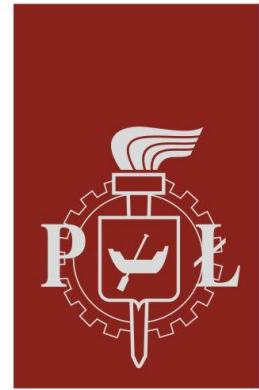


Politechnika Łódzka

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki

Instytut Automatyki, Zakład Sterowania Robotów



PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

Zgrzewanie CNC folii na potrzeby wykonywania foliowych robotów miękkich

CNC plastic sheet welding for soft robotics applications

Imię i nazwisko: Maciej Łukaszewicz

Numer albumu: 215293

Promotor pracy:

dr inż. Igor Zubrycki

Łódź, 2021

SPIS TREŚCI

WSTĘP	5
CEL I ZAKRES PRACY	6
1. FOLIOWE SIŁOWNIKI WORECZKOWE	7
1.1. BUDOWA SIŁOWNIKÓW WORECZKOWYCH	7
1.2. GEOMETRIA SIŁOWNIKÓW WORECZKOWYCH	8
1.2.1. Model liniowego siłownika woreczkowego	9
1.2.2. Model obrotowego siłownika woreczkowego	10
1.3. PORÓWNANIE MODELI Z OBIEKTAMI RZECZYWISTYMI	11
2. TECHNIKI ZGRZEWANIA FOLII.....	15
2.1. ZGRZEWANIE OPOROWE / METODĄ GORĄCEJ ELEKTRODY.....	15
2.2. ZGRZEWANIE GORĄCYM GROTEM PRZESUWNYM	16
2.3. ZGRZEWANIE ULTRADŹWIEKOWE	18
2.4. PORÓWNANIE TECHNIK ZGRZEWANIA	19
3. PROGRAMOWANIE MASZYN CNC I BUDOWA DRUKAREK 3D.....	21
3.1. OPROGRAMOWANIE CAD/CAM.....	21
3.2. OPROGRAMOWANIE SPRZĘTOWE MASZYN CNC	24
3.3. DRUKARKI 3D W ŚWIECIE MASZYN CNC	25
3.4. BUDOWA DRUKAREK 3D.....	26
3.5. DRUKARKA 3D W KONCEPCJI ZGRZEWARKI CNC	27
4. ELEMENTY MASZYNY I UŻYTE OPROGRAMOWANIE	28
4.1. DRUKARKA REP RAP PRO HUXLEY	28
4.2. MIKROKONTROLER ARDUINO	29
4.3. OPROGRAMOWANIE WBUDOWANE MARLIN	29
4.4. STEROWNIK DRUKARKI RAMPS 1.4.....	30
4.5. OPROGRAMOWANIE CAM REPETIER-HOST	31
4.6. POZOSTAŁE ELEMENTY DRUKARKI W PROJEKCIE	32
5. BUDOWA MASZYN	34
5.1. PRZEBUDOWA DRUKARKI.....	34
5.2. KONFIGURACJA OPROGRAMOWANIA MARLIN.....	37
5.2.1. Parametry połączenia i konstrukcji maszyny	38
5.2.2. Parametry temperaturowe (lutownicy).....	41
5.3. POZIOMOWANIE STOŁU ROBOCZEGO	45
6. PRZYKŁADOWY PROCES ZGRZEWANIA FOLIOWEGO SIŁOWNIKA	48

7. BADANIE PARAMETRÓW ZGRZEWANIA MASZYN	54
7.1. WPLYW NACISKU NA ZGRZEWANIE	54
7.2. WPLYW TEMPERATURY NA ZGRZEWANIE	56
7.3. WPLYW PRĘDKOŚCI GROTU NA ZGRZEWANIE	58
PODSUMOWANIE	59
STRESZCZENIE	60
BIBLIOGRAFIA	61

