

ROZWIĄZANIE KONSTRUKCYJNE MASZYNY WYTRZYMAŁOŚCIOWEJ DO ODRYWANIA PRÓBEK OD STOŁU DRUKARKI 3D

Dominika Płaczek¹, Paweł Maćkowiak², Przemysław Świątkowski¹

1. WSTĘP

Drukarki 3D są popularnym narzędziem służącym do wytwarzania elementów na podstawie ich cyfrowych modeli, między innymi dzięki zastosowaniu technologii FDM (ang. Fused Deposition Modeling). Wykorzystywana metoda polega na nakładaniu na siebie kolejnych warstw uprzednio uplastycznionego tworzywa. Wprowadzony do głowicy materiał (tworzywo polimerowe) w postaci drutu (filamentu) podgrzewa się do temperatury topnienia. Uplastycznione tworzywo wytłaczane jest poprzez dyszę głowicy na stół drukarki 3D, po czym następuje jego wystygnięcie i powrót do stanu stałego w kształcie zgodnym z zadanym modelem przestrzennym [Kotyk i in. 2015].

Ogólna dostępność, prostota działania, niski koszt eksploatacji drukarek 3D, jak również szerokie możliwości budowy prototypów i docelowych części urządzeń wpływają na nieprzerwany wzrost liczby użytkowników technologii FDM [Chee Kai Chua i in. 2017]. Możliwość przedstawienia zaprojektowanego modelu przestrzennego w rzeczywistych rozmiarach pozwala na dokładną weryfikację elementu. Każda kolejna sekwencja tworzenia docelowego detalu lub urządzenia eliminuje błędy poprzedniej operacji. Podobnie jak model przestrzenny pozwala na dostrzeżenie niedoskonałości wizji projektanta, tak również fizyczny prototyp uwidacznia błędy modelu cyfrowego. Dodatkowy atut stanowi możliwość rzeczywistego porównania różnych wersji wytworzonych produktów. Modyfikacje wprowadzone na etapie prototypowania istotnie wpływają na obniżenie kosztów wynikających z niedostrzeżonych wcześniej nieprawidłowości oraz na poprawność finalnego projektu [Kabat i in. 2016, Maćkowiak i in. 2016].

Szereg wymienionych zalet i oczekiwań wpływa na konieczność nieustannego udoskonalania stosowanej metody prototypowania. Rozwój oraz perspektywy wykorzystywanej technologii związane są z dążeniem do uzyskania wysokiej dokładności wyrobów oraz skróceniem czasu wytwarzania [Chee Kai Chua i in. 2017].

Coraz powszechniejsze wykorzystanie technologii FDM wiąże się z kilkoma problemami technologicznymi. Do najczęściej spotykanych należą:

- siła adhezji pomiędzy wytłaczanym tworzywem a stołem drukarki 3D,
- deformacja elementu podczas wytwarzania segmentów przewieszonych, niemających warstw podłożowych,
- niedostateczna dokładność urządzeń niskobudżetowych,
- konieczność stosowania obróbki wykańczającej w celu podwyższenia jakości powierzchni wytworzonego elementu,

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Koło Naukowe Pojazdów Szynowych, ul. Kaliskiego 7, 85-796, e-mail: domiplaczek@gmail.com, e-mail: przemekswiatkowski94@gmail.com

² Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn, ul. Kaliskiego 7, 85-796, e-mail: pawel.mackowiak@utp.edu.pl

- w przypadku wytwarzania małogabarytowych elementów konieczne jest doprowadzenie powietrza chłodzącego w celu uniknięcia deformacji wywołanych naniesieniem zbyt dużej ilości warstw w zbyt krótkim czasie.

