisać można przy pomocy wieloparametrowych modeli reologicznych, których moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej wyznaczyć można z dokładnością umożliwiajacą ich stosowanie w obliczeniach inżynierskich.

Badania nad zjawiskami relaksacji naprężeń i pełzania elementów wytwarzanych technologiami druku 3D, są obecnie przedmiotem zainteresowań badaczy i próbuje się wyliczyć moduły sprężystości, współczynniki lepkości dynamicznej, procentowe zmiany naprężeń lub procentowe zmiany odkształceń (w zależności od zjawiska) dla poszczególnych materiałów stosowanych w druku 3D.

Naturalnym kierunkiem badań jest dalsza analiza innych parametrów technologicznych druku 3D oraz poszerzenie grupy materiałowej np. materiały elastyczne, nylon, z dodatkiem włókna węglowego, kevlarem. Istotnym jest również analiza niepewności dopasowania, poszerzona być może o opracowanie budżetu niepewności. Warto też przeanalizować dwa zjawiska relaksacji naprężeń i pełzania poddając modele naprężeniom zginającym.

259

Literatura

Książki:

- B1. Horvath J. Mastering 3D Printing, 1st ed.; Apress: Berkeley, USA, 2014.
- B2. Budzik G.; Woźniak J.; Przeszłowski Ł. Druk 3D jako element przemysłu przyszłości. Analiza rynku i tendencje rozwoju, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej: Rzeszów, Polska, 2022.
- B3. Narayana B.; Venkatesh S. Building of Quality Prototypes by Using SLS 3D Printing Technology An Experimental Ivestigation, LAP Lambert Academic Publishing: Saarbrücken, Niemcy, 2021.
- B4. Ehsan T.; Dyuti S. *Metal additive manufacturing*, Wiley: Hoboken, USA, 2021.
- B5. Patel A. B. *Electrochemistry for Bioanalysis*, 1st ed.; Elsevier: Amsterdam, Holandia, 2021.
- B6. Selahattin B. *Current Research In Engineering*, Gece Publishing: Ankara, Turcja 2022.
- B7. Meskó B. The Guide to the Future of Medicine: Technology AND The Human Touch, Webicina Kft: Budapeszt, Węgry, 2014.
- B8. Sharma V. K.; Kumar A. Additive Manufacturing in Industry 4.0, 1st ed.; CRC Press: Boca Raton, USA, 2022.
- B9. Martin D. J.; Mody C. Between Making and Knowing, World Scientific Publishing Co Pte Ltd: Singapore, Singapur, 2020.
- B10. Gibson I.; Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, 2nd ed.; Springer: New York, USA, 2015.

- B11. Izdebska-Podsiadły J. Polymers for 3D Printing: Methods, Properties, and Characteristics, William Andrew: Norwitch, USA, 2022.
- B12. Godec D. *A Guide to Additive Manufacturing*, 1st ed.; Springer: Cham, Szwajcaria, 2022.
- B13. Zapka W. Handbook of Industrial Inkjet Printing: A Full System Approach, Wiley: Hoboken, USA, 2017.
- B14. Mezger G. T. *The Rheology Handbook*, 4th ed.; Vincentz Network: Hanover, Niemcy, 2014.
- B15. Flugge S. Elasticity and Plasticity, Springer: Berlin, Niemcy, 1958.
- B16. Phan-Thien N.; Mai-Duy N. Understanding Viscoelasticity: An Introduction to Rheology, 3rd ed.; Springer: Singapore, Singapur, 2017.
- B17. Altenbach H.; Skrzypek J. J. Creep and damage in materials and structures, Springer: Vienna, Austria, 1999.
- B18. Lakes R. *Viscoelastic Materials*, Cambridge University Press: Cambridge, Wielka Brytania, 2009.
- B19. Shaw T. M. Introduction to Polymer Rheology, Wiley: Hoboken, USA, 2012.
- B20. Gupta R. B. *Rheology Applied in Polymer Processing*, CRC Pres: Boca Raton, USA, 2022.
- B21. Bochnia J. Wybrane właściwości fizyczne materiałów kształtowanych przyrostowo, Politechnika Świętokrzyska: Kielce, Polska, 2018.
- B22. Salençon J. Viscoelastic Modeling for Structural Analysis, Wiley: Hoboken, USA, 2019.
- B23. Sharma A. Advances in 3D Printing, IntechOpen: London, Wielka Brytania, 2023.

- B24. Han D. CH. Rheology and Processing of Polymeric Materials: Volume 1: Polymer Rheology, Oxford University Press: Oxford, Wielka Brytania, 2007.
- B25. Dealy M. J.; Read J. D.; Larson G. R. Structure and Rheology of Molten Polymers, 2nd ed.; Hanser: Munich, Niemcy, 2006.

Artykuły:

- Jiménez M.; Romero L.; Domínguez I.A.; Espinosa M.D.M.; Domíngue M. Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. Complexity, 2019, doi:10.1155/2019/9656938.
- Wirth M.; Thiesse F. Shapeways and the 3D Printing Revolution. ECIS 2014 Proceedings - 22nd European Conference on Information Systems, Tel Awiw, Israel, 9-11 czerwca, Association for Information Systems, USA, 2014, s. 0–14.
- Nebrida J.A. Automated Onsite Construction: 3D Printing Technology. Journal of Engineering Research and Reports, 2022, s. 47–55, doi:10.9734/jerr/2022/v23i117590.
- Rajora A.; Kumar R.; Singh R.; Sharma S.; Kapoor S.; Mishra A. 3D Printing: A Review on the Transformation of Additive Manufacturing. International Journal of Applied Pharmaceutics, 2022, nr 14, s. 35–47, doi:10.22159/ijap.2022v14i4.44597.
- Shahrubudin N.; Lee T.C.; Ramlan R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. Procedia Manufacturing, 2019, nr 35, s. 1286–1296, doi:10.1016/j.promfg.2019.06.089.

- Kundu M. Additive Manufacturing Process (3D Printing): "A Critical Review of Techniques Applications & Future Scope". International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2022, doi: 10.17577/IJERTV11IS100065.
- Djurovic S.; Mitrovica K.; Blagojevic M. 3D Printing: Technology, Materials, and Applications in the Manufacturing Industry. 15th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering, Banja Luce, Bośnia i Hercegowina, 27–29 maja, Wydział Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu w Banja Luce, Bośnia i Hercegowina, 2022.
- Udroiu R.; Braga I.C. Polyjet Technology Applications for Rapid Tooling. MATEC Web of Conferences, 2017, nr 112, s. 1–6, doi:10.1051/matecconf/201711203011.
- Bagheri A.; Jin J. *Photopolymerization in 3D Printing*. ACS Applied Polymer Materials, 2019, nr 1, s. 593–611, doi:10.1021/acsapm.8b00165.
- Li H.; Chen C.; Yi R.; Li Y.; Wu J. Ultrasonic Welding of Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites: A Review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, nr 120, s. 29– 57, doi:10.1007/s00170-022-08753-9.
- Wong K. v.; Hernandez A. *A Review of Additive Manufacturing*. ISRN Mechanical Engineering, 2012, s. 1–10, doi:10.5402/2012/208760.
- Arif M.; Asif M.; Ahmed I. *Additive Manufacturing & Composite A Review*. International Journal of Engineering and Manufacturing Science, 2017, tom 7, nr 2, s. 293–307.

- Soomro A.A.; Faullant R.; Schwarz E.J. 3D Printing for Incumbent Firms and Entrepreneurs. An Enterprise Odyssey: Saving the Sinking Ship Through Human Capital, Zagreb, Croatia, 8-11 july, Varazdin Development and Entrepreneurship Agency (VDEA), Croatia, 2016, s. 291–298.
- Alabi M.O. Big Data, 3D Printing Technology, and Industry of the Future. International Journal of Big Data and Analytics in Healthcare, 2018, nr 2, s. 1–20, doi:10.4018/ijbdah.2017070101.
- Tripathi S.; Mandal S.S.; Bauri S.; Maiti P. 3D Bioprinting and Its Innovative Approach for Biomedical Applications. MedComm (Beijing), 2023, nr 4, s. 1–38, doi:10.1002/mco2.194.
- Fakhruddin K.; Al-Tam B. Y. H.; Sayed A. N.; Mesbah Z.; Pereira A. M. P. A. J.; Syaputri A. E. T.; Jamaludin M. I. *3D Bioprinting: Introduction and Recent Advancement*. Journal of Medical Device Technology, 2022, nr 1, s. 25–29, doi:10.11113/jmeditec.v1n1.13.
- al Jassmi H.; al Najjar F.; Mourad A.H.I. Large-Scale 3D Printing: The Way Forward. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2018, nr 324, doi:10.1088/1757-899X/324/1/012088.
- Sahafnejad-Mohammadi I.; Karamimoghadam M.; Zolfagharian A.; Akrami M.; Bodaghi M. *4D Printing Technology in Medical Engineering: A Narrative Review.* Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022, nr 44, doi:10.1007/s40430-022-03514-x.
- Mathu V.; Agarwal P.; Srinivasan V.; Panwar A.; Vasanthan K.S. Facet of 4D Printing in Biomedicine. Journal of Materials Research, 2022, s. 1–17, doi:10.1557/s43578-022-00779-9.