Wstęp

Współczesna robotyka miękka stawia projektantom robotów coraz więcej wyzwań. Oprócz podążania za odtwarzaniem struktur żywych organizmów w konstrukcjach robotów, gałąź robotyki miękkiej dąży do produkcji elementów w jak najkrótszym czasie, z użyciem powszechnie dostępnych narzędzi. Wychodząc naprzeciw temu problemowi powstało nowe rozwiązanie tak zwanych siłowników woreczkowych (ang. „*Pouch Motors*”). Koncepcja foliowych siłowników miękkich powstała dzięki rozpowszechnieniu się maszyn CNC takich jak drukarki 3D, które wcześniej w dużym stopniu przyczyniły się do rozwoju produkcji mechanicznych struktur robotów. Przy pomocy programów komputerowych typu CAD i CAM, projektowanie i programowanie maszyn do tworzenia łańcuchów kinematycznych robotów stało się bardzo ułatwione. Podobnych ogólnodostępnych rozwiązań zaczęto szukać w produkcji napędów robotów.

Foliowe siłowniki woreczkowe powstają poprzez szczelne zgrzewanie dwóch arkuszy folii z tworzywa termoplastycznego, finalnie tworzących kontury w postaci zamkniętych pęcherzy, w których istnieje możliwość ich wypełniania cieczą lub gazem - najczęściej powietrzem. W wyniku napełniania pęcherzy, następuje boczne rozszerzanie się komór i skurcz wzdłuż zgrzanego kształtu. Właśnie to zjawisko wykorzystano do generowania ruchu liniowego i obrotowego w foliowych robotach miękkich. Produkcja tego typu siłowników ogranicza się do zgrzania folii w odpowiedni kształt i stworzenia kanałów dla wtłaczanego powietrza. W porównaniu do innych, popularnych w przemyśle siłowników, poziom skomplikowania budowy i czas ich produkcji są nieporównywalnie korzystniejsze. Oczywiście, z prostotą tego rozwiązania przychodzą pewne ograniczenia, które będą przedstawione w tej pracy. Najpopularniejszym narzędziem do tworzenia foliowych siłowników woreczkowych są maszyny CNC, których efektor poruszający się po przestrzeni zastąpiony jest elementem zgrzewającym folie. Praca jest poświęcona tworzeniu maszyny CNC, pozwalającej na produkcję foliowych robotów miękkich.

Pierwsze dwa rozdziały pracy przeznaczone są przedstawieniu foliowych siłowników woreczkowych oraz przeglądzie powszechnych technik ich zgrzewania. Trzeci rozdział porusza tematykę oraz etapy tworzenia produktu maszyn CNC. Przedstawia również budowę drukarek 3D, pokazując je w świetle tworzonej zgrzewarki CNC. Piąty oraz szósty rozdział zawiera opis budowy i programowania maszyny, omawiając jej główne elementy i proces konstrukcji. Siódmy rozdział zawiera

prezentację przykładowego procesu zgrzewania na przykładzie foliowego siłownika woreczkowego. Ostatni rozdział jest poświęcony porównaniu parametrów zgrzewania różnych tworzyw termoplastycznych, umożliwiającą produkcję foliowych robotów miękkich.

Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest budowa prostej maszyny CNC wykorzystywanej do zgrzewania folii termoplastycznej. Podstawą konstrukcji urządzenia zostanie drukarka 3D, której elementy odpowiadające za technologię wydruku przestrzennego zostaną zastąpione układem do zgrzewania folii. Budowa zgrzewarki zakłada możliwość podłączenia dowolnej lutownicy kolbowej zgrzewającej folie, z odczytem i regulacją temperatury realizowaną za pomocą elementów podłączonych do mikrokomputera drukarki. Wykorzystane oprogramowanie wbudowane mikrokomputera pozwoli na pełną obsługę wszystkich elementów urządzenia, z możliwością edycji według własnych potrzeb.

