

義肢装具材料としての熱溶解積層法 3D プリント造形物の力学的特性

Mechanical Properties of Components Fabricated with Fused Deposition Modeling 3D Printers as Compared with Prosthetic and Orthotic Materials

中村 隆¹⁾ 庄司 瞳^{2,3)} 高嶋 淳³⁾
相川 孝訓³⁾ 硯川 潤³⁾

抄録：3D プリントは少量多品種の生産技術が必要な義肢装具分野において、大きな期待が寄せられている。義肢装具材料における FDM 方式 3D プリント造形物の位置づけを把握することを目的とし、FDM 方式 3D プリント造形物の基本的な力学的特性を、日常使用されている義肢装具用プラスチックと比較した。3D プリント造形物の引張強度と曲げ強度は、義肢装具材料のプラスチックと大きな差はなく、義肢装具材料と比較して決して弱い材料ではなかった。しかし、3D プリント造形物が脆性材料であるのに対し、義肢装具材料は延性材料であることが大きな違いであり、この点は、義肢装具の安全面を考慮すると十分に注意すべき点と考えられた。

Key words: 引張強度、曲げ強度、ラピッドプロトタイプング

1. はじめに

近年 3D プリントと呼ばれるラピッドプロトタイプング装置が急速に発展し、従来ない新しい製造手法として注目されている。中でも熱溶解積層法 (Fused Deposition Modeling: 以下 FDM) による 3D プリント (以下 FDM 方式 3D プリント) は低価格化が進み、普及し始めている¹⁾。特に少量多品種の生産技術が必要な義肢装具分野においては、今後の飛躍的な普及と活用が期待されており、すでに 3D プリントにより造形されたデザイン性の高い義足カバー²⁾ や安価な電動義手³⁾ が市販されている。また 3D プリントによる小児用義手プロジェクト⁴⁾

では、その 3D データがオープンソースとして Web 上で公開され、発展途上国を含め世界中で 3D プリントによる義手製作が試みられている。

一方、FDM 方式 3D プリント造形物は、フィラメント状の樹脂を高温で溶解してプラットフォーム平面上に部品の断面を描き、それを垂直方向に積層して造形するため、積層方向とそれに直交する方向では機械的強度が異なることが知られている⁵⁾。3D プリント造形物を義肢装具として活用するためには、安全に安心して使用できる強度を保証する必要がある。しかし、義肢装具分野において、材料の持つどのような物性が、義肢装具に必要な特性としてどのように利用されているかについての議論はこれまであまりなく、新たな材料や製造手法が登場しても、義肢装具に適した材料や方法であるかどうかを判断する十分な根拠と考察が乏しい。

本研究は義肢装具材料における FDM 方式 3D プリント造形物の位置づけを把握することを目的とする。具体的には、汎用 FDM 方式 3D プリント造形物と義肢装具材料プラスチックの基本的な力学的特性 (引張強度、曲げ強度) の比較、および 3D プリントにより造形された義手部品の強度試験を行った。そして、それらの結果を基に 3D プリント造形物の力学特性を義肢装具材料の視点から考察したので報告する。

- 1) 国立障害者リハビリテーションセンター研究所 義肢装具技術研究部
Department of Prosthetics and Orthotics, Research Institute, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities
Takashi NAKAMURA (PO)
- 2) 千葉工業大学 工学部
Chiba Institute of Technology, Faculty of Engineering
Hitomi SHOJI
- 3) 国立障害者リハビリテーションセンター研究所 福祉機器開発部
Department of Assistive Technology, Research Institute, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities
Hitomi SHOJI, Atsushi TAKASHIMA, Takanori AIKAWA, Jun SUZURIKAWA

(受理日 2018年4月23日)

2. 対象

本研究における3DプリンタはABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) 樹脂を材料としたFDM方式3Dプリンタを用い、da Vinci AiO 1.0 (XYZ Inc. 製。ノズル径：0.4 mm、フィラメント径：1.75 mm、スライサーソフトはXYZ ware (ver2.1.5.9) を使用。以下、D機) および、uPrint Plus (Stratasys 社製。ノズル径：0.4 mm、フィラメント径：1.75 mm、スライサーソフトはCatalyst EX (ver4.1) を使用。以下、U機) の2機種を使用した。前者は、積層時にプラットフォームのみが約80℃に保たれるのに対し、後者では密閉された造形空間の雰囲気温度が約80℃に保たれるため、積層条件が異なる。