- Somireddy M.; Czekanski A. Anisotropic Material Behavior of 3D Printed Composite Structures – Material Extrusion Additive Manufacturing. Materials & Design, 2020, nr 195, s. 108953, doi:10.1016/j.matdes.2020.108953.
- Forster A.M. Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability; National Institute of Standards and Technology, 2015, tom 1, doi:10.6028/NIST.IR.8059.
- Peterson A.M.; Kazmer D.O. Predicting Mechanical Properties of Material Extrusion Additive Manufacturing-Fabricated Structures with Limited Information. Scientific Reports, 2022, nr 12, s. 14736, doi:10.1038/s41598-022-19053-3.
- Ranjan R.; Kumar D.; Kundu M.; Chandra Moi S. A Critical Review on Classification of Materials Used in 3D Printing Process. Materials Today: Proceedings, 2022, nr 61, s. 43–49, doi:10.1016/J.MATPR.2022.03.308.
- Muralidhara H.B.; Banerjee S. 3D Printing Technology and Its Diverse Applications. Apple Academic Press, 2021, doi:10.1201/9781003145349.
- Jeyaprakash N.; Cheepu M.M.; Yang C. Advances in Additive Manufacturing Processes. Advances in Additive Manufacturing Processes, 2021, doi:10.2174/97898150363361210101.
- Agarwal V.; Jawade S.; Atre S.; Kulkarni O. *The Role of Mechanical Testing in Additive Manufacturing: Review*. Material Science, Engineering and Applications, 2021, nr 1, s. 21–31, doi:10.21595/msea.2021.22258.

- Ziółkowski G.; Gruber K.; Tokarczyk E.; Roszak R.; Ziegenhorn M. X-Ray Computed Tomography for the Ex-Situ Mechanical Testing and Simulation of Additively Manufactured IN718 Samples. Additive Manufacturing, 2021, nr 45, doi:10.1016/j.addma.2021.102070.
- Kantaros A.; Diegel O.; Piromalis D.; Tsaramirsis G.; Khadidos A.O.; Khadidos A.O.; Khan F.Q.; Jan S. 3D Printing: Making an Innovative Technology Widely Accessible through Makerspaces and Outsourced Services. Materials Today: Proceedings, 2021, nr 49, s. 2712–2723, doi:10.1016/J.MATPR.2021.09.074.
- Samiei N. Recent Trends on Applications of 3D Printing Technology on the Design and Manufacture of Pharmaceutical Oral Formulation: A Mini Review. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 2020, nr 9. doi: 10.1186/s43088-020-00040-4.
- Hsu C.; Williams T.; Yu X. Recent Advancements and Trends in 3D Printing for Biomedical Applications History of 3D Printing. ChemRxiv, 2023, s. 1–36, doi:10.26434/chemrxiv-2023-03c1m.
- Öztürk G.B. The Future of 3D Printing Technology in the Construction Industry: a Systematic Literature Review. European Journal of Contemporary Architecture and the City, 2018, tom 3, doi: 10.26434/chemrxiv-2023-03c1m.
- Li B.; Zhang M.; Lu Q.; Zhang B.; Miao Z.; Li L.; Zheng T.; Liu P. *Application and Development of Modern 3D Printing Technology in the Field of Orthopedics*. Biomedical Research International, 2022, doi: 10.1155/2022/1075968.

- Bao Y. Recent Trends in Advanced Photoinitiators for Vat Photopolymerization 3D Printing. Macromolecular Rapid Communications, 2022, nr 43, doi: 10.1002/marc.202200202.
- Yuan Y. Research Status and Development Trend of 3D Printing Technology. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, tom 711, nr 1, doi:10.1088/1757-899X/711/1/012017.
- Kopec J.; Pekarcikova M.; Kliment M. 3D Printing Methods Used in Engineering 3D Printing Methods Used in Engineering Fused Deposition Modeling - FDM. Atec, 2023, nr 9, doi:10.22306/atec.v9i1.165.
- Kantaros A.; Diegel O.; Piromalis D.; Tsaramirsis G.; Khadidos A.O.; Khadidos A.O.; Khan F.Q.; Jan S. 3D Printing: Making an Innovative Technology Widely Accessible through Makerspaces and Outsourced Services. Materials Today: Proceedings, 2021, tom 49, s. 2712–2723. doi:10.1016/j.matpr.2021.09.074.
- Volgin O.; Shishkovsky I. Material Modelling of FDM Printed PLA Part. Engineering Solid Mechanics, 2021, nr 9, s. 153–160, doi:10.5267/j.esm.2020.12.004.
- Ibrulj J.; Dzaferovic E.; Obucina M. Determination of Relaxation and Creep Modulus of Polymer Materials Obtained by 3D Printing. Lecture Notes in Networks and Systems, 2020, s. 256–266, doi:10.1007/978-3-030-46817-0_29.
- 39. Hossain M.; Navaratne R.; Perić D. 3D Printed Elastomeric Polyurethane: Viscoelastic Experimental Characterizations and Constitutive Modelling with Nonlinear Viscosity Functions.

International Journal of Non-Linear Mechanics, 2020, nr 126, doi:10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103546.

- Dogan O. Short-Term Creep Behaviour of Different Polymers Used in Additive Manufacturing under Different Thermal and Loading Conditions. Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering, 2022, nr 68, s. 451–460, doi:10.5545/sv-jme.2022.191.
- Ibrulj J.; Obucina M.; Dzaferovic E. Modeling of Viscoelastic Behavior of 3D Printed Polimeric Materials. Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, 2020, nr 31, s. 328–333, doi:10.2507/31st.daaam.proceedings.046.
- Verga A.S.; Tucker S.J.; Gao Y.; Plaskett A.M.; Hollister S.J. Nonlinear Viscoelastic Properties of 3D-Printed Tissue Mimicking Materials and Metrics to Determine the Best Printed Material Match to Tissue Mechanical Behavior. Frontiers in Mechanical Engineering, 2022, nr 8, s. 1–15, doi:10.3389/fmech.2022.862375.
- Kozior T.; Kundera C. Rheological Properties of Cellular Structures Manufactured by Additive PJM Technology. Tehnicki Vjesnik, 2021, nr 28, s. 82–87, doi:10.17559/TV-20191007145545.
- Bertocco A.; Bruno M.; Armentani E.; Esposito L.; Perrella M. Stress Relaxation Behavior of Additively Manufactured Polylactic Acid (PLA). Materials, 2022, nr 15, doi:10.3390/ma15103509.
- Krönert M.; Schuster T.J.; Zimmer F.; Holtmannspötter J. Creep Behavior of Polyamide 12, Produced by Selective Laser Sintering with Different Build Orientations. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, nr 121, s. 3285–3294, doi:10.1007/s00170-022-09446-z.

- Tsybin N.Y.; Turusov R.A.; Andreev V.I. Comparison of Creep in Free Polymer Rod and Creep in Polymer Layer of the Layered Composite. Procedia Engineering, 2016, nr 153, s. 51–58, doi:10.1016/j.proeng.2016.08.079.
- 47. Çavuş V.; Mengeloğlu F. Odun Plastik Kompozitlerin Gerilme-Gevşeme Davranışlarının Incelenmesi. Turkish Journal of Forestry | Türkiye Ormancılık Dergisi, 2022, s. 299–304, doi:10.18182/tjf.1139030.
- Yamaguchi K.; Thomas A.G.; Busfield J.J.C. Stress Relaxation, Creep and Set Recovery of Elastomers. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2015, nr 68, s. 66–70, doi:10.1016/j.ijnonlinmec.2014.07.004.
- Ye J.; Yao T.; Deng Z.; Zhang K.; Dai S.; Liu X. A Modified Creep Model of Polylactic Acid (PLA-Max) Materials with Different Printing Angles Processed by Fused Filament Fabrication. Journal of Applied Polymer Science, 2021, nr 138, s. 1–15, doi:10.1002/app.50270.
- Reis P.N.B.; Valvez S.; Ferreira J.A.M. Creep and Stress Relaxation Behaviour of 3D Printed Nanocomposites. Procedia Structural Integrity, 2022, nr 37, s. 934–940, doi:10.1016/j.prostr.2022.02.028.
- Valvez S.; Silva A.P.; Reis P.N.B. Compressive Behaviour of 3D-Printed PETG Composites. Aerospace, 2022, nr 9, doi:10.3390/AEROSPACE9030124.
- Szot W. Stress Relaxation in Samples Made of Acrylonitrile Butadiene Styrene Material Manufactured by Fused Deposition Modelling. Mechanik, 2021, nr 94, s. 46–50, doi:10.17814/MECHANIK.2021.12.16.

- Rabiei N.; Amirshahi S.H.; Haghighat Kish M. Description of Physical Aging Kinetics of Glassy Polymers by Interpretation of Parameters of the Kohlrausch-Williams-Watts Relaxation Function via Simulation. Physical Review E, 2019, nr 99, s. 1–11, doi:10.1103/PhysRevE.99.032502.
- Xie R.; Shi Q.; Chen G. Improved Distortion Prediction in Additive Manufacturing Using an Experimental-Based Stress Relaxation Model. Journal of Materials Science & Technology, 2020, nr 59, s. 83–91, doi:10.1016/j.jmst.2020.04.056.
- Luo J.; Luo Q.; Zhang G.; Li Q.; Sun G. On Strain Rate and Temperature Dependent Mechanical Properties and Constitutive Models for Additively Manufactured Polylactic Acid (PLA) Materials. Thin-Walled Structures, 2022, nr 179, s. 109624, doi:10.1016/j.tws.2022.109624.
- Abusabir A.; Khan M.A.; Asif M.; Khan K.A. Effect of Architected Structural Members on the Viscoelastic Response of 3D Printed Simple Cubic Lattice Structures. Polymers, 2022, nr 14, s. 618, doi:10.3390/polym14030618.
- Duan X.; Yuan H.; Tang W.; He J.; Guan X. An Engineering Prediction Model for Stress Relaxation of Polymer Composites at Multiple Temperatures. Polymers 2022, nr 14, s. 1–19, doi:10.3390/polym14030568.
- 58. Firlej M.; Zaborowicz K.; Zaborowicz M.; Firlej E.; Domagała I.; Pieniak D.; Igielska-Kalwat J.; Dmowski A.; Biedziak B. Mechanical Properties of 3D Printed Orthodontic Retainers. International Journal

of Environmental Research and Public Health, 2022, nr 19, s. 5775, doi:10.3390/ijerph19095775.