Zasadniczy problem technologiczny stanowi zjawisko odrywania wytworzonych elementów od stołu urządzenia. Przyczyną jest skurcz przetwórczy tworzywa. Podczas przyrostowego kształtowania wyrobu istotna jest odpowiednia siła adhezji pomiędzy detalem a stołem urządzenia, która uniemożliwia ich wzajemne względem siebie przesunięcie. Pozwala to na przyjęcie tej samej bazy dla kolejnych nakładanych warstw tworzywa. Po zakończeniu procesu możliwe musi być łatwe odklejenie gotowego elementu od stołu. Zabieg ten zapewnia równomierne nakładanie warstw tworzywa termoplastycznego oraz uzyskanie wyrobu o wyższej jakości i zbieżności wymiarowej z modelem komputerowym. Istnieje kilka metod zwiększenia adhezji pomiędzy wytwarzanym elementem a stołem drukarki 3D. Istotną rolę odgrywa sam materiał, z jakiego wykonany jest stół roboczy, jego temperatura oraz dokładne odtłuszczenie. Ponadto nanosi się na niego dodatkowe substancje (np. kleje, mieszaniny acetonu i tworzywa) zwiększające przyczepność. Do popularnych metod należy także stosowanie specjalnych taśm przyklejanych do stołu.

2. CEL BADAŃ

Cele badań to:

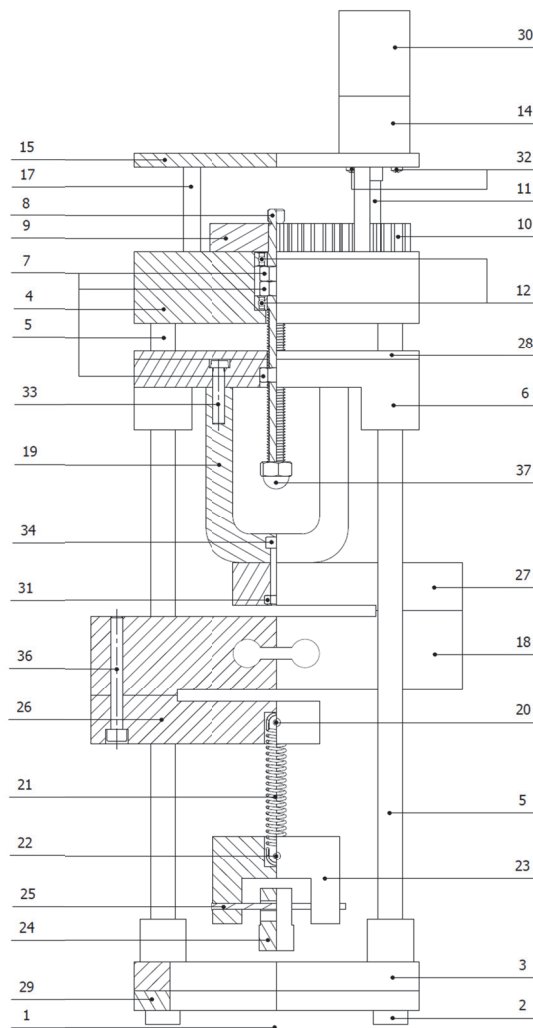
- zbudowanie stanowiska badawczego w postaci maszyny wytrzymałościowej w celu ilościowego porównania metod zwiększenia przyczepności, umożliwiającej doświadczać wyznaczenie sił adhezji na granicy detal – stół,
- przedstawienie metody obliczeniowej zastosowanej do zaprojektowania napędu mechanicznego urządzenia,
- zaprezentowanie możliwości stosowania czujników pomiaru siły oraz programowalnego mikrokontrolera do pomiaru i zapisu wartości wielkości fizycznych,
- zaprezentowanie urządzenia jako potwierdzenie możliwości prototypowania oraz wykonywania docelowych urządzeń w oparciu o technologię FDM,
- przedstawienie metody badania oraz wyników uzyskanych podczas prób.