日常使用する義肢装具材料としては、積層材に樹脂注型を行って製作したプラスチック (以下、ラミネーションプラスチック) および成形シートの熱可塑性プラスチックを選んだ (表1)。

また、3Dプリンタにより造形された義手部品の強度試験対象として、e-NABLEのグループによるCyborg Beast⁶⁾ を選び、手背部と示指の基節部品の接合部の強度試験を試みた。

3. 方法

3-1. 試験片の製作

3Dプリンタの材料はそれぞれ専用のABSフィラメントを使用し、積層方向を変えて各試験で規格化された試験片を製作した。造形された試験片はそれぞれの試験規格内に造形されたことを確認した後、試験に用いた。

日常使用する義肢装具材料のうち、ラミネーションプラスチックは次のように製作した。14.0 × 14.0 × 22.0 cmの木製直方体を陽性モデルとし、常法によりPVAバッグをかぶせた後、積層材をかぶせ、さらに外側のPVAバッグをかぶせて60%減圧に吸引した。これにアクリル樹脂 (Orthocryl Lamination Resin 80:20、617H19、

表1 義肢装具用プラスチックの種類

積層材 (略称)	積層枚数	種類
ナイロンストッキネット (Ny6)	6	ラミネーション プラスチック
ナイロンストッキネット (Ny8)	8	
ナイロンストッキネット (Ny10)	10	
テトロンフェルト (F3)	3	
ガラス繊維 (GFRP) ^{a)}	6	
炭素繊維ブレイド (CFRP) ^{b)}	4	
ポリプロピレン (PP)	—	熱可塑性 プラスチック
軟質ポリエチレン (PE)	—	

a) Ottobock 社製 616G18 を使用。b) 今仙技術研究所製 CB-8 を使用。

Ottobock) を室温 (20℃) にて浸透させ、樹脂注型を行った。なお、樹脂は注型前に減圧下で10分間脱気し、硬化発熱時は空冷した。樹脂を積層材に浸透させた後、直方体モデルの幅より6 mm または8 mm 大きい枠型をはめ、厚さが3 mm または4 mm の平面となるように面の厚さを設定し、ラミネーションプラスチック板を得た。

得られたラミネーションプラスチック板および成形品の熱可塑性プラスチック板から各試験で規格化された試験片を切り出した。

3-2. 引張強度試験

試験片はJIS K 7162 (型成形、押出成形および注型プラスチックの試験) による試験片1A形とし、厚さは3 mm とした。

3Dプリンタ造形物の試験片は図1に示す積層方向の異なる3種類 (XY-1、ZY-1 および XZ-1) をD機で造形した。造形パラメータは、密度：90%、ピッチ：0.2、シェル数は自動設定である。

ラミネーションプラスチックの試験片は、引っ張り方向が積層材であるストッキネットの長手方向になるようにした。

試験は万能材料試験機 (INSTRON MODEL55R1125) を用い、試験速度は10 mm/min として、1種類の材料につき5試行を行い、その平均値を求め比較した。

3-3. 曲げ強度試験

曲げ強度試験はJIS K7171 (プラスチック-曲げ特性の求め方) に従い、試験片の大きさは80 × 10 × 4 mm (推奨試験片サイズ) とした。

3Dプリンタ造形物の試験片は図1に示す3種類 (XY-2、ZY-2 および XZ-2) をD機とU機でそれぞれ造形した。造形パラメータは、D機が密度：90%、ピッチ：0.2、シェル数は自動設定、U機が密度：ソリッド、ピッチ：0.254、シェル数は自動設定である。

義肢装具材料のプラスチックとしてはナイロンストッキネット10層 (Ny10) のラミネーションプラスチックおよびポリプロピレン (PP) を選んだ。ラミネーションプラスチックの試験片の方向は試験片の長辺が積層材であるストッキネットの長手方向になるようにした。

試験は万能材料試験機 (INSTRON MODEL55R1125) を用い、試験速度は5 mm/min、最大たわみ量25 mm として、1種類の材料につき各5試行を行い、その平均値を求め比較した。

3-4. 3Dプリンタ造形による義手部品の強度試験

e-NABLE が公開している義手Cyborg Beastの手背部および示指の基節部の部品データを原寸から126% (8~13歳の小児ハンドに相当するサイズ⁷⁾) に拡大し、