- Adamczak S.; Bochnia J. Estimating the Approximation Uncertainty for Digital Materials Subjected to Stress Relaxation Tests. Metrology and Measurement Systems, 2016, nr 23, s. 545–553, doi:10.1515/mms-2016-0048.
- Bochnia J.; Blasiak S. *The Creep of Material Obtained Using SLS Technology*. MM Science Journal, 2020, s. 3774–3778, doi:10.17973/MMSJ.2020 03 2019122.
- Bochnia J.; Blasiak S. Stress Relaxation and Creep of a Polymer-Aluminum Composite Produced through Selective Laser Sintering. Polymers, 2020, nr 12, s. 830, doi:10.3390/POLYM12040830.
- Liu Y.; Li Q.; Ren Z.; Jian Z.; Luo, H.; Zhang X. Effect of Process Parameters on Stress Field of Laser Additive Manufacturing. Machines, 2022, nr 10, doi:10.3390/machines10121197.
- Kozior T. The Influence of Selected Selective Laser Sintering Technology Process Parameters on Stress Relaxation, Mass of Models, and Their Surface Texture Quality. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2020, nr 7, s. 126–138, doi:10.1089/3dp.2019.0036.
- Lima A.L.; Pires F.Q.; Hilgert L.A.; Sa-Barreto L.L.; Gratieri T.; Gelfuso G.M.; Cunha-Filho M. Oscillatory Shear Rheology as an In-Process Control Tool for 3D Printing Medicines Production by Fused Deposition Modeling. Journal of Manufacturing Processes, 2022, nr 76, s. 850–862, doi:10.1016/j.jmapro.2022.03.001.
- 65. Bernagozzi G.; Battegazzore D.; Arrigo R.; Frache A. Optimizing the Rheological and Thermal Behavior of Polypropylene-Based

Composites for Material Extrusion Additive Manufacturing Processes. Polymers, 2023, nr 15, doi:10.3390/polym15102263.

- Cieślik M.; Rodak A.; Susik A.; Wójcik N.; Szociński M.; Ryl J.; Formela K. Multiple Reprocessing of Conductive PLA 3D-Printing Filament: Rheology, Morphology, Thermal and Electrochemical Properties Assessment. Materials, 2023, nr 16, doi:10.3390/ma16031307.
- Hasib A.G.; Niauzorau S.; Xu W.; Niverty S.; Kublik N.; Williams J.; Chawla N.; Song K.; Azeredo B. *Rheology Scaling of Spherical Metal Powders Dispersed in Thermoplastics and Its Correlation to the Extrudability of Filaments for 3D Printing*. Additive Manufacturing, 2021, nr 41, s. 101967, doi:10.1016/j.addma.2021.101967.
- Moldovan C.; Cosma C.; Berce P.; Balc N. Theoretical Analysis and Practical Case Studies of Sla, Polyjet and Fdm Manufacturing Techniques. Acta Technica Napocensis Series-Applied Mathematics Mechanics and Engineering, 2018, nr 61, s. 401–408.
- Zhang P.; Wang Z.; Li J.; Li X.; Cheng L. From Materials to Devices Using Fused Deposition Modeling: A State-of-Art Review Nanotechnology Reviews, 2020, nr 9, s. 1594–1609, doi:10.1515/ntrev-2020-0101.
- Pervaiz S.; Qureshi T.A.; Kashwani G.; Kannan S. 3D Printing of Fiber-Reinforced Plastic Composites Using Fused Deposition Modeling: A Status Review. Materials, 2021, tom 14, s 4520, doi:10.3390/MA14164520.

- Blaj M.; Oancea G. Fused Deposition Modelling Process: A Literature Review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, s. 1009, doi:10.1088/1757-899X/1009/1/012006.
- Blok L.G.; Longana M.L.; Yu H.; Woods B.K.S. An Investigation into 3D Printing of Fibre Reinforced Thermoplastic Composites. Additive Manufacturing, 2018, nr 22, s. 176–186, doi:10.1016/J.ADDMA.2018.04.039.
- Baechle-Clayton M.; Loos E.; Taheri M.; Taheri H. Failures and Flaws in Fused Deposition Modeling (FDM) Additively Manufactured Polymers and Composites. Journal of Composites Science, 2022, nr 6, doi:10.3390/jcs6070202.
- Wickramasinghe S.; Do T.; Tran P. FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments. Polymers, 2020, tom 12, s. 1529, doi:10.3390/POLYM12071529.
- Greeff G.P.; Schilling M. Closed Loop Control of Slippage during Filament Transport in Molten Material Extrusion. Additive Manufacturing, 2017, nr 14, s. 31–38, doi:10.1016/j.addma.2016.12.005.
- Galantucci L.M.; Bodi I.; Kacani J.; Lavecchia F. Analysis of Dimensional Performance for a 3D Open-Source Printer Based on Fused Deposition Modeling Technique. Procedia CIRP, 2015, nr 28, s. 82–87, doi:10.1016/J.PROCIR.2015.04.014.
- 77. Jin Y.; He Y.; Fu G.; Zhang A.; Du J. A Non-Retraction Path Planning Approach for Extrusion-Based Additive Manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, nr 48, s.132–144, doi:10.1016/J.RCIM.2017.03.008.

- Zhao H.; Liu X.; Zhao W.; Wang G.; Liu B. An Overview of Research on FDM 3D Printing Process of Continuous Fiber Reinforced Composites. Journal of Physics: Conference Series, 2019, s. 1213, doi:10.1088/1742-6596/1213/5/052037.
- Safari F.; Kami A.; Abedini V. 3D Printing of Continuous Fiber Reinforced Composites: A Review of the Processing, Pre- and Post-Processing Effects on Mechanical Properties. Polymers and Polymer Composites, 2022, nr 30, doi:10.1177/09673911221098734/ASSET/IMAGES/LARGE/10.117 7_09673911221098734-FIG1.JPEG.
- Jin Y.A.; Li H.; He Y.; Fu J.Z. *Quantitative Analysis of Surface Profile in Fused Deposition Modelling*. Additive Manufacturing, 2015, nr 8, s. 142–148, doi:10.1016/J.ADDMA.2015.10.001.
- Lupone F.; Padovano E.; Casamento F.; Badini C. Process Phenomena and Material Properties in Selective Laser Sintering of Polymers: A Review. Materials, 2022, nr 15, doi:10.3390/ma15010183.
- Chatham C.A.; Long T.E.; Williams C.B. A Review of the Process Physics and Material Screening Methods for Polymer Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. Progress in Polymer Science, 2019, nr 93, s. 68–95, doi:10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2019.03.003.
- Zhang L.; Boutaous M.; Xin S. 3D Modeling of Polymer Selective Laser Sintering Process: Laser–Polymer Interaction Modeling. Key Engineering Materials, 2022, nr 926, s. 349–357, doi:10.4028/p-0rss1k.
- Kulkarni M. Selective Laser Sintering Process a Review. Technical Research Organistaion India, 2015, tom 2, ISSN: 2393–8374.

- Drummer D.; Greiner S.; Zhao M.; Wudy K. A Novel Approach for Understanding Laser Sintering of Polymers. Additive Manufacturing, 2019, nr 27, s. 379–388, doi:10.1016/J.ADDMA.2019.03.012.
- Indhu R.; Vivek V.; Loganathan S.; Bharatish A.; Soundarapandian S. Overview of Laser Absorptivity Measurement Techniques for Material Processing. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2018, nr 5, s. 458–481, doi:10.1007/S40516-018-0075-1/FIGURES/19.
- Mokrane A.; Boutaous M.; Xin S. Process of Selective Laser Sintering of Polymer Powders: Modeling, Simulation, and Validation. Comptes Rendus Mécanique, 2018, nr 346, s. 1087–1103, doi:10.1016/J.CRME.2018.08.002.
- Băilă D.I.; Doicin C.V.; Mocioiu O.C. Development of Powders for Selective Laser Sintering. Applied Mechanics and Materials, 2015, nr 760, s. 521–526, doi:10.4028/www.scientific.net/amm.760.521.
- Chiririwa H. Characterization of Polymer Powders and Effects of Powder Reuse in Selective Laser Sintering. Asian Journal of Chemistry, 2021, nr 33, s. 658–664, doi:10.14233/ajchem.2021.23065.
- Yuan S.; Shen F.; Chua C.K.; Zhou K. Polymeric Composites for Powder-Based Additive Manufacturing: Materials and Applications. Progress in Polymer Science, 2019, nr 91, s. 141–168, doi:10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2018.11.001.
- Haeri S.; Wang Y.; Ghita O.; Sun J. Discrete Element Simulation and Experimental Study of Powder Spreading Process in Additive Manufacturing. Powder Technology, 2017, nr 306, s. 45–54, doi:10.1016/J.POWTEC.2016.11.002.

- Harun, W.S.W.; Kamariah, M.S.I.N.; Muhamad, N.; Ghani, S.A.C.; Ahmad, F.; Mohamed, Z. A Review of Powder Additive Manufacturing Processes for Metallic Biomaterials. Powder Technology, 2018, nr 327, s. 128–151, doi:10.1016/J.POWTEC.2017.12.058.
- Elkaseer A.; Chen K.J.; Janhsen J.C.; Refle O.; Hagenmeyer V.; Scholz S.G. Material Jetting for Advanced Applications: A State-ofthe-Art Review, Gaps and Future Directions. Additive Manufacturing, 2022, nr 60, s. 103270, doi:10.1016/j.addma.2022.103270.
- 94. Chadha C.; Olaivar G.; Patterson A.E.; Jasiuk I.M. Design for Multi-Material Manufacturing Using Polyjet Printing Process: A Review. Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, 2022, nr 5, doi:10.1115/DETC2022-91187.
- 95. Aslani K.-E.; Korlos A.; Kechagias J.D.; Salonitis K. Impact of Process Parameters on Dimensional Accuracy of PolyJet 3D Printed Parts Using Grey Taguchi Method. MATEC Web of Conferences, 2020, nr 318, doi:10.1051/matecconf/202031801015.
- Ituarte I.F.; Boddeti N.; Hassani V.; Dunn M.L.; Rosen D.W. Design and Additive Manufacture of Functionally Graded Structures Based on Digital Materials. Additive Manufacturing, 2019, nr 30, s. 100839, doi:10.1016/J.ADDMA.2019.100839.
- Bongiovanni R.; Dalle Vacche S.; Vitale A.; Vitale S.D.; Photoinduced A.; Paolo F.; Mantia L.; Malucelli G. *Photoinduced Processes as a Way to Sustainable Polymers and Innovation in Polymeric Materials*. Polymers, 2021, tom 13, s. 2293, doi:10.3390/POLYM13142293.