3. OPIS URZĄDZENIA

3.1. Budowa urządzenia

Urządzenie ustawione jest na stole maszyny do prototypowania metodą przyrostową (1) (rys. 1) na metalowych stopach (2) umiejscowionych w podstawie (3). Podstawa (3) jest połączona z płytą górną (4) za pomocą czterech prowadnic (5), po których przemieszczać może się ruchoma platforma (6). W platformie (6) znajduje się nakrętka (7) współpracująca z łożyskową w płycie górnej (4) śrubą (8) tak, że możliwy jest wyłącznie jej obrót względem osi z urządzeniem. Na drugim końcu śruby (8) zamontowane jest koło zębate (9) współpracujące z drugim kołem zębatym (10). Drugie koło zębate (10) jest osadzone na wałku (11), a ten na łożyskach (12) w płycie górnej (13). Drugie koło zębate (10) połączone jest z wałem wyjściowym motoreduktora (14), który zamontowany jest w płycie motoreduktora (15). Płyta motoreduktora (15) połączona jest z górną płytą za pomocą czterech śrub (16), które znajdują się w tulejach dystanso-

wych (17). Do ruchomej platformy (6) od dołu podłączony na sztywno jest siłomierz typu S (18) za pośrednictwem dystansu (19). Dystans (19) zapewnia miejsce dla przemieszczającej się względem dystansu (19) i siłomierza typu S (18) śruby (8). Do siłomierza (18) za pomocą sworznia (20) przyłączona jest sprężyna (21). Drugi koniec sprężyny (21) jest połączony za pomocą sworznia (22) z uchwytem (23) dla próbki (24). Uchwyt (23) otacza próbkę (24), z którą jest łączony za pomocą poziomo usytuowanego sworznia (25). Sworzeń (25) przechodzi przez próbkę (24) oraz otaczające ją części uchwyty (23). Motoreduktor (15) oraz siłomierz typu S (18) podłączony jest do sterownika z wyświetlaczem (26).



Rys. 1. Urządzenie do odrywania próbek od stołu (opracowanie własne)

3.2. Zasada działania urządzenia

Próbkę (24) wytwarza się na stole maszyny do prototypowania metodą przyrostową (1). Urządzenie ustawia się tak, aby jego oś z pokrywała się z osią próbki (24). Po ustawieniu przekłada się sworzeń (25) poprzez uchwyt (23) i próbkę (24). Po ustawieniu włącza się motoreduktor (14), który poprzez koła zębate wprawia w ruch obrotowy śrubę (8). Ruch obrotowy śruby (8) powoduje ruch liniowy nakrętki (7) razem z ruchomą platformą (6) w górę wzdłuż osi z urządzenia. Sprężyna (21) o dobieralnej sztywności ulega rozciąganiu aż do chwili oderwania próbki (24) od stołu maszyny do prototypowania metodą przyrostową (1). Rozciąganie sprężyny (21) umożliwia sterowanie szybkością przyrostu siły F odrywającej próbkę (24) poprzez dobór sprężyny (21) o określonej sztywności. Szybkość przyrostu siły F odrywającej próbkę (24) regulowana jest programowo poprzez sterownik z wyświetlaczem (26), sterujący motoreduktorem (15). Sterownik z wyświetlaczem (26) umożliwia zapis czasu pomiaru od początku próby i wartości siły F oraz wyświetla największą wartość siły F osiągniętą w trakcie próby.

3.3. Obliczenia konstrukcyjne

Zastosowany mechanizm śrubowy poddano obliczeniom wytrzymałościowym. Opisany mechanizm stanowi II przypadek obciążenia połączeń śrubowych, tj. dla obciążeń rozciąganych (lub ściskanych) i skręcających – śruba bez napięcia wstępnego obciążona siłą osiową Q oraz momentem skręcającym M_s . Ze względu na zastosowany siłomierz z zakresem do 400 N przyjęto siłę osiową Q o takiej właśnie wartości. Średnicę śruby przyjęto ze względu na kryteria konstrukcyjne, tj. łatwy dobór średnicy łożysk, możliwość kształtowania połączenia śruba – koło zębate, mały skok śruby, dostępność i cena śruby. Wybrano śrubę M6 o parametrach podanych w tabeli 1.