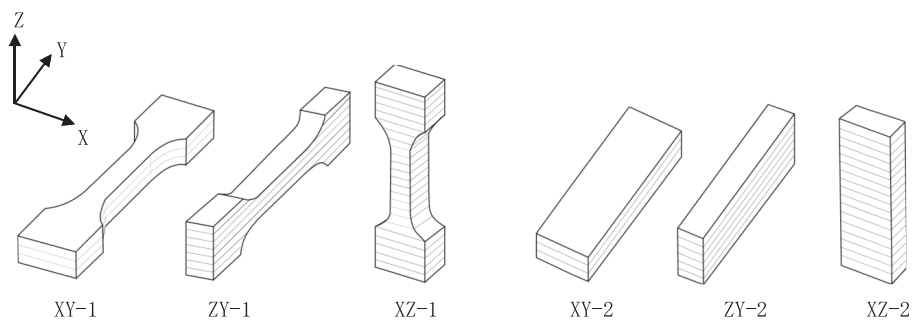


図1 3D プリント造型の試験片 (Z方向が積層方向)

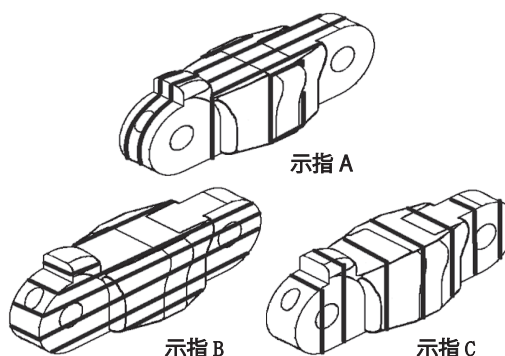


図2 3D プリント造型義手部品の強度試験 (左) と示指の基節部品 (右) (太線が積層面方向を示す。)

U機を使用して造型した。造型パラメータは、密度：ソリッド、ピッチ：0.254、シェル数は自動設定である。

強度試験は万能試験機 (TENSIRON RTC-1325A) を使用し、JIS T9218 (能動ハンド) に規定された成人用能動ハンドの示指の横方向強度に対する試験を参考にした。図2 (左) に示すように、義手の手背部品と示指の基節部品を結合し、MP 関節に相当する継手軸の逆端に、継手軸方向に下向き荷重をかけた。

試験に用いた示指の基節部品は、図2 (右) に示す積層方向の異なる3種類のものをそれぞれ製作した。積層方向は示指 A が前節の曲げ試験片 XY-2、示指 B が ZY-2、そして示指 C が XZ-2 に対応する。試験は1種類の部品につき各3試行を行い、その平均値を求め比較した。

4. 結果

4-1. 引張強度試験

各材料の引張強度と最大ひずみを表2に示す。

3D プリント造形物の引張強度は、義肢装具材料のうちナイロンストッキネットを積層材としたラミネーションプラスチックや成型シートの熱可塑性プラスチックの強度に近い値を示した。積層面に平行な方向の力に対しては PP とほぼ等しく、ナイロンストッキネットのラミネーションプラスチックよりも高い引張強度であった。

積層面に垂直方向の力に対しては、強度は低下したものの、PE よりは高かった。

一方、破壊に至る挙動は大きく異なった。図3に3D プリント造形物、Ny10、PP および PE の応力 - ひずみ曲線を示す。3D プリント造形物は塑性変形をほとんどすることなく降伏点に達すると破断する脆性破壊を生じたのに対し、義肢装具材料のプラスチック (Ny10、PP および PE) は伸びが大きく、降伏点に達してから大きな塑性変形の後、破断に至った。

なお、義肢装具材料でもナイロンストッキネットのラミネーションプラスチックや成型シートの熱可塑性プラスチックと、フェルトおよび繊維強化プラスチックとは破壊に至る挙動が異なり、後者は、引張強度は高いが最大ひずみは小さい脆性破壊を示した。

4-2. 曲げ強度試験

各試験における最大曲げ荷重と最大たわみを表3に示す。

3D プリント造形物は、積層面が曲げ方向の力に対して垂直な場合、義肢装具材料とほぼ同等の曲げ強度を示し、力の方向が積層面と平行な場合には低下した。また、強度の異方性は3D プリントによって異なり、試験片 XY の強度は D 機では XZ の強度に近く、U 機では ZY の強度に近かった。