- Lohse D. Fundamental Fluid Dynamics Challenges in Inkjet Printing. Annual Review of Fluid Mechanics, 2022, nr 54, s. 349–382, doi:10.1146/annurev-fluid-022321-114001.
- Walczak R.; Kawa B.; Adamski K. Inkjet 3D Printed Microfluidic Device for Growing Seed Root and Stalk Mechanical Characterization. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, nr 297, s. 111557, doi:10.1016/J.SNA.2019.111557.
- 100. Wang X.; Zhang M.; Zhang L.; Xu J.; Xiao X.; Zhang X. Inkjet-Printed Flexible Sensors: From Function Materials, Manufacture Process, and Applications Perspective. Materials Today Communications, 2022, nr 31, s.103263, doi:10.1016/J.MTCOMM.2022.103263.
- 101. Ibrahim M.S.; Mohamed H.A.; Moustafa M.E.; Mohamed T.Y.; Ashraf A. A Comparative Study of Ultraviolet and Electron Beam Irradiation on Acrylate Coatings. Egyptian Journal of Chemistry, 2020, nr 63, s. 1931–1940, doi:10.21608/EJCHEM.2019.15990.1966.
- 102. Cheng Y.L.; Huang K.C. Preparation and Characterization of Color Photocurable Resins for Full-Color Material Jetting Additive Manufacturing. Polymers, 2020, tom 12, s. 650, doi:10.3390/POLYM12030650.
- 103. Shah M.A.; Lee D.G.; Lee B.Y.; Hur S. Classifications and Applications of Inkjet Printing Technology: A Review. IEEE Access, 2021, nr 9, s. 140079–140102, doi:10.1109/ACCESS.2021.3119219.
- 104. Gülcan O.; Günaydın K.; Tamer A. The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review. Polymers, 2021, tom 13, s 2829, doi:10.3390/POLYM13162829.

- 105. Meisel N.A.; Dillard D.A.; Williams C.B. Impact of Material Concentration and Distribution on Composite Parts Manufactured via Multi-Material Jetting. Rapid Prototyping Journal, 2018, nr 24, s. 872– 879, doi:10.1108/RPJ-01-2017-0005.
- 106. Raza I.; Iannucci L.; Curtis P.T. Introducing a Multimaterial Printer for the Deposition of Low Melting Point Alloys, Elastomer, and Ultraviolet Curable Resin. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2017, nr 4, s. 83–89, doi:10.1089/3dp.2016.0053.
- 107. Ibrulj J.; Dzaferovic E.; Obucina M.; Kuzman M.K. Numerical and Experimental Investigations of Polymer Viscoelastic Materials Obtained by 3D Printing. Polymers, 2021, nr 13, s. 3276, doi:10.3390/polym13193276.
- 108. Srinivas K. Stress Relaxation and Creep of Polymers and Composite Materials Advanced Scientific and Engineering Services, 2020, Shukan Mall, Sabarmati-Gandhinagar Highway.
- Hariharan K.; Jain, J. Stress Relaxation Test: Issues in Modelling and Interpretation. Manufacturing Letters, 2020, nr 26, s. 64–68, doi:10.1016/j.mfglet.2020.10.003.
- 110. Wu Y.; Yin C.; Zhang X.; Gu X. Fractional Order Viscoelastic Model for Stress Relaxation of Polyvinyl Chloride Geomembranes. Applied Sciences, 2023, nr 13, doi:10.3390/app13031582.
- Gavin H.P. The Levenberg-Marquardt Algorithm for Nonlinear Least Squares Curve-Fitting Problems. Department of Civil and Environmental Engineering, 2024.

- 112. Zhao R. Complexity Bound of a Levenberg–Marquardt Algorithm Based on Probabilistic Jacobian Models. Optimization Letters, 2024, doi:10.1007/s11590-024-02140-x.
- 113. Ailobhio D.T.; Ikughur J.A. A Review of Some Goodness-of-Fit Tests for Logistic Regression Model. Asian Journal of Probability and Statistics, 2024, nr 26, s. 75–85, doi:10.9734/ajpas/2024/v26i7631.
- Kozior T.; Kundera C. Rheological Properties of Cellular Structures Manufactured by Additive PJM Technology. Tehnicki vjesnik -Technical Gazette, 2021, nr 28, s. 82–87, doi:10.17559/TV-20191007145545.
- 115. Fang C.; Dong H.; Zhang T. Mathematical Models of Overparameterized Neural Networks. Proceedings of the IEEE, 2021, nr 109, s. 683–703, doi:10.1109/JPROC.2020.3048020.
- 116. Bochnia J.; Kozior T.; Szot W.; Rudnik M.; Zmarzły P.; Gogolewski D.; Szczygieł P.; Musiałek M. Selected Mechanical and Rheological Properties of Medical Resin MED610 in PolyJet Matrix Three-Dimensional Printing Technology in Quality Aspects. 3D Printing Additive Manufacturing, 2022, doi:10.1089/3dp.2022.0215.
- Szot W. Rheological Analysis of 3D Printed Elements of Acrylonitrile Butadiene and Styrene Material Using Multiparameter Ideal Body Models. 3D Printing Additive Manufacturing, 2023, doi:10.1089/3dp.2022.0298.
- Szot W.; Bochnia J.; Zmarzły P. *Effect of Selective Laser Sintering on* Stress Relaxation in PA12. Polimery, 2024; tom 69, s. 179–185, doi: 10.14314/polimery.2024.3.5

119. Szot W.; Rudnik M. Effect of the Number of Shells on Selected Mechanical Properties of Parts Manufactured by FDM/FFF Technology. Advances in Materials Science, 2024, nr 24, s. 86–103, doi:10.2478/adms-2024-0006.

Normy:

- N1. PN-EN ISO/ASTM 52900:2022-05: Wytwarzanie przyrostowe --Zasady ogólne -- Podstawy i słownictwo.
- N2. PN/EN ISO/ASTM 52900:2017-06. Wytwarzanie przyrostowe Zasady ogólne Terminologia.
- N3. ISO/ASTM 52911-1:2019. Wytwarzanie przyrostowe Projektowanie
 Część 1: Stapianie proszków metali za pomocą lasera.
- N4. ISO/ASTM 52911-2:2019. Wytwarzanie przyrostowe Projektowanie
 Część 2: Stapianie proszków polimerów za pomocą lasera.
- N5. PN-ISO 45001:2018-06. Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy – Wymagania i wytyczne stosowania.
- N6. PN-EN ISO 527-1:2020-01: Tworzywa sztuczne Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 1: Zasady ogólne.
- N7. PN-EN ISO 527-2:2012: Tworzywa sztuczne Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 2: Warunki badań tworzyw sztucznych przeznaczonych do różnych technik formowania.
- N8. PN-EN ISO 3384-1:2019. Guma i kauczuk termoplastyczny Oznaczanie relaksacji naprężenia przy ściskaniu – Część 1. Badanie w stałej temperaturze.

Patenty:

- P1. Hull Ch. W. (1986). Apparatusa For Production of Three-Dimensional Ocjects By Stereo Thopograpphy (U.S. Patent No. US 4,575,330). U.S.
 Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US4575330A/en, dostęp: 19.01.2025.
- P2. Deckard R. C. (1989). Method and Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering (U.S. Patent No. US 4,863,538). U.S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US4863538A/en, dostęp: 19.01.2025.
- P3. Feygin M. (1988). Apparatus and Method for Forming an Integral Object from Laminations (U.S. Patent No. US 4,752,352). U.S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US4752352A/en, dostep: 19.01.2025.
- P4. Crump S. S.(1992). Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects (U.S. Patent No. 5,121,329). U.S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US5121329A/en, dostęp: 19.01.2025.
- P5. Sachs M. E. (1993). *Three-Dimensional Printing Techniqes* (U.S. Patent No. 5,204,055). U.S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US5204055A/en, dostęp: 19.01.2025.

Źródła internetowe:

- W1. P. Ślusarczyk, Dobra, to napiszę to jeszcze raz: druk 3D NIE JEST nową technologią, centrumdruku3d.pl, 2019, https://centrumdruku3d.pl/dobra-to-napisze-to-jeszcze-raz-druk-3d-nie-jest-nowa-technologia, dostęp: 19.01.2025.
- W2. J. Groopman, *Print thyself*, newyorker.com, 2014, https://www.newyorker.com/magazine/2014/11/24/print-thyself, dostęp: 19.01.2025.
- W3. K. Naoum, A., Lichtig, 3D Printing in Medicine and Healthcare, xometry.com, 2024, https://www.xometry.com/resources/3dprinting/3d-printing-in-medicine-and-healthcare/, dostęp: 19.01.2025.
- W4. The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today, sculpteo.com, https://www.sculpteo.com/en/3d-learninghub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/, dostęp: 19.01.2025.
- W5. The VoxelMatters interactive map of commercially available AM technologies, voxelmatters.com, 2019, https://www.voxelmatters.com/map-of-additive-manufacturingtechnologies/, dostep: 19.01.2025.
- W6. K. Skrzek, J. Tomczyk, Nie tylko druk 3D poznaj różnice pomiędzy drukiem 2.5D, 4D i 5D, przemyslprzyszlosci.gov.pl, 2020, https://przemyslprzyszlosci.gov.pl/nie-tylko-druk-3d-poznaj-roznicepomiedzy-drukiem-2-5d-4d-i-5d/, dostęp: 19.01.2025.
- W7. M. Petch, What is the future of 3D printing? 80 additive manufacturing experts forecast 3D printing trends for 2023, 3dprintingindustry.com, 2023, https://3dprintingindustry.com/news/what-is-the-future-of-3d-

printing-80-additive-manufacturing-experts-forecast-3d-printingtrends-for-2023-220261, dostęp: 19.01.2025.

