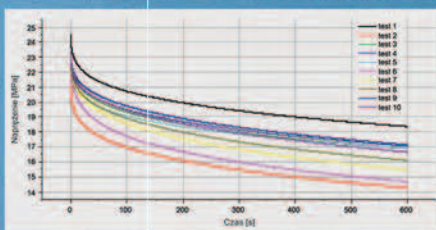
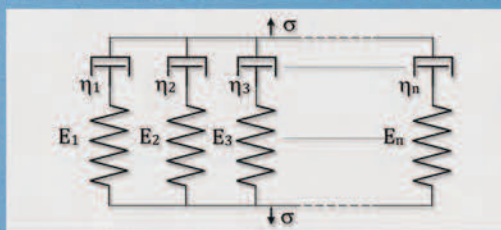
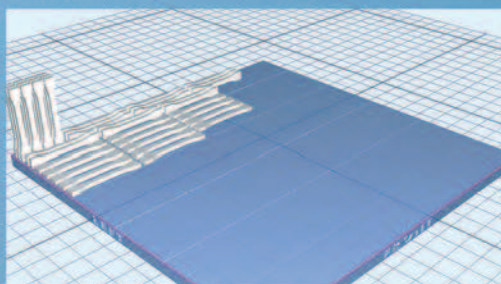


MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY

M105

Jerzy Bochnia

**WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE
MATERIAŁÓW KSZTAŁTOWANYCH
TECHNOLOGIAMI PRZYROSTOWYMI**



Politechnika Świętokrzyska

Kielce 2018

MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY

M105

Jerzy Bochnia

**WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE
MATERIAŁÓW KSZTAŁTOWANYCH
TECHNOLOGIAMI PRZYROSTOWYMI**

Kielce 2018

MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY NR M105

Redaktor Naukowy serii

NAUKI TECHNICZNE – BUDOWA I EKSPLOATACJA MASZYN

prof. dr hab. inż. Tomasz Lech STAŃCZYK

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Józef KUCZMASZEWSKI

dr hab. inż. Krzysztof KARBOWSKI, prof. PK

Redakcja

Aneta STARZYK

Projekt okładki

Tadeusz UBERMAN

Badania opisane w monografii przeprowadzono przy użyciu aparatury:

- zakupionej w ramach projektu pt. „LABIN – Wsparcie dla innowacyjnych badań na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach”. Program Operacyjny Rozwój Polski Wschodniej w latach 2007-2013. Priorytet 1 – Innowacyjna Gospodarka, Działanie 1.3 – wsparcie dla projektów badawczo-rozwojowych,
- zakupionej w ramach projektu pt. „Rozwój bazy badawczej specjalistycznych laboratoriów uczelni publicznych regionu świętokrzyskiego” Priorytet 2: Infrastruktura sfery B+R, Działanie 2.2 Wsparcie tworzenia wspólnej infrastruktury badawczej jednostek naukowych Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, Projekt nr POIG 02.02.00-26-023/08-00.

© Copyright by Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2018

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część tej pracy nie może być powielana czy rozpowszechniana w jakiegokolwiek formie, w jakikolwiek sposób: elektroniczny bądź mechaniczny, włącznie z fotokopiowaniem, nagrywaniem na taśmy lub przy użyciu innych systemów, bez pisemnej zgody wydawcy.

PL ISSN 1897-2691

PL ISBN 978-83-65719-36-2

Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej
25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
tel./fax 41 34 24 581
e-mail: wydawca@tu.kielce.pl
www.wydawnictwo.tu.kielce.pl