Tabela 1. Wymiary gwintu M6 zastosowanego do mechanizmu śruba – nakrętka (opracowanie własne)

Średnica gwintu	Skok gwintu	Średnica podziałowa	Średnica rdzenia śruby	Średnica otworu w nakrętce
d [mm]	P [mm]	d_2 [mm]	d_3 [mm]	D_1 [mm]
6,00	1,00	5,35	4,77	4,92

W pierwszej kolejności wyznaczono pozorny kąt tarcia między śrubą a nakrętką zakładając, że współczynnik tarcia między śrubą a nakrętką wynosi $\mu = 0,2$ oraz kąt zarysu gwintu dla śrub metrycznych – $\alpha = 60^\circ$ [Mazanek i in. 2009]:

$$\rho' = \arctg\left(\frac{\mu}{\cos\frac{\alpha}{2}}\right) = 13^\circ \quad (1)$$

Następnie określono kąt pochylenia linii śrubowej z poniższej zależności, przyjmując skok gwintu $P = 1$ mm oraz średnicę podziałową $d_2 = 5,35$ mm:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{P}{\pi \cdot d_2} = 0,0595; \quad \gamma = 3,4^\circ \quad (2)$$

Sprawdzono warunek samohamowności śruby:

$$\gamma < \rho' \quad (3)$$

Wybrana śruba spełnia warunek samohamowności. Zakładając możliwe straty na łożyskach ślizgowych o wartości do 25% obciążenia, zwiększono wartości siły Q z 400 N do 500 N. Na podstawie uzyskanych parametrów obliczono moment skręcający pochodzący od tarcia między śrubą a nakrętką:

$$M_s = 0,5 * d_2 * Q * tg(\gamma + \rho') = 320 \text{ Nmm} \quad (4)$$

W kolejnym kroku wyznaczono naprężenia rozciągające śruby, przyjmując średnicę rdzenia śruby $d_3 = 4,77 \text{ mm}$:

$$\sigma = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} * d_3^2} = 28 \text{ MPa} \quad (5)$$

Następnie wyznaczono naprężenia skręcające, bazując na dostępnych wartościach:

$$\tau = 2 * \sigma * tg(\gamma + \rho') * \frac{d_2}{d_3} = 15 \text{ MPa} \quad (6)$$

Do obliczenia naprężeń zastępczych posłużono się wzorem według hipotezy Hubera, zakładając naprężenia dopuszczalne na rozciąganie $kr = 140 \text{ MPa}$:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 38,2 \text{ MPa} \leq kr \quad (7)$$

Obliczono minimalny przekrój rdzenia śruby na podstawie siły osiowej $Q = 500 \text{ N}$ oraz naprężeń dopuszczalnych na rozciąganie $kr = 140 \text{ MPa}$:

$$d_3 = \sqrt{1,226 * \frac{4 * Q}{\pi * kr}} = 2,361 \text{ mm} \quad (8)$$

W urządzeniu zastosowano redukującą przekładnię mechaniczną o przełożeniu $i = 2$ oraz zębach prostych o module $m = 1,5 \text{ mm}$. Pierwsze koło o liczbie zębów $z_1 = 15$ jest bezpośrednio napędzane wałem motoreduktora, a drugie o liczbie zębów $z_2 = 30$ napędza mechanizm śrubowy. Na podstawie przełożenia przekładni obliczono minimalny moment obrotowy występujący na pierwszym kole [Rutkowski 2007]:

$$M_1 = \frac{M_2}{i} = 160 \text{ Nmm} \quad (9)$$

Ze względu na straty mocy, spowodowane elementami wydrukowanymi w technologii przyrostowej FDM, założono sprawność przekładni na poziomie 80%. Do momentu obrotowego silnika doliczono 20% niezbędnego momentu obrotowego:

$$M_s = 1,2 * M_1 = 192 \text{ Nmm} \quad (10)$$

Do układu należało dobrać taki silnik, aby generował wartość momentu co najmniej równą wartości wyliczonej. Pod uwagę wzięto również niską prędkość obrotową, żeby zapewnić powolny przyrost siły odrywającej. Dobrano silnik DC MT90 zasilany napięciem 12 V z przekładnią o prędkości obrotowej na wyjściu $70 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ oraz momencie obrotowym 420 Nmm. W celu uniknięcia przekroczenia wartości siły niszczącej elementy projektowanego urządzenia, w szczególności siłomierza i mechanizmu śrubowego, zastosowano ograniczenia programowe. W momencie przekroczenia wartości siły w siłomierzu następuje zatrzymanie silnika motoreduktora.