曲げ強度試験においても破壊に至る挙動は義肢装具材料とは大きく異なった。図4にU機の3Dプリンタ造形物とNy10およびPPの曲げ荷重とたわみの関係を示す。3Dプリンタ造形物は積層方向によりたわみ量が異なるものの、たわみ量が15 mm以下で破断した。これに対し、PPやナイロンストッキネットのラミネーションプラスチックは試験条件下で破断することはなかった。

4.3. 3Dプリンタ造形による義手部品の強度試験

表4および図5に結果を示す。荷重方向に対して平行に積層されている部品Cは他の2方向の部品に対して強度は低く、試験片の結果を反映した。しかし、荷重方向に対して垂直に積層されている2つの部品A、Bの強度は、試験片における曲げ強度の序列と異なり、さらに3種類の部品の強度の差は義手部品のほうが試験片の結果に比べて顕著に大きかった。

表2 各種プラスチックの引張強度と最大ひずみ

試験片	引張強度 (MPa)	最大ひずみ
Ny6	22.22 ± 1.00	0.204 ± 0.045
Ny8	23.73 ± 0.18	0.253 ± 0.007
Ny10	25.60 ± 1.59	0.257 ± 0.026
F3	39.09 ± 2.83	0.027 ± 0.001
GFRP	187.78 ± 11.9	0.028 ± 0.002
CFRP	387.14 ± 21.8	0.017 ± 0.002
PP	33.56 ± 0.32	0.836 ± 0.273
PE	13.06 ± 0.12	4.010 ± 0.004
XY-1	34.42 ± 1.55	0.041 ± 0.006
ZY-1	34.28 ± 1.10	0.033 ± 0.003
XZ-1	19.70 ± 2.22	0.019 ± 0.002

平均値 ± 標準偏差

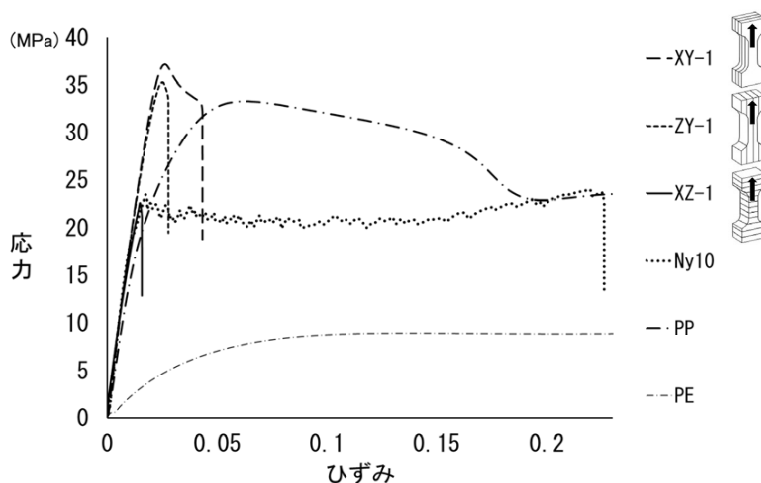


図3 各種プラスチックの応力-ひずみ曲線 (凡例の矢印は試験片の引っ張り方向を示す。)

5. 考察

これまで、3Dプリンタ造形物のみもしくは義肢装具材料のみの強度試験についてはいくつか報告^{5,8-10)}されており、それらの値と比較して今回の同一試験による結果は妥当な値と考えられる。各試験における3Dプリンタ造形物の引張強度と曲げ強度の値は、義肢装具材料として使用するプラスチック (GFRPとCFRPを除く) と大きな差はなかった。これらの結果を見る限り、3Dプリンタによる造形物は、義肢装具材料と比較して決して弱い材料ではないと判断される。しかし、3Dプリンタによる造形物が降伏後すぐに破断する脆性材料であるのに対し、日常使用されている義肢装具材料は降伏後から破断に至るまでのひずみやたわみが大きい延性材料であることを今回の結果は示した。

この点は義肢装具の安全面を考慮すると十分に注意すべき点と推測される。すなわち、義肢装具使用時に強度以上の外力が作用した場合、延性材料からなる義肢装具であれば、破壊より先に義肢装具が変形し、機能低下がおこる。その結果、破壊に至る前に使用を中止する。一方、脆性材料からなる義肢装具の場合、変形後すぐ破断に至るため、使用中に義肢装具が破壊される恐れがあり、それに伴う危険が容易に想像できる。