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA	5
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	6
1. WPROWADZENIE	9
2. TECHNOLOGIE PRZYROSTOWE	11
2.1. Charakterystyka procesu technologicznego drukowania 3D	11
2.2. PolyJet Matrix – fotoutwardzanie akrylowych żywic polimerowych ...	13
2.3. SLS – selektywne spiekanie laserowe	19
2.4. 3D Printing – spajanie proszków ceramicznych	22
2.5. FDM – osadzanie topionego materiału	24
3. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE MATERIAŁÓW KSZTAŁTOWANYCH PRZYROSTOWO	27
3.1. Szacowanie niepewności pomiarów w badaniach właściwości mechanicznych materiałów	27
3.2. Właściwości mechaniczne materiałów kształtowanych przyrostowo ...	33
3.2.1. Rozciąganie próbek wykonanych technologią PolyJet	33
3.2.2. Rozciąganie próbek wykonanych technologią SLS	51
3.2.3. Rozciąganie próbek wykonanych technologią FDM	56
3.2.4. Ściskanie próbek wykonanych technologią 3D Printing	62
4. OCENA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNYCH WYBRANYCH MATERIAŁÓW KSZTAŁTOWANYCH PRZYROSTOWO	68
4.1. Podstawowe równania modeli reologicznych	68
4.2. Procedury konstruowania równań stanu złożonych modeli ciał idealnych	98
4.3. Regularne wieloparametrowe modele ciał idealnych	106
4.4. Badanie relaksacji naprężeń w wybranych materiałach kształtowanych przyrostowo	112
4.4.1. Próbkki do badań	113
4.4.2. Wykonanie prób relaksacji naprężeń	115
4.4.3. Dobór modelu ciała idealnego do opisu krzywej relaksacji	117

4.4.4. Relaksacja naprężeń w materiałach kształtowanych technologią PolyJet	120
4.4.5. Relaksacja naprężeń w materiałach otrzymywanych technologią SLS	134
4.5. Pełzanie materiałów otrzymywanych technologią SLS	142
5. PODSUMOWANIE	148
LITERATURA	151
STRESZCZENIE	157
SUMMARY	159

LITERATURA

- [1] Oczóś K.E., *Rosnące znaczenie Rapid Manufacturing w przyrostowym kształtowaniu wyrobów*, „Mechanik” 2008, nr 4, s. 241–257.
- [2] Campbell I., Bourell D., Gibson I., *Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age*, “Rapid Prototyping Journal” 2012, Vol. 18, No. 4, s. 255–258.
- [3] Dhakshyani R., Nukman Y., Azuan A.O.N., *FDM models and FEA in dysplastic hip*, “Rapid Prototyping Journal” 2012, Vol. 18, No. 3, s. 215–221.
- [4] Kroll E., Artzi D., *Enhancing aerospace engineering students’ learning with 3D printing wind-tunnel models*, “Rapid Prototyping Journal” 2011, Vol. 17, No. 5, s. 393–402.
- [5] Omar Balderrama-Armendariz C., MacDonald E., Espalin D., Cortes-Saenz D., Wicker R., Maldonado-Macias A., *Torsion analysis of the anisotropic behavior of FDM technology*, “International Journal of Advanced Manufacturing Technology” 2018, Vol. 96, No. 1–4, s. 307–317.
- [6] Calise G.J., Seigel A., *Anisotropy and failure in octahedral lattice structure parts fabricated using the fdm technology* [w:] *Proceedings of the asme international mechanical engineering congress and exposition, 2017*, Vol. 14, 2018.
- [7] Bochnia J., Blasiak S., *Anisotropy of mechanical properties of a material which is shaped incrementally using polyjet technology* [w:] *Engineering Mechanics 2016. 22nd International Conference. May 9–12, 2016, Svratka, Czech Republic*, Vol. 22, 2016, s. 74–77.
- [8] Gay P., Blanco D., Pelayo F., Noriega A., Fernandez P., *Analysis of Factors Influencing the Mechanical Properties of Flat PolyJet Manufactured Parts* [w:] *Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2015*, Vol. 132, 2015, s. 70–77.
- [9] Yamaguchi K., Thomas A.G., Busfield J.J.C., *Stress relaxation, creep and set recovery of elastomers*, “International Journal of Non-Linear Mechanics” 2015, Vol. 68, Special Issue: SI, s. 66–70.
- [10] Babaei B., Davarian A., Pryse K.M., Elson E.L., Genin G.M., *Efficient and optimized identification of generalized Maxwell viscoelastic relaxation spectra*, “Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials” 2016, Vol. 55, s. 32–41.
- [11] Renaud F., Dion J.-L., Chevallier G., Tawfiq I., Lemaire R., *A new identification method of viscoelastic behavior: Application to the generalized Maxwell model*, “Mechanical Systems and Signal Processing” 2011, Vol. 25, No. 3, s. 991–1010.
- [12] Zhu Y., Zheng Y., Shen Y., Chen X., Zhang X., Lin H., Guo Y., Wang T., Chen S., *Analyzing and modeling rheological behavior of liver fibrosis in rats using shear viscoelastic moduli*, “Journal of Zhejiang University-Science B” 2014, Vol. 15, No. 4, s. 375–381.
- [13] Chen T., *Determining a Prony Series for a Viscoelastic Material From Time Varying Strain Data*, National Aeronautics and Space Administration, 23681-2199, 2000.