3.4. Elementy budowy urządzenia

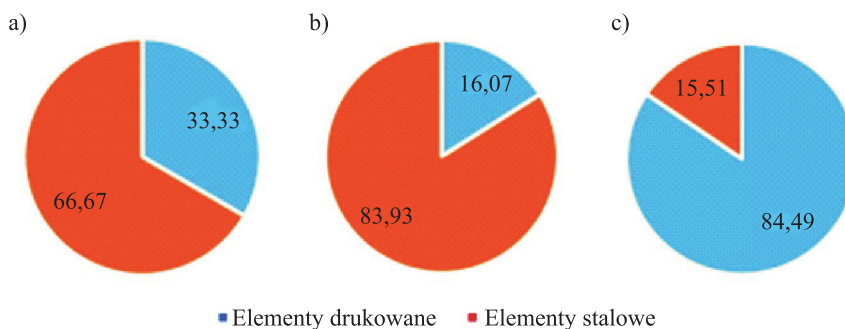
W celu optymalizacji masy oraz zmniejszenia kosztów wykonania urządzenia część elementów wykonano za pomocą metody przyrostowej FDM, pozostałe elementy to stalowe części znormalizowane. Technologia FDM pozwala zastąpić kosztowną obróbkę skrawaniem projektowanych detali, co w przypadku produkcji jednostkowej znacząco obniża ostateczną wycenę projektu. Ponadto posiadanie urządzenia do proto-

typowania tą technologią powoduje uniezależnienie się konstruktorów od produkcji, co skraca czas, który upływa od chwili zaistnienia pomysłu do momentu powstania prototypu. W celu wykazania możliwości zastosowania technologii FDM w przypadku omawianego urządzenia w tabeli 2 zestawiono sumaryczną masę i objętość elementów wykonanych w technologii FDM oraz oddzielnie elementów stalowych.

Tabela 2. Sumaryczna masa i objętość elementów wykonanych w technologii FDM oraz elementów stalowych wstępujących w urządzeniu (opracowanie własne)

	Liczba	Ilość	Masa	Masa	Objętość	Objętość
	szt.	%	g	%	cm ³	%
Elementy FDM	16	33,33	263,82	16,07	480,32	84,49
Elementy stalowe	38	66,67	1377,93	83,93	88,15	15,51
Suma	57	100,00	1641,75	100,00	568,33	100,00

Na rysunku 2a przedstawiono diagram wskazujący, że pod względem liczby sztuk elementów 66,67% stanowiły elementy stalowe. Należy jednak wskazać, że liczba ta wynikała głównie z faktu zastosowania wielu śrub, nakrętek i podkładek. Elementy stalowe pod względem masy stanowiły blisko 84% urządzenia (rys. 2b). Dysproporcja ta wynika z dużej gęstości tego materiału, wynoszącej ponad 7,8 g·cm⁻³. Elementy wytwarzane w technologii FDM stanowiły ponad 84% objętości urządzenia (rys. 2c). Gęstość Polilaktydu (PLA), z jakiego wytwarzane były elementy, wynosi pomiędzy 1,21 a 1,43 g·cm⁻³, czyli około 6 razy mniej niż stal. Dodatkowo stosując wypełnienie rzędu 40%, można zredukować masę jeszcze o ponad połowę, uzyskując elementy 12-krotnie lżejsze. W przypadku zastąpienia elementów wytworzonych w technologii FDM elementami stalowymi masa urządzenia wzrosłaby o około 3 kg. W przypadku zastąpienia elementów wytworzonych w technologii FDM elementami aluminiowymi masa wzrosłaby o 1 kg. Pierwotna masa urządzenia umożliwia ergonomiczną pracę, każde jej zwiększenie powodowałoby utrudnienie dla operatora.