- W8. R. Kumar, Prevailing Trends in the 3D Printing Industry, globaltrademag.com, 2022, https://www.globaltrademag.com/prevailing-trends-in-the-3dprinting-industry, dostep: 19.01.2025.
- W9. 4 Important Trends Shaping Additive Manufacturing in 2022, amfg.ai,
 2022, https://amfg.ai/2022/10/25/the-top-4-trends-in-additivemanufacturing-2022, dostęp: 19.01.2025.
- W10. 5 Important Trends for Industrial 3D Printing in 2023, eos.info, 2022, https://www.eos.info/en/blog/additive-manufacturing-trends-2023~b~11532, dostęp: 19.01.2025.
- W11. 3D Printing Market to Triple by 2026, Reveals Latest Hubs Report, engineering.com, 2022, https://www.engineering.com/story/3dprinting-market-to-triple-by-2026-reveals-latest-hubs-report, dostęp: 19.01.2025.
- W12. 3D Printing Market Size, Share and Trends Analysis by Component Type, Vertical Type, Region and Segment Forecast to 2026, globaldata.com, 2022, https://www.globaldata.com/store/report/3dprinting-market-analysis, dostęp: 19.01.2025.
- W13. *PolyJet systems and materials*, 3dprinting.co.uk, 2016, https://3dprinting.co.uk/wp-content/uploads/2016/09/PolyJet-Systems-and-Materials-Overview-and-Matrix.pdf, dostep: 19.01.2025.
- W14. *PolyJet Materials*, stratasys.com, https://www.stratasys.com/en/materials/materials-catalog/polyjetmaterials/, dostęp: 19.01.2025.

- W15. *Polyjet*, jiga.io, https://jiga.io/resource-center/materials/polyjet, dostęp: 19.01.2025.
- W16. Theory of Nonlinear Curve Fitting, originlab.com, https://www.originlab.com/doc/origin-help/nlfit-theory, dostęp: 19.01.2025.

Inne źródła:

- O1. EOS, User Guide EOS Formiga P100, 2008.
- O2. MakerBot, User Manual MakerBot Replicator, 2024.
- O3. MakerBot, User Manula MakerBotSketch, 2024.
- O4. Stratasys, User Guide Connex500/350 3D Printer System, 2014.
- O5. ROSA, Karta charakterystyki materiału Rosa Flex 96A.
- O6. Startasys, Karta charakterystyki materiału ABS P430.
- O7. Stratasys, Karta charakterystyki materiału MED610.
- O8. Stratasys, Karta charakterystyki materiału RGD720.
- O9. Fiberology, Karta charakterystyki materiału PLA.
- O10. EOS, Karta charakterystyki materiału PA2200.
- O11. GUM, Ewaluacja Danych Pomiarowych Przewodnik Wyrażania Niepewności Pomiaru; 2010;

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1. Schemat pierwszej drukarki 3D w technologii SLA opracowanej
przez Hulla [P1]19
Rys. 1.2. Schemat pierwszej drukarki 3D w technologii selektywnego
spiekania proszków opracowanej przez Deckarda [P2]21
Rys. 1.3. Schemat pierwszej drukarki 3D w technologii łączenia warstw
laminatu opracowanej przez Feygina i jego zespół [P3]23
Rys. 1.4. Schemat pierwszej drukarki 3D w technologii osadzania topionego
materiału opracowanej przez małżeństwo Crump [P4]24
Rys. 1.5. Schemat pierwszej drukarki 3D w technologii łączenia cząstek
proszku z użyciem lepiszcza [P5]26
Rys. 1.6. Ogólna klasyfikacja procesów przyrostowych i używanych w nich
materiałów28
Rys. 1.7. Podział wykorzystania technologii druku 3D37
Rys. 3.1. Podział odziaływań niebezpiecznych i szkodliwych w druku 3D 50
Rys. 3.2. Przykładowy schemat drukarki 3D w technologii MEX55
Rys. 3.3. Przykładowe materiały polimerowe dla technologii MEX [69,73]
58
Rys. 3.4. Schemat drukarki 3D w technologii SLS60
Rys. 3.5. Schematyczny widok "basenu topienia" w trakcie
napromieniowania laserem61
Rys. 3.6. Przykładowe materiały dla technologii SLS [88]63
Rys. 3.7. Kształty cząstek proszków: a – kulisty, b – "ziemniak", c –
otrzymane metodą kriogeniczną [81]64
Rys. 3.8. Schemat drukarki 3D w technologii PolyJet65

Rys. 3.9. Formowanie kropli z lepkosprężystego płynu w druku 3D [93,99] _____66 Rys. 3.10. Przykładowe materiały stosowane w technologii PolyJet Matrix [W13,W14,W15]_____68 Rys. 4.1. Graficzna interpretacja relaksacji naprężeń: σ – naprężenie, ε – odkształcenie, $\sigma(t)$ – krzywa relaksacji naprężeń, t – czas, $\epsilon 0$ – odkształcenie jednostkowe początkowe [B25] 72 Rys. 4.2. "Krzywa relaksacji" dla ciała idealnie sprężystego: σ – naprężenie, $\sigma 1, \sigma 2$ – naprężenia, t – czas, t1, t2, t3 – czasy [B14, B19] 73 Rys. 4.3. "Krzywa" relaksacji dla ciała idealnie lepkiego: σ – naprężenie, σ 1 - naprężenie, t - czas, t1, t2, t3 - czasy [B21] 74 Rys. 4.4. Relaksacja naprężeń ciała lepkosprężystego σ – naprężenie, $\sigma 1$ – t - czas, t1, t2 - czasy, $\sigma(t) - krzywa$ naprężenie, relaksacji, σtn – wartość naprężenia dla $t \rightarrow \infty$ [B22] 75 Rys. 4.5. Graficzna interpretacja pełzania σ – naprężenie, ε – odkształcenie, $t - czas, \varepsilon(t) - krzywa pełzania, \sigma 0 - naprężenie początkowe [B17]$ 76 Rys. 4.6. Odpowiedź ciała sprężystego na zadane naprężenie: ε – odkształcenie, $\varepsilon 0$ – odkształcenie jednostkowe początkowe, t – czas, **t0**, **t2**, **t3** – czasy [B22] _____77 Rys. 4.7. Odpowiedź ciała lepkiego na zadane naprężenie : $\boldsymbol{\varepsilon}$ – odkształcenie, εt – krzywa pełzania, t – czas, t0, t2, t3 – czasy [B22] 78 Rys. 4.8. Odpowiedź ciała lepkosprężystego na zadane naprężenie : ε – $\epsilon 0$ – odkształcenie jednostkowe początkowe, odkształcenie, $t - \text{czas}, t0, t2, t3 - \text{czasy}, \varepsilon tn - \text{wartość odkształcenia dla } t \rightarrow \infty$ [B21]79

Rys. 4.9. Analogia mechaniczna – model Hooke'a : E – moduł sprężystości,
ϵ – odkształcenie, σ – naprężenie [B21]81
Rys. 4.10. Analogia mechaniczna modelu Newtona: η – współczynnik
lepkości dynamicznej, ε – odkształcenie, σ – naprężenie [B21]82
Rys. 4.11. Analogia mechaniczna modelu standardowego I: E0 , E1 – moduły
sprężystości, $\eta 1$ – współczynnik lepkości dynamicznej, ε – odkształcenie, σ
– naprężenie [B21]84
Rys. 4.12. Analogia mechaniczna ciała standardowego II: E0, E1 - moduły
sprężystości, $\eta 1$ – współczynnik lepkości dynamicznej, ε –
odkształcenie, σ – naprężenie [B21]86
Rys. 4.13. Schemat połączeń występujących w modelach złożonych88
Rys. 4.14. Analogie mechaniczne ogólnych modeli: a) Maxwella, b)
Maxwella-Wiecherta90
Rys. 4.15. Analogia mechaniczna pięcioparametrowego modelu Maxwella-
Wiecherta92
Rys. 4.16. Analogia mechaniczna siedmioparametrowego modelu Maxwella-
Wiecherta95
Rys. 4.17. Analogia mechaniczna ogólnych modeli: a) Kelvina, b) Kelvina-
Voighta98
Rys. 4.18. Analogia mechaniczna pięcioparametrowego modelu Kelvina-
Voighta100
Rys. 4.19. Analogia mechaniczna siedmioparametrowego modelu Kelvina-
Voighta103
Rys. 6.1. Zadania zrealizowane w ramach badań111
Rys. 6.2. Wymiary próbek użytych do badań: a) ISO 527 typ 1BA, b) ISO
3384113