- [14] Jozwiak B., Orczykowska M., Dziubinski M., *Fractional Generalizations of Maxwell and Kelvin-Voigt Models for Biopolymer Characterization*, “PLOS One” 2015, Vol. 10, No. 11.
- [15] Oman S., Nagode M., *Observation of the relation between uniaxial creep and stress relaxation of filled rubber*, “Materials & Design” 2014, Vol. 60, s. 451–457.
- [16] Bihari B.K., Rao N.P.N., Gupta M., Murthy K.P.S., *A Study on Creep Behavior of Composite Solid Propellants Using the Kelvin-Voigt Model*, “Central European Journal of Energetic Materials” 2017, Vol. 14, No. 3, s. 742–756.
- [17] Formiga P100, “User Manual” EOS, Munich 2008.
- [18] Z Corporation, “ZEdit Software Manual, Version 3.2 Part Number 09541, Rev E,” 2008.
- [19] Z Corporation, “ZPrint Software Manual, Version 7.10, Part Number 09598 Rev B,” 2009.
- [20] Connex 500/350, “3-D Printer System Objet, User Guide, Objet Geometries,” 2009.
- [21] Puebla K., Arcaute K., Quintana R., Wicker R.B., *Effects of environmental conditions, aging, and build orientations on the mechanical properties of ASTM type I specimens manufactured via stereolithography*, “Rapid Prototyping Journal” 2012, Vol. 18, No. 5, s. 374–388.
- [22] Adamczak S., Bochnia J., Kaczmarska B., *An analysis of tensile test results to assess the innovation risk for an additive manufacturing technology*, “Metrology and Measurement Systems” 2015, Vol. 22, No. 1, s. 127–138.
- [23] Napadensky E., *Compositions and methods for use in three dimensional model printing*, Patent US 7183335, 2007.
- [24] Napadensky E., *Compositions and methods for use in three dimensional model printing*, US 6569373, 2003.
- [25] Bochnia J., Kozior T., *Methods of prototyping process using modern additive technologies*, “Solid State Phenomena” 2015, Vol. 223.
- [26] Wojtysiak J., *Badania właściwości mechanicznych elementów otrzymanych w wybranej technologii przyrostowej*, praca magisterska, promotor dr inż. Jerzy Bochnia, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2012.
- [27] Kundera C., Kozior T., *Research of the Elastic Properties of Bellows Made in SLS Technology* [w:] *Terotechnology*, Vol. 874, 2014, s. 77–81.
- [28] Bochnia T., Kozior J., *Trzpień tokarski nastawny*, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Polska, Patent PL 222445 B1, zgłoszenie A1 404740 z 2013-07-17, 2015.
- [29] Davidson T., *Apparatus and methods for handling materials in 3D printer*, Z Corporation, US 2011/0233808 A1, 2011.
- [30] Fienup W.H., Berlin W.J., Hernandez A.A., Kinsley A.T., Zengerle J.P., *Apparatus and methods for servicing 3D printers*, Z Corporation, US 2011/0032301 A1, 2011.
- [31] Malara D., *Projekt procesu technologicznego wybranego zespołu elementów z zastosowaniem technologii przyrostowej 3D-Printing*, praca magisterska, promotor dr inż. Jerzy Bochnia, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2012.
- [32] Dudek P., *FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements*, “Archives of Metallurgy and Materials” 2013, Vol. 58, No. 4, s. 1415–1418.