義肢装具にはシューホーン短下肢装具のように材料のたわみを利用したものも多くあり、同じ強度でも堅くて脆い材料はそのような義肢装具には不向きと考えられる。たわみを利用した義肢装具に本研究で使用したABS材料とFDM方式3Dプリンタを用いた製作法を適用するには十分な検討が必要と考えられる。

また、曲げ強度の異方性が3Dプリンタの機種により異なったことは、積層条件以外にもシェルの壁の厚さや充填構造の差にあると推測され¹⁰⁾、より充填密度の

高いU機の方が異方性の差が少ないためと考えられた。3Dプリンタ造形物の強度は密度やピッチの他に、シェルのスパー構造や樹脂の走査方向が影響することが知られ¹¹⁻¹³⁾、強度設計には詳細な造型パラメータの設定が重要であると考えられる。今回用いた3Dプリンタでは、密度とピッチ以外のパラメータはスライサーソフトにより自動設定されたため、強度設計には限界があった。

さらに、3Dプリンタにより造形された義手部品の強度試験においては、試験片における積層方向間の曲げ強度の差が一割程度であったことと比較して、積層方向の異方性は顕著に差が大きかった。形状が同一であれば、応力集中は同様となるはずであるが、この結果は積層方向の違いにより応力が集中しやすい微小構造が異なることに由来すると考えられる。また、積層方向と荷重方向

が直行する部品Aと部品Bとでも2割程度の強度差があった。部品Cによる軌跡とは降伏後の変位が異なることから、素材強度に近い強度が発揮されたのち、積層方向に依存した積層の剥離による破壊が進んだことが推測できる。これらの結果から、より実使用に近い状況における強度試験の場合、単純構造の試験片による機械的強度よりも積層方向による強度差が顕著に現れることが明らかとなった。

以上のことから、義肢装具の製作に本研究で使用したABSを材料とするFDM方式3Dプリンタを利用しようとする場合、義足カバーのような静的なものは許容範囲と考えられるが、荷重のかかるものを製作するには積層方向を考慮した強度設計が必要であり、造形後の補強方法¹⁰⁾や完成品の強度の確認方法も検討すべき今後の課題であると考えられた。

表3 各種プラスチックの最大曲げ荷重と最大たわみ

造型法	試験片	荷重 (N)	最大たわみ (mm)
ラミネーション	Ny10	81.74 ± 4.18	-
成型品	PP	92.45 ± 1.05	-
D機	XY-2	90.16 ± 2.97	7.82 ± 0.48
D機	ZY-2	118.62 ± 1.48	12.39 ± 2.15
D機	XZ-2	89.39 ± 3.46	5.72 ± 0.19
U機	XY-2	89.00 ± 2.93	6.89 ± 0.44
U機	ZY-2	97.82 ± 0.53	14.99 ± 1.47
U機	XZ-2	63.32 ± 2.37	4.67 ± 0.29

平均値 ± 標準偏差

6. おわりに

3Dプリンタは従来法では製作困難な複雑な構造物を容易にしかも安価に製作可能とする革新的技術として注目を集めている。しかし、汎用のFDM方式3Dプリンタが普及するにつれ、その限界も見え始めている。少量多品種の生産が必要な分野として義肢装具分野は格好の標的となっているが、強度の問題が懸念されている。本研究はFDM方式3Dプリンタ造形物の力学的特性の何が問題であるかを既存の義肢装具材料と比較することに

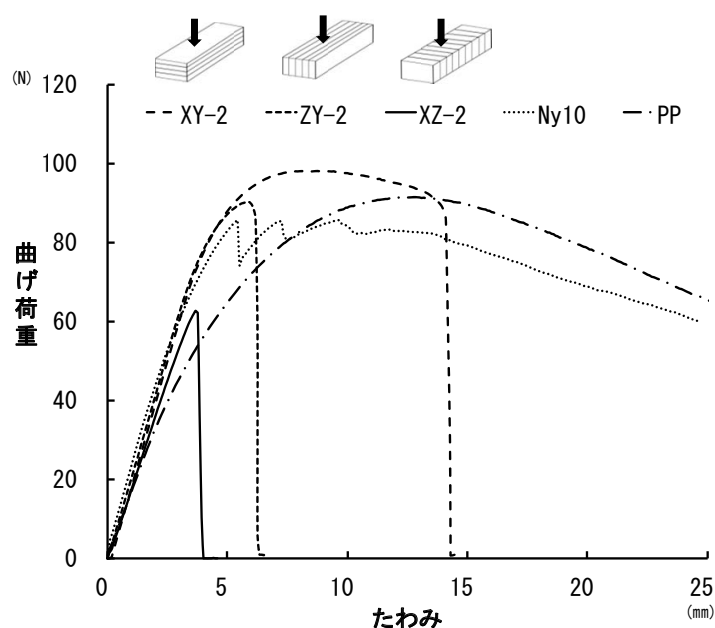


図4 各種プラスチックの曲げ荷重とたわみ
(凡例の矢印は試験片への荷重方向を示す。)