Rys. 6.3. Zapis STL próbek do badań: a) ISO 527 typ 1BA, b) ISO 3384 113
Rys. 6.4. Interpretacja parametrów technologicznych: a) orientacja wydruku,
b) liczba konturów115
Rys. 6.5. Widok drukarek 3D: a) Dimension 1200es, b) Connex 350, c)
MakerBot Replicator 5 th , d) Formiga P100117
Rys. 6.6. Widok stanowiska do pomiarów właściwości mechanicznych
modeli wytwarzanych technologiami przyrostowymi121
Rys. 7.1. Przykładowe wykresy (materiał ABS P430): a) test relaksacji
naprężeń, b) test pełzania129
Rys. 7.2. Procedura doboru modelu reologicznego o odpowiedniej ilości
parametrów do krzywych eksperymentalnych 131
Rys. 7.3. Dopasowanie modeli reologicznych: a) model podstawowy
Maxwella, b) model standardowy II, c) model pięcioparametrowy Maxwella-
Wiecherta, d) model siedmioparametrowy Maxwella-Wiecherta132
Rys. 7.4. Dopasowanie modeli reologicznych: a) model podstawowy
Kelvina, b) model standardowy I, c) model pięcioparametrowy Kelvina-
Voighta, d) model siedmioparametrowy Kelvina-Voighta; R2, Chi2 -
współczynniki dopasowania134
Rys. 7.5. Zbiorcze wykresy testów relaksacji naprężeń w próbkach z
materiału MED 610: a) orientacja wydruku <i>Pd</i>0 , b) orientacja
wydruku <i>P</i>d45 , c) orientacja wydruku <i>P</i>d90 141
Rys. 7.6. Wykresy przykładowych dopasowań modelu Maxwella-Wiecherta
do wybranych krzywych eksperymentalnych dla materiału MED610:
a) próbka o kodzie: TPJM – MMED610 – P$d0$ – 1R , b) próbka o
kodzie: TPJM – MMED610 – Pd45 – 1R , c) próbka o kodzie: TPJM –
MMED610 – Pd90 – 1R 142
Rys. 7.7. Wartości modułów sprężystości dla materiału MED610 – relaksacja
--
naprężeń146
Rys. 7.8. Wartości współczynników lepkości dynamicznej dla materiału
MED610 – relaksacja naprężeń147
Rys. 7.9. Wykres relaksacji naprężeń w materiale MED610 dla orientacji
wydruku Pd0 : $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$,
t1R , t2R – czasy relaksacji148
Rys.7.10. Wykres relaksacji naprężeń w materiale MED610 dla orientacji
wydruku Pd45 : $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$,
t1R , t2R – czasy relaksacji149
Rys. 7.11. Wykres relaksacji naprężeń w materiale MED610 dla orientacji
wydruku Pd90 : $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$,
t1R , t2R – czasy relaksacji149
Rys. 7.12. Zbiorcze wykresy testów pełzania dla materiału MED 610: a)
orientacja wydruku $Pd0$, b) orientacja wydruku $Pd45$, c) orientacja
wydruku Pd90 153
Rys. 7.13. Wykresy przykładowych dopasowań modelu Kelvina-Voighta do
krzywych eksperymentalnych – materiał MED 610: a) próbka o
kodzie: TPJM – MMED610 – $Pd0$ – 1P , b) próbka o kodzie: TPJM –
MMED610 – Pd45 – 1P, c) próbka o kodzie: TPJM – MMED610 –
Pd90 – 1P 154
Rys. 7.14. Wartości modułów sprężystości dla materiału MED610 – pełzanie
Rys. 7.15. Wartości współczynników lepkości dynamicznej dla materiału
MED610 – pełzanie 159

Rys. 7.16. Krzywa pełzania w materiale MED610 dla orientacji wydruku
Pd0 : $\varepsilon t0$ – odkształcenie początkowe, εEZ – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$,
<i>t</i> 1 <i>P</i> , <i>t</i> 2 <i>P</i> – czasy retardacji 160
Rys. 7.17. Krzywa pełzania w materiale MED610 dla orientacji wydruku
Pd45 : $\epsilon t0$ – odkształcenie początkowe, ϵEZ – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$,
t1P , t2P – czasy retardacji160
Rys. 7.18. Krzywa pełzania w materiale MED610 dla orientacji wydruku
Pd90 : $\varepsilon t0$ – odkształcenie początkowe, εEZ – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$,
t1P , t2P – czasy retardacji161
Rys. 7.19. Zbiorcze wykresy testów relaksacji naprężeń dla materiału
RGD720: a) orientacja wydruku Pd0 , b) orientacja wydruku Pd45 , c)
orientacja wydruku Pd90 165
Rys. 7.20. Wykresy przykładowych dopasowań modelu Kelvina-Voighta do
krzywych eksperymentalnych – materiał RGD720: a) próbka o
kodzie: TPJM – MRGD720 – $Pd0$ – 1R, b) próbka o kodzie: TPJM –
MRGD720 – Pd45 – 1R, c) próbka o kodzie: TPJM – MRGD720 –
<i>Pd</i>90 – 1R 166
Rys. 7.21. Wartości modułów sprężystości dla materiału RGD720 -
relaksacja naprężeń170
Rys. 7.22. Wartości współczynników lepkości dynamicznej dla materiału
RGD720 – relaksacja naprężeń171
Rys. 7.23. Wykres relaksacji naprężeń w materiale RGD720 dla orientacji
wydruku Pd0 : $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$,
t1R , t2R – czasy relaksacji 172

Rys. 7.24. Wykres relaksacji naprężeń w materiale RGD720 dla orientacji
wydruku Pd45 : $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$,
t1R , t2R – czasy relaksacji173
Rys. 7.25. Wykres relaksacji naprężeń w materiale RGD720 dla orientacji
wydruku Pd0 : $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$,
t1R , t2R – czasy relaksacji173
Rys. 7.26. Wykresy testów relaksacja naprężeń dla materiału ABS P430 i
wysokości warstwy Lt0254: a) orientacja wydruku Pd0, b) orientacja
wydruku Pd45 , c) orientacja wydruku Pd90 177
Rys. 7.27. Wykresy testów relaksacji naprężeń dla materiału ABS P430 i
wysokości warstwy Lt033: d) orientacja wydruku $Pd0$, e) orientacja
wydruku <i>P</i>d45 , f) orientacja wydruku <i>P</i>d90 178
Rys. 7.28. Wykresy dopasowania modelu Maxwella-Wiecherta do
wybranych krzywych eksperymentalnych dla materiału ABS P430 i
wysokości warstwy Lt0254: a) próbka o kodzie TMEX – MABS –
Lt0254 - Pd0 - 1R, b) próbka o kodzie $TMEX - MABS - Lt0254 -$
Pd45 – 1R, c) próbka o kodzie TMEX – MABS – Lt0254 – Pd90 – 1R
Rys. 7.29. Przykładowe wykresy dopasowania modelu Maxwella-Wiecherta
do wybranych krzywych eksperymentalnych dla materiału ABS P430 i
wysokości warstwy Lt033 : d) próbka o kodzie T $MEX - MABS - Lt033 -$
Pd0 - 1R, e) próbka o kodzie $TMEX - MABS - Lt033 - Pd45 - 1R$, f)
próbka o kodzie T<i>MEX</i> – MABS – <i>Lt</i>033 – P<i>d</i>90 – 1R180
Rys. 7.30. Wartości modułów sprężystości dla materiału ABS P430 przy

wysokościach warstw *Lt*0254 oraz *Lt*033 – relaksacja naprężeń 186

Rys. 7.31. Wartości współczynników lepkości dynamicznej ABS P430 przy wysokościach warstw *Lt*0254 oraz *Lt*033– relaksacja naprężeń 187 Rys. 7.32. Wykres relaksacji napreżeń w materiale ABS P430 dla orientacji wydruku **Pd0** i wysokości warstwy **Lt0254**: $\sigma t0$ – napreżenie poczatkowe, σtn – napreżenie dla $t \rightarrow \infty$, t1R, t2R – czasy relaksacji 188 Rys. 7.33. Wykres relaksacji napreżeń w materiale ABS P430 dla orientacji wydruku Pd45 i wysokości warstwy Lt0254: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – napreżenie dla $t \rightarrow \infty$, t1R, t2R – czasy relaksacji 189 Rys. 7.34. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ABS P430, orientacji wydruku **Pd90** i wysokości warstwy **Lt0254**: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t1R, t2R – czasy relaksacji 189 Rys. 7.35. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ABS P430 dla orientacji wydruku **Pd0** i wysokości warstwy **Lt033**: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \to \infty$, t1R, t2R – czasy relaksacji 190 Rys. 7.36. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ABS P430 dla orientacji wydruku Pd45 i wysokości warstwy Lt033: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t1R, t2R – czasy relaksacji 190 Rys. 7.37. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ABS P430, orientacji wydruku **Pd90** i wysokości warstwy **Lt033**: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t1R, t2R – czasy relaksacji 191 Rys. 7.38. Wykresy testów pełzania dla materiału ABS P430 i wysokości warstwy Lt0254: a) orientacja wydruku Pd0, b) orientacja wydruku Pd45, c) orientacja wydruku *Pd*90 194 Rys. 7.39. Wykresy testów pełzania dla materiału ABS P430 i wysokości warstwy Lt033: d) orientacja wydruku Pd0, e) orientacja wydruku Pd45, f) orientacja wydruku **Pd90**_____195

Rys. 7.40. Wykresy dopasowania modelu Kelvina-Voighta do wybranych krzywych eksperymentalnych dla materiału ABS P430 i wysokości warstwy Lt0254: a) próbka o kodzie TMEX – MABS – Lt0254 - Pd0 - 1P, b) próbka o kodzie TMEX – MABS – Lt0254 – Pd45 – 1P, c) próbka o kodzie **T***MEX* – **MABS** – *Lt***0254** – **Pd90** – **1P** 196 Rys 7.41. Wykresy dopasowania modelu Kelvina-Voighta do wybranych krzywych eksperymentalnych dla materiału ABS P430 i wysokości warstwy Lt033: d) próbka o kodzie TMEX - MABS - Lt033 - Pd0 - 1P, e) próbka o kodzie TMEX – MABS – Lt033 – Pd45 – 1P, f) próbka o kodzie **T***MEX* – **MABS** – *Lt***033** – **P***d***90** – **1P** 197 Rys. 7.42. Wartości modułów sprężystości w materiale ABS P430 dla wysokości warstw *Lt*0254 i *Lt*033 – pełzanie 202 Rys. 7.43. Wartości współczynników lepkości dynamicznej w materiale ABS P430 dla wysokości warstw *Lt*0254 i *Lt*033 – pełzanie 203 Rys. 7.44. Krzywa pełzania w materiale ABS P430 dla wysokości warstwy Lt0254 i orientacji wydruku Pd0: $\varepsilon t0$ – odkształcenie początkowe, εEZ – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t1P, t2P – czasy retardacji 204 Rys. 7.45. Krzywa pełzania w materiale ABS P430; dla wysokości warstwy Lt0254 i orientacji wydruku Pd45: $\varepsilon t0$ – odkształcenie początkowe, εEZ - odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t1P, t2P - czasy retardacji 205 Rys. 7.46. Krzywa pełzania w materiale ABS P430 dla wysokości warstwy Lt0254 i orientacji wydruku Pd90: $\varepsilon t0$ – odkształcenie początkowe, εEZ - odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t1P, t2P - czasy retardacji 205 Rys. 7.47. Krzywa pełzania w materiale ABS P430 dla wysokości warstwy Lt033 i orientacji wydruku Pd0: $\varepsilon t0$ – odkształcenie początkowe, εEZ – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t1P, t2P – czasy retardacji 206