- [33] Jezierski J., Kowalik M., Siemiątkowski Z., Warowny R., *Analiza tolerancji w konstrukcji i technologii maszyn*, WNT, Warszawa 2010.
- [34] Turzeniecka D., *Ocena niepewności wyniku pomiarów*, WPP, 1998.
- [35] Taylor C., Kuyatt B., *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899-0001, NIST Technical Note 1297, Washington, DC, 1994.
- [36] Adamczak S., Makiela W., *Podstawy metrologii i inżynierii jakości dla mechaników*, WNT, 2010.
- [37] ASTM Standard D638, *Standard test method for tensile properties of plastic*, 2010.
- [38] Inspekt mini, Universal testing machine Inspekt mini 3kN, Hegewald & Peschke MPT GmbH, 2011.
- [39] LabMaster, software, version 2.5.3.21. 2011.
- [40] ISO Standard 527-1, *Plastics – determination of tensile properties – Part 1: General principles*, 2012.
- [41] Bass L., Meisel N.A., Williams C.B., *Exploring variability of orientation and aging effects in material properties of multi-material jetting parts*, “Rapid Prototyping Journal” 2016, Vol. 22, No. 5, s. 826–834.
- [42] Chockalingam K., Jawahar N., Chandrasekhar U., *Influence of layer thickness on mechanical properties in stereolithography*, “Rapid Prototyping Journal” 2006, Vol. 12, No. 2, s. 106–113.
- [43] Kotlinski J., *Mechanical properties of commercial rapid prototyping materials*, “Rapid Prototyping Journal” 2014, Vol. 20, No. 6, s. 499–510.
- [44] Bassoli E., Gatto A., Iuliano L., *Joining mechanisms and mechanical properties of PA composites obtained by selective laser sintering*, “Rapid Prototyping Journal” 2012, Vol. 18, No. 2, s. 100–108.
- [45] Berti G., D’Angelo L., Gatto A., Iuliano L., *Mechanical characterisation of PA-Al₂O₃ composites obtained by selective laser sintering*, “Rapid Prototyping Journal” 2010, Vol. 16, No. 2, s. 124–129.
- [46] Caulfield B., McHugh P.E., Lohfeld S., *Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process*, “Journal of Materials Processing Technology” 2007, Vol. 182, No. 1–3, s. 477–488.
- [47] Dadbakhsh S., Verbelen L., Vandeputte T., Strobbe D., Van Puyvelde P., Kruth J.-P., *Effect of powder size and shape on the SLS processability and mechanical properties of a TPU elastomer [w:] Laser Assisted Net Shape Engineering 9 International Conference on Photonic Technologies Proceedings of the LANE 2016*, Vol. 83, 2016, s. 971–980.
- [48] Schmid M., Wegener K., *Additive Manufacturing: Polymers applicable for Laser Sintering (LS) [w:] International Conference on Manufacturing Engineering and Materials, ICMEM 2016*, Vol. 149, 2016, s. 457–464.
- [49] Eosoly S., Vrana N.E., Lohfeld S., Hindie M., Looney L., *Interaction of cell culture with composition effects on the mechanical properties of polycaprolactone-hydroxyapatite scaffolds fabricated via selective laser sintering (SLS)*, “Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications” 2012, Vol. 32, No. 8, s. 2250–2257.