Rys. 2. Stosunek właściwości części drukowanych techniką przyrostową FDM oraz części stalowych: a) procentowy stosunek ilościowy, b) procentowy stosunek masowy, c) procentowy stosunek objętościowy (opracowanie własne)

3.5. Budowa układu sterującego

Układ sterujący urządzeniem składa się z płytki Arduino Uno. Jest to popularny moduł z mikrokontrolerem AVR ATmega328 w wymiennej obudowie. Ma 32 kB pamięci Flash, 2 kB RAM, 14 cyfrowych wejść/wyjść, z których 6 można wykorzystać jako kanały PWM (Pulse-Width Modulation – modulacja szerokości impulsów), 6 wejść analogowych oraz popularne interfejsy komunikacyjne. Programowanie mikrokontrolera odbywa się najczęściej za pośrednictwem Arduino IDE bazującego na projekcie Processing. Język programowania Arduino bazuje na Wiring i przypomina język C. Kod napisanego programu jest pośrednio kompilowany przez avr-gcc wewnątrz samego Arduino IDE, a następnie wgrany do podłączonej płytki Arduino. IDE działa jako emulator terminala szeregowego, pozwalając na interakcję z pracującym Arduino [Gertz i Justo 2014, Monk 2014].

Do sterowania silnikiem wykorzystano moduł Pololu DRV8835. Jest on oparty na układzie firmy Texas Instruments DRV8835 i stanowi dwukanałowy sterownik silników prądu stałego. Zaletą układu są jego małe wymiary. Moduł może kontrolować silniki zasilane napięciem z zakresu 2,0 V do 11 V o ciągłym poborze prądu do 1,2 A. Kanały sterownika można połączyć w celu zwiększenia wydajności prądowej – do 2,4 A. Układ umożliwia sterowanie prędkością obrotową z wykorzystaniem PWM – metody regulacji sygnału prądowego lub napięciowego o stałej amplitudzie i częstotliwości, polegającej na zmianie wypełnienia sygnału. Ten rodzaj sterowania silnikami prądu stałego pozwala na obniżenie prędkości obrotowej silnika z dużo mniejszym spadkiem momentu obrotowego niż w przypadku zastosowania zwykłego sterowania napięciem [Gertz i Justo 2014, Monk 2014].

Do pomiaru siły wykorzystano belkę tensometryczną NA1 z zakresem pomiarowym do 400 N oraz napięciem pracy w zakresie od 5 do 12 V. Do przetworzenia wartości napięcia zmierzonego w mostku tensometrycznym wykorzystano wzmacniacz operacyjny z przetwornikiem analogowo cyfrowym HX711. Układ ten zasilany jest napięciem od 2,7 V do 5,0 V, komunikuje się z mikrokontrolerem poprzez dwuprzewodową magistralę: linię danych i linię zegarową. Możliwe jest pobieranie zmierzonych danych z dwiema częstotliwościami, tj. 10 Hz lub 80 Hz [Gertz i Justo 2014, Monk 2014].

3.6. Programowanie układu sterującego

Program w całości powstał w Arduino IDE. Istnieje możliwość wyświetlenia mierzonych wartości bezpośrednio na wyświetlaczu alfanumerycznym, jak również po podłączeniu do komputera z zainstalowanym środowiskiem Arduino IDE w monitorze portu szeregowego. Za pomocą komputera uzyskuje się wyniki w postaci dwóch kolumn: wartości czasu i zmierzonej w danym czasie wartości siły. Sterowanie urządzeniem, rozumiane jako:

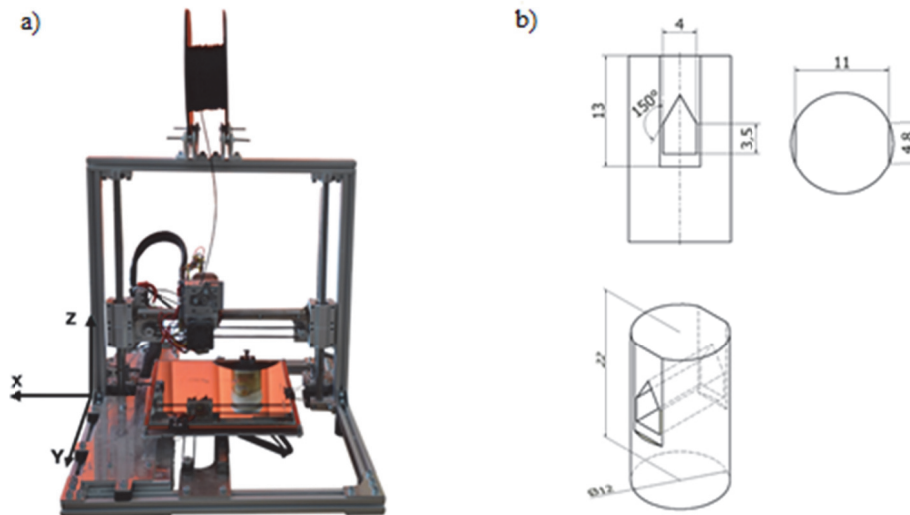
- załączenie pracy silnika w jednym kierunku – start próby,
 - załączenie pracy silnika w drugim kierunku – powrót do pozycji początkowej,
 - zatrzymanie silnika – przerwanie próby, ustawienie uchwytów w pozycji początkowej,
 - sterowanie prędkością silnika lub szybkością przyrostu siły odrywającej w próbie,
- jest możliwe dzięki przyciskom zamontowanym przy wyświetlaczu lub po podłączeniu do komputera za pomocą komend w monitorze portu szeregowego.

3.7. Kalibracja układu pomiarowego

Kalibracja układu pomiarowego przebiega poprzez starowanie wyświetlanej wartości, a następnie – zawieszenie do uchwytów ciężarka o znanej masie. W kolejnym kroku dobiera się wartość współczynnika kalibracji, przy którym pokazywana wartość siły będzie siłą ciężkości zawieszzonego ciężarka.

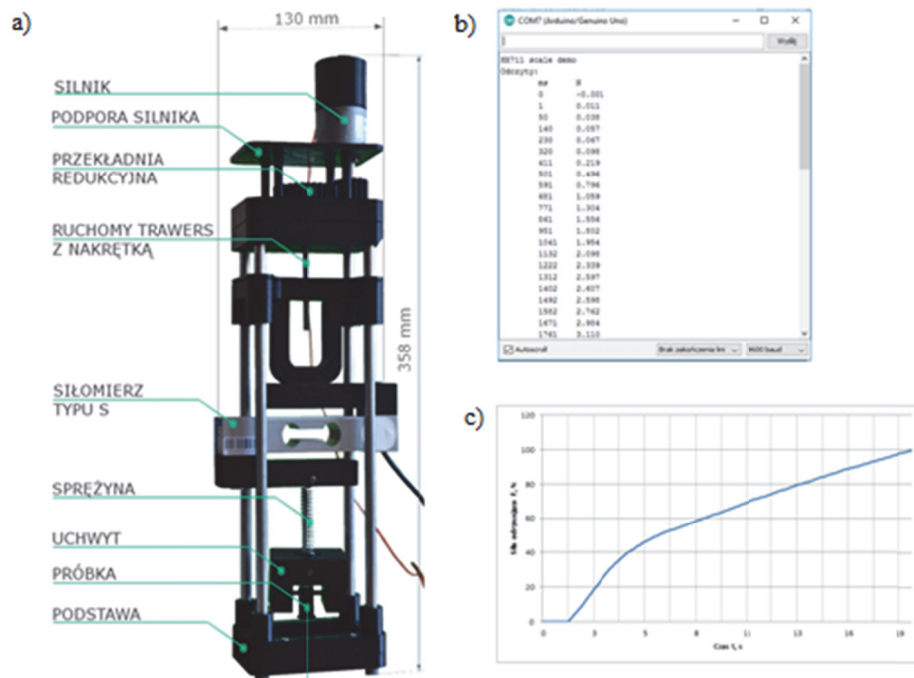
4. METODA BADANIA ORAZ PRZEDSTAWIENIE PRZYKŁADOWYCH WYNIKÓW

Do przeprowadzenia badań posłużyło urządzenie wytwarzające w technologii FDM – DIM200 przedstawione na rysunku 3a. Jako stół roboczy użyto szkła, które miało gładką powierzchnię. Dzięki niewielkim gabarytom urządzenia pomiarowego możliwe było wytwarzanie jednorazowo czterech próbek, których schemat przedstawiono na rysunku 3b.