表4 3Dプリンタ造形による義手部品の強度試験

部品	最大荷重 (N)	変位 (mm)
A	106.51 ± 3.91	13.01 ± 0.30
B	88.30 ± 1.28	11.83 ± 0.27
C	33.61 ± 2.07	6.14 ± 0.32

平均値 ± 標準偏差

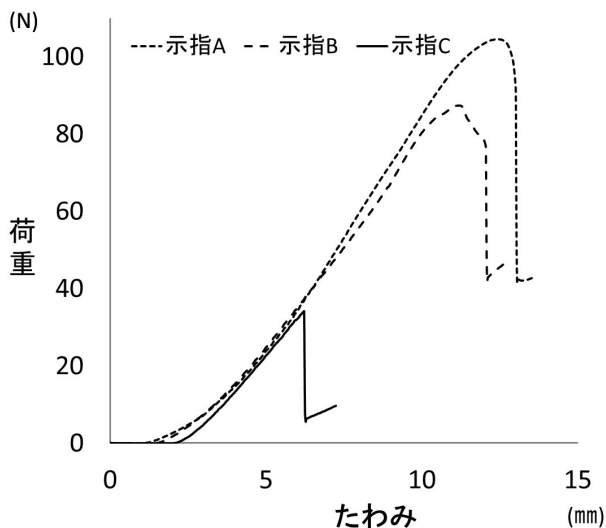


図5 3Dプリンタ造形義手部品の強度試験における荷重とたわみ

より明らかにした。

最近では金属を含めたより高強度の材料が使用できるようになってきており、また、FDM方式以外の造形法の3Dプリンタも低価格が進むと思われる。一方、義肢装具は多くの材料の特性を組み合わせることでその機能を実現するものであり、義肢装具全ての部品を3Dプリンタで製作する必要もない。3Dプリンタの有する大きなポテンシャルを否定すべきでなく、義肢装具のどの領域に3Dプリンタが適応となるか、今後の展開を期待したい。

本研究はJSPS 科研費 26560319の助成を受けたものである。

本研究において利益相反の関係にある企業等はない。

文 献

- 1) 渡辺崇史：3Dプリンターの基礎知識，義装会誌，32(3)，148-153，2016.
- 2) UNYQ web site <http://unyq.com/lookbook/> (閲覧日 2017年11月20日)
- 3) 吉川雅弘：3Dプリンタで製造する3指電動義手，義装会誌，32(3)，154-159，2016.
- 4) e-NABLE. <http://enablingthefuture.org/> (閲覧日 2017年11月20日)
- 5) B. M. Tymrak, et al.: Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, *Materials & Design*, 58, 242-246, 2014.
- 6) e-NABLE. Cyborg Beast: <http://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/cyborg-beast/> (閲覧日 2017年11月20日)
- 7) J. Zuniga, et al.: Carson and cristina fernandez. cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences, *BMC Research Notes*, 8-10, 2015.
- 8) S. L. Phillips and W. Craelius: Material properties of selected prosthetic laminates, *JPO*, 17(1), 27-32, 2005.
- 9) M. J. Gerschutz: Tensile strength and impact resistance properties of materials used in prosthetic check sockets, copolymer sockets, and definitive laminated sockets, *JRRD*, 48(8), 987-1004, 2011.
- 10) J. T. Belter and A. M. Dollar: Strengthening of 3d printed fused deposition manufactured parts using the fill compositing technique, *PLoS ONE*, 10(4), p. e0122915, 2015.
- 11) W. Wu, et al.: Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS, *Materials*, 8, 5834-5846, 2015.
- 12) G. Ćwikłał, et al.: The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 227, 012033, 2017.
- 13) A. Alafaghania, et al.: Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach, *Procedia Manufacturing*, 10, 791-803, 2017.