- [50] Boparai K.S., Singh R., Singh H., *Development of rapid tooling using fused deposition modeling: a review*, "Rapid Prototyping Journal" 2016, Vol. 22, No. 2, s. 281–299.
- [51] Kozior T., Kundera C., *Evaluation of the influence of parameters of FDM technology on the selected mechanical properties of models* [w:] *12th International Scientific Conference of Young Scientists on Sustainable, Modern and Safe Transport*, Vol. 192, 2017, s. 463–468.
- [52] Bochnia J., *Mechanical properties of materials obtained by 3D-printing technology* [w:] *Engineering Mechanics 2017*, 2017, s. 174–177.
- [53] Z Corporation, "ZPrinter 650 Hardware Manual, Part Number 09577, Rev. A," 2008.
- [54] Pożarycki A., Górnaś P., *Numeryczny model właściwości lepkosprężystych warstw nawierzchni jezdni z betonu asfaltowego*, „Budownictwo i Architektura”, 2014, Vol. 13, nr 4, s. 203–213.
- [55] Stankiewicz A., *Identyfikacja matematycznych modeli lepkosprężystych materiałów biologicznych metodą Prony’ego*, „Acta Scientiarum Polonorum Technica Agraria” 2005, Vol. 4, No. 1, s. 41–59.
- [56] Mottahedi M., Dadalau A., Hafla A., Verl A., *Numerical Analysis of Relaxation Test Based on Prony Series Material Model* [w:] *Integrated Systems, Design and Technology 2010: Knowledge Transfer in New Technologies*, Fathi M. (Ed.), Holland A., Ansari F., Weber C. (Co-Eds.), Berlin 2011, s. 79–91.
- [57] Osiecki J., *Podstawy analizy drgań mechanicznych*, Kielce 1979.
- [58] Chrzanowski P., Latus M., *Reologia ciał stałych*, Kraków 2001.
- [59] Brinson H.F., Brinson L.C., *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity*, New York: Springer Science+Business Media, 2015.
- [60] Skrzypek J., *Plastyczność i pełzanie*, PWN, Warszawa 1986.
- [61] Wehrner J., *Software Tools and Guide for Viscoelastic Creep Experiments*, University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Mathematics, 2010.
- [62] Oliveira H.L., Edson D.L., *No Title A BEM formulation applied in the mechanical material modelling of viscoelastic cracked structures*, "International Journal of Advanced Structural Engineering" 2017, No. 9, s. 1–12.
- [63] Balocco S., Basset O., Courbebaisse G., Boni E., Frangi A.F., Tortoli P., Cachard C., *Estimation of the viscoelastic properties of vessel walls using a computational model and Doppler ultrasound*, "Physics in Medicine and Biology" 2010, Vol. 55, No. 12, s. 3557–3575.
- [64] Frigaard I.A., Paso K.G., de Souza Mendes P.R., *Bingham’s model in the oil and gas industry*, "Rheologica Acta" 2017, Vol. 56, No. 3, s. 259–282.
- [65] Majidi B., Taghavi S.M., Fafard M., Ziegler D.P., Alamdari H., *Discrete Element Method Modeling of the Rheological Properties of Coke/Pitch Mixtures*, "Materials" 2016, Vol. 9, No. 5.
- [66] De Sousa T.L., Kanke F., Pereira J.T., Bavastrri C.A., *Property identification of viscoelastic solid materials in nomograms using optimization techniques*, "Journal of Theoretical and Applied Mechanics" 2017, Vol. 55, No. 4, s. 1285–1297.