Rys. 7.48. Krzywa pełzania w materiale ABS P430 dla wysokości warstwy Lt033 i orientacji wydruku Pd45: $\varepsilon t0$ – odkształcenie początkowe, εEZ – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t1P, t2P – czasy retardacji 206 Rys. 7.49. Krzywa pełzania w materiale ABS P430 dla wysokości warstwy **Lt033** i orientacji wydruku **Pd90**: $\varepsilon t0$ – odkształcenie poczatkowe, εEZ – odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t1P, t2P – czasy retardacji 207 Rys. 7.50. Wyniki testów relaksacji naprężeń dla materiału ROSA-Flex 96A: a) liczba konturów 2, b) liczba konturów 4, c) liczba konturów 6 211 Rys. 7.51. Przykładowe wykresy dopasowań modelu Maxwella-Wiecherta do krzywych relaksacji naprężeń materiału ROSA-Flex 96A: a) próbka o kodzie TMEX - MFlex96A - Ns2 - 1R, b) próbka o kodzie TMEX -MFlex96A – Ns4 – 1R, c) próbka o kodzie TMEX – MFlex96A – **Ns6 – 1R**_____212 Rys. 7.52. Wartości modułów sprężystości dla materiału ROSA Flex 96A – relaksacja naprężeń 215 Rys. 7.53. Wartości współczynników lepkości dynamicznej dla materiału ROSA Flex 96A – relaksacja naprężeń 216 Rys. 7.54. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ROSA Flex 96A i liczbie konturów Ns2: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t1R, t2R - czasy relaksacji 217Rys. 7.55. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ROSA Flex 96A i liczbie konturów Ns4: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, *t1R, t2R* – czasy relaksacji 218 Rys. 7.56. Wykres relaksacji naprężeń w materiale ROSA Flex 96A i liczbie konturów Ns6: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t1R, t2R – czasy relaksacji 218

Rys. 7.57. Wyniki testów relaksacji naprężeń dla materiału PA2200 i gęstości energii Ed0056: a) orientacja wydruku Pd0, b) orientacja wydruku Pd45, c) orientacja wydruku *Pd*90 222 Rys. 7.58. Wyniki testów relaksacji naprężeń dla materiału PA2200 i gestości energii Ed0076: d) orientacja wydruku Pd0, e) orientacja wydruku Pd45, f) orientacja wydruku **Pd90**_____223 Rys. 7.59. Przykładowe wykresy dopasowań modelu Maxwella-Wiecherta do krzywych relaksacji naprężeń materiału PA2200 dla gęstości energii Ed0056: a) próbka o kodzie (TSLS – MPA2200 – Ed0056 – Pd0 – 1)R, b) próbka o kodzie (TSLS – MPA2200 – Ed0056 – Pd45 – 1)R, c) próbka o kodzie (TSLS – MPA2200 – Ed0056 – Pd90 – 1)R 224 Rys. 7.60. Przykładowe wykresy dopasowań modelu Maxwella-Wiecherta do krzywych relaksacji naprężeń materiału PA2200 dla gęstości energii Ed0076: d) próbka o kodzie (TSLS – MPA2200 – Ed0076 – Pd0 – 1) R, e) próbka o kodzie (TSLS – MPA2200 – Ed0076 – Pd45 – 1) R, f) próbka o kodzie (TSLS – MPA2200 – Ed0076 – Pd90 – 1)R 225 Rys. 7.61. Wartości modułów sprężystości dla materiału PA 2200 i gestości energii *Ed*0056, *Ed*0076 230 Rys. 7.62. Wartości współczynników lepkości dynamicznej dla materiału PA 2200 i gęstości energii *Ed*0056, *Ed*0076_____231 Rys. 7.63. Wykres relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla gęstości energii **Ed0056** i orientacji wydruku **Pd0**: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t1R, t2R – czasy relaksacji 232 Rys. 7.64. Wykres relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla gęstości energii **Ed0056** i orientacji wydruku **Pd45**: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t1R, t2R – czasy relaksacji 233

Rys. 7.65. Wykres relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla gęstości energii **Ed0056** i orientacji wydruku **Pd90**: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t1R, t2R – czasy relaksacji 233 Rys. 7.66. Wykres relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla gęstości energii **Ed0076** i orientacji wydruku **Pd0**: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t1R, t2R – czasy relaksacji 234 Rys. 7.67. Wykres relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla gęstości energii **Ed0076** i orientacji wydruku **Pd45**: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t1R, t2R – czasy relaksacji 234 Rys. 7.68. Wykres relaksacji napreżeń w materiale PA 2200 dla gestości energii **Ed0076** i orientacji wydruku **Pd90**: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t1R, t2R – czasy relaksacji 235 Rys. 7.69. Eksperymentalne krzywe pełzania w materiale PLA: a) liczba konturów 2, b) liczba konturów 10 238 Rys. 7.70. Przykładowe dopasowania modelu Kelvina-Voighta do krzywych pełzania materiału PLA: a) próbka o kodzie (TMEX – MPLA – Ns2 - 1)P, b) próbka o kodzie (TMEX – MPLA – Ns10 - 1)P 239 Rys. 7.71. Wartości modułów sprężystości dla analizowanych liczb konturów – materiał PLA 242 Rys. 7.72. Wartości współczynników lepkości dynamicznej dla analizowanych liczb konturów – materiał PLA 243 Rys. 7.73. Wykres pełzania materiału PLA i dla liczby konturów Ns2: *ɛt*0 - odkształcenie początkowe, εEZ - odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, t1P, t2P czasy retardacji 244

Rys. 7.74. Wykres pełzania materiału PLA i dla liczby konturów Ns10: *Et*0 - odkształcenie początkowe, εEZ - odkształcenie dla $t \rightarrow \infty$, $t1P_1t2P_2$ czasy retardacji 245 Rys. 7.75. Zbiorcze wykresy testów relaksacji naprężeń w próbkach z materiału PA 2200: a) naprężenia ściskające, b) naprężenia rozciągające 248 Rys. 7.76. Dopasowanie pięcioparametrowego modelu Maxwella-Wiecherta do krzywej relaksacji eksperymentalnej w materiale PA2200: a) próbka o kodzie $TSLS - MPA2200 - \sigma C - 1R$, b) próbka o kodzie TSLS - $MPA2200 - \sigma T - 1R_{248}$ Rys. 7.77. Wartości modułów sprężystości dla poszczególnych naprężeń ściskających i rozciągających – PA2200_____251 Wartości współczynników lepkości dynamicznej Rys. 7.78. dla poszczególnych naprężeń ściskających i rozciągających - PA2200 252 Rys. 7.79. Krzywa relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla naprężeń ściskających: $\sigma t0$ – napreżenie poczatkowe, σtn – napreżenie dla $t \rightarrow \infty$, *t1R, t2R* – czasy relaksacji 253 Rys. 7.80. Krzywa relaksacji naprężeń w materiale PA 2200 dla naprężeń rozciągających: $\sigma t0$ – naprężenie początkowe, σtn – naprężenie dla $t \rightarrow \infty$, t1R, t2R - czasy relaksacji 254

SPIS TABEL

Tabela. 1.1. Zestawienie głównych technologii przyrostowych	31
Tabela 6.1. Wartości parametrów technologicznych zmiennych zastosowanyc	ch w
badaniach	114
Tabela 6.2. Parametry składające się na gęstość energii	115
Tabela 6.3. Podział technologii druku 3D zastosowanych w badaniach ze wzg	lędu
na rodzaj: drukarki 3D, materiału i próbki	118
Tabela 6.4. Wybrane właściwości mechaniczne materiałów zastosowanych	1 do
badań [O5-O10]	118
Tabela 7.1 Wartości parametrów równania modelu pięcioparametrow	/ego
i siedmioparametrowego Maxwella-Wiecherta – materiał ABS P430	136
Tabela 7.2. Wartości parametrów równania modelu pięcioparametrow	/ego
i siedmioparametrowego Kelvina-Voighta – materiał ABS P430	137
Tabela 7.3. Parametry technologiczne druku 3D i parametry badań dla mater	riału
MED 610	139
Tabela 7.4. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla przekrojów prostoka	ątny
próbek do testów relaksacji naprężeń – materiał MED610	140
Tabela 7.5. Wartości parametrów równania modelu Maxwella-Wiech	ıerta
i współczynników dopasowania dla materiału MED 610	143
Tabela 7.6. Średnie wartości i odchylenia standardowe parametrów mo	delu
Maxwella-Wiecherta oraz współczynniki dopasowania dla materiału MED6	10 z
uwzględnieniem orientacji wydruku.	145
Tabela 7.7. Wartości relaksacji naprężeń po założonym czasie ekspozycji	dla
materiału MED610	150