Rys. 3. Urządzenie DIM 200: a) widok, b) schemat próbki (opracowanie własne)

Pomiaru siły potrzebnej do oderwania próbki od stołu drukarki 3D dokonywano dzięki uprzednio skonstruowanej w tym celu maszynie wytrzymałościowej (rys. 4a). Wytworzoną próbkę mocowano w uchwycie. Próbkę poddawano osiowemu odrywaniu od stołu drukarki 3D. W monitorze portu szeregowego (rys. 4b) dokonywała się rejestracja siły i czasu, w jakim próbka została oderwana od stołu. Na podstawie uzyskanych wartości sporządzono wykres zależności siły odrywającej od czasu (rys. 4c). W zaprezentowanym przypadku pomiar dotyczył próbki umieszczonej na stole, którego temperatura wynosiła 80°C, próbka została oderwana przy sile o wartości ok. 100 N w czasie 19 sekund.



Rys. 4. Maszyna wytrzymałościowa: a) budowa, b) rejestracja danych, c) przykładowe zestawienie uzyskanych wyników (materiał PLA, temp. stołu: 80°C) (opracowanie własne)

5. PODSUMOWANIE

Nieustający rozwój technologii FDM świadczyć może o ogromnym zainteresowaniu i coraz częstszym wykorzystywaniu tej metody. Możliwość budowy prototypów oraz urządzeń otwiera szereg perspektyw, tym bardziej że koszt wytworzenia jest stosunkowo niewielki. Przedstawione rozwiązanie konstrukcyjne maszyny wytrzymałościowej stanowi potwierdzenie wykorzystania metody do budowy nie tylko prototypów, ale docelowych urządzeń. Zbudowane stanowisko badawcze pozwala na przeprowadzenie prób wytrzymałościowych i weryfikację postawionych hipotez badawczych. Rejestracja pomiarów, dokonywana dzięki zainstalowanym czujnikom oraz programowalnemu mikrokontrolerowi, umożliwia uzyskanie powtarzalnych wyników i przeprowadzanie badań siły adhezji pomiędzy stołem urządzenia a wytwarzanym detalem.

LITERATURA

Chee Kai Chua, Chee How Wong, Wai Yee Yeong, 2017. Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing. Academic Press is an imprint of Elsevier Singapore.

Gertz E., Justo P.D., 2014. Monitorowanie otoczenia z Arduino. Helion Gliwice.

Kabat P., Magdziarz D., Maćkowiak P., Kotyk M., 2016. Dokładność elementów uzyskanych za pomocą metody FDM w zależności od parametru prędkości wytwarzania. [W:] Nauka niejedno ma imię..., tom IV, Wyd. Uczeln. UTP w Bydgoszczy, 27-36.

Kotyk M., Maćkowiak P., 2015. Badanie podstawowych właściwości mechanicznych próbek z tworzywa ABS wykonanych za pomocą drukarki 3D w zależności od stopnia ich wypełnienia. [W:] Nauka niejedno ma imię..., tom III, Wyd. Uczeln. UTP w Bydgoszczy, 43-52.

Maćkowiak P., Kotyk M., Kabat P., Tomkiewicz R., Magdziarz D., 2016. Wielkość i liczba wad w elementach wyprodukowanych metodą FDM w zależności od parametru prędkości wytwarzania. *Developments in Mechanical Engineering* 7(4), 17-31.

Mazanek E., Kania L., Dziurski A., 2009. Przykłady obliczeń z podstaw konstrukcji maszyn, tom 2. WNT Warszawa.

Monk E., 2014. Zabawy z elektroniką. Helion Gliwice.

Rutkowski A., 2007. Części maszyn. WSiP Warszawa.