- [67] Zhang H., Zhang Q.Z., Ruan L., Duan J., Wan M., Insana M.F., *Modeling ramp-hold indentation measurements based on Kelvin-Voigt fractional derivative model*, “Measurement Science and Technology” 2018, Vol. 29, No. 3.
- [68] Fernandes V.A., De Focatiis D.S.A., *The role of deformation history on stress relaxation and stress memory of filled rubber*, “Polymer Testing” 2014, Vol. 40, s. 124–132.
- [69] Wang J., Li Y., Dai F., *A micromechanical relaxation model of composite bolted connections based on viscoelastic theory*, “Composite Structures” 2016, Vol. 146, s. 14–25.
- [70] Adamczak S., Bochnia J., *Estimating the approximation uncertainty for digital materials subjected to stress relaxation tests*, “Metrology and Measurement Systems” 2016, Vol. 23, No. 4, SI, s. 545–553.
- [71] Chivers R.A., Bonner M.J., Hine P.J., Ward I.M., *Shape memory and stress relaxation behaviour of oriented mono-dispersed polystyrene*, “Polymer” 2014, Vol. 55, No. 4, s. 1055–1060.
- [72] Wang L., Han Y., *Compressive relaxation of the stress and resistance for carbon nanotube filled silicone rubber composite*, “Composites Part A: Applied Science and Manufacturing” 2013, Vol. 47, No. 1, s. 63–71.
- [73] Stan F., Fetecau C., *Study of stress relaxation in polytetrafluoroethylene composites by cylindrical macroindentation*, “Composites Part B-Engineering” 2013, Vol. 47, s. 298–307.
- [74] Luo R., Lv H., Liu H., *Development of Prony series models based on continuous relaxation spectrums for relaxation moduli determined using creep tests* No Title, “Construction and Building Materials” 2018, No. 168, s. 758–770.
- [75] Adamczak S., Bochnia J., Kaczmarska B., *Estimating the uncertainty of tensile strength measurement for a photocured material produced by additive manufacturing*, “Metrology and Measurement Systems” 2014, Vol. 21, No. 3, s. 553–560.
- [76] Del Nobile M.A., Chillo S., Mentana A., Baiano A., *Use of the generalized Maxwell model for describing the stress relaxation behavior of solid-like foods*, “Journal of Food Engineering” 2007, Vol. 78, No. 3, s. 978–983.
- [77] Jalocho D., Constantinescu A., Neviere R., *Revisiting the identification of generalized Maxwell models from experimental results*, “International Journal of Solids and Structures” 2015, Vol. 67–68, s. 169–181.
- [78] Bochnia J., *Relaxation of materials obtained using polyjet technology* [w:] *Engineering Mechanics 2017*, 2017, s. 178–181.
- [79] Hernandez-Jimenez A., Hernandez-Santiago J., Macias-Garcia A., Sanchez-Gonzalez J., *Relaxation modulus in PMMA and PTFE fitting by fractional Maxwell model*, “Polymer Testing” 2002, Vol. 21, No. 3, s. 325–331.
- [80] Xiao R., Sun H., Chen W., *An equivalence between generalized Maxwell model and fractional Zener model*, “Mechanics of Materials” 2016, Vol. 100, s. 148–153.
- [81] Gibson I., Rosen D., Stucker B., “Additive Manufacturing Technologies”, NY: Springer, New York 2015.

- [82] Verbelen L., Dadbakhsh S., den Eynde M., Strobbe D., Kruth J.-P., Goderis B., Van Puyvelde P., *Analysis of the material properties involved in laser sintering of thermoplastic polyurethane*, “Additive Manufacturing” 2017, Vol. 15, No. Complete, s. 12–19.
- [83] Vasquez G.M., Majewski C.E., Haworth B., Hopkinson N., *A targeted material selection process for polymers in laser sintering*, “Additive Manufacturing” 2014, Vol. 1–4, No. Complete, s. 127–138.
- [84] Baley C., *Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase*, “Composites – Part A: Applied Science and Manufacturing” 2002, Vol. 33, No. 7, s. 939–948.
- [85] Guedes R.M., *Creep and fatigue lifetime prediction of polymer matrix composites based on simple cumulative damage laws*, “Composites Part A: Applied Science and Manufacturing” 2008, Vol. 39, No. 11, s. 1716–1725.
- [86] Somashekar A.A., Bickerton S., Bhattacharyya D., *Modelling the viscoelastic stress relaxation of glass fibre reinforcements under constant compaction strain during composites manufacturing*, “Composites Part A: Applied Science and Manufacturing” 2012, Vol. 43, No. 7, s. 1044–1052.
- [87] Faes M., Wang Y., Lava P., Moens D., *Variability, heterogeneity, and anisotropy in the quasi-static response of laser sintered PA12 components*, “Strain” 2017, Vol. 53, No. 2, s. n/a-n/a.
- [88] Adamczak S., Bochnia J., Kundera C., *Stress and strain measurements in static tensile tests*, “Metrology and Measurement Systems” 2012, Vol. 19, No. 3, s. 531–540.
- [89] Bochnia J., *Ideal Material Models for Engineering Calculations*, “Procedia Engineering” 2012, Vol. 39, No. 0, s. 98–110.
- [90] Lei D., Liang Y., Xiao R., *A fractional model with parallel fractional Maxwell elements for amorphous thermoplastics*, “Physica A-Statistical Mechanics and its Applications” 2018, Vol. 490, s. 465–475.
- [91] Bochnia J., Blasiak S., *Fractional relaxation model of materials obtained with Selective Laser Sintering technology*, “Rapid Prototyping Journal”, 2018, <<https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2017-0236>>.