Tabela 7.8. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla przekrojów prostokątny
próbek do testów pełzania – MED 610152
Tabela 7.9. Wartości parametrów równania modelu Kelvina-Voighta
i współczynników dopasowania – materiał MED610155
Tabela 7.10. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla parametrów modelu
Kelvina-Voighta oraz współczynniki dopasowania – materiał MED610157
Tabela 7.11. Wartości pełzania po założonym czasie ekspozycji dla materiału
MED610161
Tabela 7.12. Parametry technologiczne druku 3D i parametry badań dla materiału
RGD720163
Tabela 7.13. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla przekrojów okrągłych
próbek do testów relaksacji – materiał RGD720164
Tabela 7.14. Wartości parametrów równania modelu Maxwella-Wiecherta
i współczynników dopasowania dla materiału RGD720167
Tabela 7.15. Wartości średnie i odchylenia standardowe parametrów modelu
Maxwella-Wiecherta oraz współczynniki dopasowania z uwzględnieniem
badanych orientacji wydruku – materiał RGD720169
Tabela 7.16. Wartości relaksacji naprężeń po założonym czasie ekspozycji dla
materiału RGD720174
Tabela 7.17. Parametry technologiczne druku 3D i parametry badań dla materiału
ABS P430175
Tabela 7.18. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla przekrojów
kwadratowych próbek do testów relaksacji naprężeń – materiał ABS P430. 176
Tabela 7.19. Wartości parametrów równania modelu Maxwella-Wiecherta i
współczynników dopasowania dla materiału ABS P430; Lt0254181

Tabela 7.20. Wartości parametrów równania modelu Maxwella-Wiecherta i współczynników dopasowania dla materiału ABS P430; Lt033 183 Tabela 7.21. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla parametrów modelu Maxwella-Wiecherta oraz współczynniki dopasowania – ABS P430 185 Tabela 7.22. Wyniki badań procentowy spadek naprężenia dla materiału ABS P430_____191 Tabela 7.23. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla przekrojów prostokątny próbek do testów pełzania – materiał ABS P430 193 Tabela 7.24. Wartości parametrów równania modelu Kelvina-Voighta i współczynników dopasowania dla materiału ABS P430; Lt0254 198 Tabela 7.25. Wartości parametrów równania modelu Kelvina-Voighta i współczynników dopasowania dla materiału ABS P430; Lt033 199 Tabela 7.26. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla parametrów modelu Kelvina-Voighta oraz współczynniki dopasowania – materiał ABS P430 201 Tabela 7.27. Wyniki badań procentowy wzrost odkształcenia dla materiału ABS P430. 207 Tabela 7.28. Parametry technologiczne druku 3D i parametry badań dla materiału ROSA-Flex 96A 209 Tabela 7.29. Wartości pól przekrojów próbek dla materiału ROSA-Flex 96A 210 Tabela 7.30. Wartości parametrów równania modelu Maxwella-Wiecherta i współczynników dopasowania dla materiału ROSA-Flex 96A 213 Tabela 7.31. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla parametrów modelu Maxwella-Wiecherta oraz współczynniki dopasowania - materiał ROSA-Flex 96A_____214 Tabela 7.32. Wyniki badań procentowy spadek naprężenia dla materiału ROSA-Flex 96A _____219

Tabela 7.33. Parametry technologiczne stałe druku 3D i parametry badań dla
materiału PA2200220
Tabela 7.34. Wartości średnie pól przekrojów próbek dla materiału PA2200. 221
Tabela 7.35. Parametry otrzymanych krzywych relaksacji naprężeń w materiale
PA 2200; Ed0056 226
Tabela 7.36. Parametry otrzymanych krzywych relaksacji naprężeń w materiale
PA 2200; Ed0076 227
Tabela 7.37. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla parametrów modelu
Maxwella-Wiecherta oraz współczynniki dopasowania uwzględniając wszystkie
analizowane parametry druku 3D - materiał PA 2200229
Tabela 7.38. Wyniki badań procentowy spadek naprężenia dla materiału
PA 2200235
Tabela 7.39. Parametry technologiczne druku 3D i parametry badań dla materiału
PA2200237
Tabela 7.40. Wartości parametrów równania modelu Kelvina-Voighta
i współczynników dopasowania dla materiału PLA239
Tabela 7.41. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla parametrów modelu
Kelvina-Voighta oraz współczynniki dopasowania uwzględniając wszystkie
analizowane parametry druku 3D – materiał PLA241
Tabela 7.42. Procentowy wzrost odkształcenia dla materiału PLA245
Tabela 7.43. Parametry technologiczne druku 3D i parametry badań dla materiału
PA2200247
Tabela 7.44. Wartości parametrów równania modelu Maxwella-Wiecherta
i współczynników dopasowania dla materiału PA 2200
– rozciąganie/ściskanie249

Tabela 7.45. Wartości średnie i odchylenia standardowe dla parametrów modelu								
Maxwella-Wiecherta o	raz współ	czynniki	dopasowania	_	uwzględniając			
naprężenia ściskające i rozciągające250								
Tabela 7.46. Wyniki badań procentowy spadek naprężenia dla materiału PA2200								
– porównanie naprężeń								

Streszczenie Rozprawy Doktorskiej

mgr inż. Wiktora Szota

pt. "Ocena właściwości reologicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D z zastosowaniem wieloparametrowych modeli ciał idealnych"

przygotowana pod kierunkiem dr hab. inż. Jerzego Bochni, prof. PŚk (promotor) oraz dr hab. inż. Pawła Zmarzłego prof. PŚk, (promotor pomocniczy)

Głównym celem pracy było określenie właściwości reologicznych elementów wytwarzanych za pomocą technologii przyrostowych SLS i FDM (MEX) z zastosowaniem modeli ciał idealnych.

Aby zrealizować główny cel pracy należało sformułować cele pomocnicze. Należą do nich:

- Opracowanie modelu wieloparametrowego (n>5) do oceny właściwości reologicznych.
- Ocena zastosowania modeli ciał idealnych do opisania właściwości reologicznych.
- Określenie niepewności aproksymacji w doborze modelu reologicznego do krzywej relaksacji i pełzania materiału.
- Określenie parametrów technologicznych wpływających na właściwości reologiczne elementów wykonywanych technologiami przyrostowymi SLS i FDM (MEX).

Przedstawiony powyżej główny cel pracy pozwalał na sformułowanie następującej hipotezy badawczej: Zjawiska relaksacji naprężeń i pełzania występujące w materiałach wytwarzanych technologiami przyrostowymi przy założonych parametrach technologicznych, zwłaszcza technologią FDM (MEX) i SLS, opisać można przy pomocy wieloparametrowych modeli reologicznych, których moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej wyznaczyć można z dokładnością umożliwiającą ich stosowanie w obliczeniach inżynierskich.

Rozprawa doktorska składa się z ośmiu rozdziałów.

Rozdział I przedstawia rys historyczny oraz rodzaje technologii przyrostowych. W tej części pracy opisano również role badań właściwości mechanicznych modeli wytwarzanych przyrostowo.

Rozdział II to omówienie prognoz rozwoju przemysłu druku 3D oraz rozeznanie w literaturze na temat badań właściwości reologicznych.

W rozdziale III opisano wykorzystane w pracy technologie przyrostowe oraz zasady bezpieczeństwa pracy z nimi.

W rozdziale IV przedstawiono zagadnienia związane z reologią ciała stałego. W tym rozdziale omówiono wybrane modele reologiczne oraz dwa zjawiska relaksacji naprężeń i pełzania.

Rozdział V przedstawia cele pracy, hipotezę badawcze i sposób realizacji rozprawy doktorskiej.

Rozdział VI zawiera program badań własnych z uwzględnieniem parametrów technologicznych druku 3D.

W rozdziale VII przedstawiono wyniki badań właściwości reologicznych. W rozdziale tym obliczono moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej dla materiałów wytworzonych drukiem 3D. Ostatni rozdział VIII jest podsumowaniem końcowym pracy wraz z wnioskami ogólnymi. Ponadto w rozdziale tym przedstawione zostały kierunki dalszych badań własnych.

Summary of Doctoral Dissertation

Wiktor Szot, M.Sc.

entitled. "Assessment of the rheological properties of components manufactured with 3D printing technology using multiparameter models of ideal bodies".

prepared under the supervision of

Jerzy Bochnia, D.Sc., Professor of Kielce University of Technology (supervisor)

and Paweł Zmarzły, D.Sc., Professor of Kielce University of Technology (assistant supervisor)

The main goal of the thesis was to determine the rheological properties of components manufactured using SLS and FDM (MEX) additive technologies with the application of ideal body models.

In order to realise the main objective of the thesis, auxiliary objectives had to be formulated. These include:

- Development of a multiparameter model (n>5) for the assessment of rheological properties.
- Assess the use of ideal body models to describe rheological properties.
- Determination of approximation uncertainty in rheological model selection

for material relaxation and creep curve.

 Determination of technological parameters influencing rheological properties of parts made with SLS and FDM (MEX) additive technologies. The main goal of the study presented above allowed the formulation of the following research hypothesis: The phenomena of stress relaxation and creep occurring in materials manufactured with additive technologies at the assumed technological parameters, especially with FDM (MEX) and SLS technologies, can be described with the use of multiparameter rheological models, whose elastic modulus and dynamic viscosity coefficients can be determined with an accuracy enabling their use in engineering calculations.

The dissertation consists of eight chapters.

Chapter I provides a historical overview and types of additive technologies. This part of the thesis also describes the roles of testing the mechanical properties of additively manufactured models.

Chapter II is a discussion of predictions for the development of the 3D printing industry and a survey of the literature on the study of rheological properties.

Chapter III describes the additive technologies used in the thesis and the safety principles of working with them.

Chapter IV presents issues related to solid rheology. This chapter discusses selected rheological models and the two phenomena of stress relaxation and creep.

Chapter V presents the aims of the thesis, the research hypothesis and how the dissertation was carried out.

Chapter VI contains a programme of internal research, taking into account the technological parameters of 3D printing.

Chapter VII presents the results of the study of rheological properties. In this chapter, elastic moduli and dynamic viscosity coefficients were calculated for materials produced by 3D printing. The last chapter VIII is the final summary of the work with general conclusions.

In addition, the chapter presents directions for further internal research.