STRESZCZENIE

Wybrane właściwości fizyczne materiałów kształtowanych technologiami przyrostowymi

Niniejsza monografia dotyczy badań wybranych właściwości mechanicznych i reologicznych materiałów kształtowanych technologiami przyrostowymi. Podczas procesu przyrostowego (drukowanie 3D) tworzony jest model o określonych wymiarach oraz kształtowany jest materiał tego modelu z półfabrykatów w postaci np. proszków i cieczy. Osobliwe cechy ukształtowanego materiału charakteryzują się np. anizotropią właściwości ze względu na kierunek wydruku, co udokumentowano w tej pracy, prezentując przykładowe wyniki badań własnych, ale również odnosząc je do światowych publikacji w tej dziedzinie.

Praca składa się zasadniczo z trzech podstawowych części. W pierwszej części (rozdział 2) przedstawiono krótką charakterystykę czterech technologii przyrostowych, które stosowane są w Laboratorium Niekonwencjonalnych Technologii Wytwarzania i Laboratorium Inżynierii Odwrotnej w Katedrze Technologii Mechanicznej i Metrologii Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Wiele informacji dotyczących tych technologii jest już dostępnych w literaturze, dlatego podano tylko te podstawowe związane z zastosowanymi urządzeniami.

W drugiej części (rozdział 3) opisano statyczne próby rozciągania i próbę ściskania próbek wykonanych przyrostowo, prezentując wszystkie wykresy rozciągania i ściskania wraz z szacowaniem niepewności pomiarów wytrzymałości na rozciąganie, która jest podstawowym parametrem charakteryzującym właściwość mechaniczną materiałów.

Część trzecia (rozdział 4) obejmuje wyniki badań właściwości reologicznych próbek kształtowanych przyrostowo technologiami PolyJet Matrix i SLS. Główny nacisk położono na opis otrzymanych eksperymentalnie krzywych relaksacji i pełzania za pomocą modeli ciał idealnych oraz oszacowanie wartości parametrów tych modeli, takich jak moduły sprężystości i współczynniki lepkości dynamicznej, z określoną dokładnością. Uzyskano bardzo dobre wyniki dopasowania krzywych teoretycznych do krzywych eksperymentalnych.

Autor wyraża nadzieję, że prezentowana praca poszerzając wiedzę o materiałach kształtowanych przyrostowo, zachęci niektórych czytelników również do podjęcia studiów i badań w tej dziedzinie.

SUMMARY

Selected physical properties of materials obtained with additive technologies

The work presents study of selected mechanical and rheological properties of materials obtained with additive technologies. During the additive process (3D printing) a model with specific dimensions is shaped and the material of this model is created from input substances like powders or liquids. The specific features of the shaped material are characterized, for example, by the anisotropy of properties resulting from different directions of the printing. That has been documented in this work, with presentation of examples of own research results and with reference to other leading publications in this field.

The work consists essentially of three basic parts. The first part (chapter 2) presents a short characteristic of four additive technologies that are used in the Laboratory of Unconventional Manufacturing Technologies and Reverse Engineering Laboratory at the Department of Mechanical Technology and Metrology of the Faculty of Mechatronics and Machine Design at University of Technology in Kielce. A lot of information about these technologies is already available in the literature, consequently only the necessary information related to the devices used has been provided in this work.

The second part (chapter 3) describes static tensile tests and compression test of samples produced additively presenting all stress and compression charts together with the estimation of uncertainty of tensile strength measurements, which is the basic parameter characterizing the mechanical property of materials.

The third part (chapter 4) includes the results of research on rheological properties of samples produced additively with PolyJet Matrix and SLS technology. The main focus is on the description of the relaxation and creep curves obtained experimentally using ideal body models, and the estimation of the values of parameters of these models, such as modulus of elasticity and coefficients of dynamic viscosity, with a certain accuracy. Very good results of matching the theoretical curves to the experimental curves has been obtained.

The author hopes that the presented work will expand knowledge about additively produced materials and will encourage the readers to undertake further studies and research in this field.