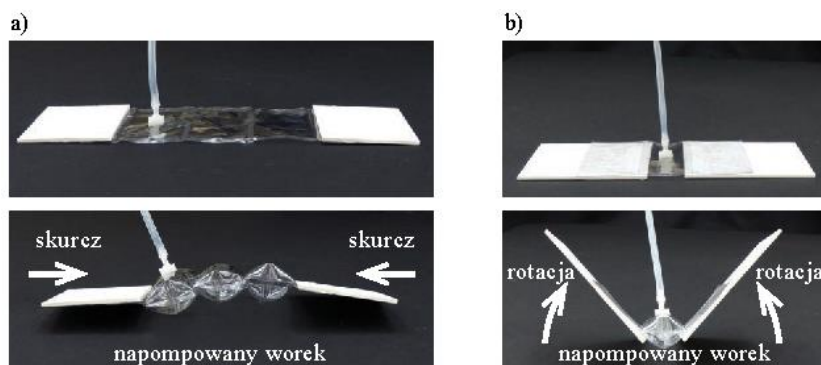
Użytkownik maszyny za pomocą programów do modelowania przestrzennego CAD będzie mieć możliwość zaprojektowania dowolnego kształtu zgrzewanej folii. Wykorzystane oprogramowanie CAM pozwoli na interpretację stworzonego modelu przestrzennego, tłumacząc go na język programowania G-code zrozumiały dla maszyny. Oprócz tego, oprogramowanie pozwoli użytkownikowi na pełną kontrolę nad maszyną, z możliwością monitorowania i modyfikacji parametrów zgrzewania.

Z wykorzystaniem zbudowanej zgrzewarki CNC, przetestowane zostaną podstawowe parametry zgrzewania wybranych folii termoplastycznych. Zgrzane folie zostaną poddane testowi wytrzymałościowemu, wskazując optymalne parametry zgrzewania dla badanych tworzyw.

1. Foliowe siłowniki woreczkowe

1.1. Budowa siłowników woreczkowych

Foliowe siłowniki woreczkowe są innowacyjnym pomysłem na produkcję niedrogich elementów wykonawczych robotów, przy użyciu łatwo dostępnych narzędzi. W dobie rozwijającego się komputerowego wspomaganie projektowania CAD i komputerowego sterowania urządzeniami numerycznymi CNC, prototypowanie i produkcja robotów stała się ułatwiona, a także bardziej dostępna. Siłowniki woreczkowe powstają poprzez zgrzewanie dwóch arkuszy folii z tworzywa sztucznego, tworząc kontury w kształcie pęcherzy, do których istnieje możliwość jednoczesnego kompresowania powietrza [1]. Siłowniki foliowe można podzielić na dwa rodzaje w zależności od generowanego ruchu – obrotowe i liniowe. Przykład pracy obu typów woreczków pokazany jest na rysunku 1.1. Oba wykorzystują mechaniczną pracę odkształcenia worka wraz z wypełnianiem ich wnętrza. Zalecane jest stosowanie elementów mocujących, tak, aby wydobyć pracę mechaniczną worka na zewnątrz układu.



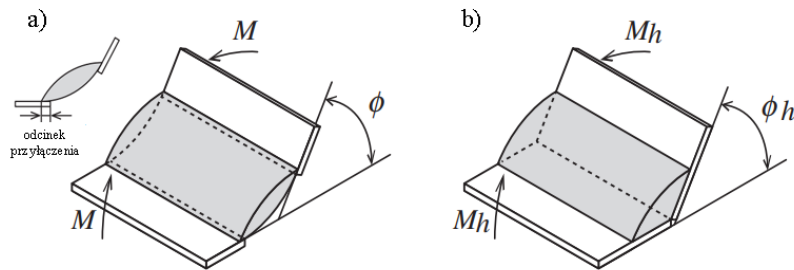
Rysunek 1.1. Przykład pracy siłowników woreczkowych a) liniowego; b) obrotowego.

Źródło: "Pouch Motors: Printable/Inflatable Soft Actuators for Robotics" [1].

Pracę mechaniczną woreczków można podzielić na dwa rodzaje – skurcz wzdłuż zgrzanego kształtu, wywołujący siłę naprężenia (skurczu) worka oraz zmianę krzywizny powierzchni worka, wywołującą moment obrotowy elementu przyczepionego do krzywizny woreczka. Dodatkowo, w przypadku siłownika obrotowego, można rozróżnić dwa rodzaje konstrukcji ze względu na przyłączenie elementów mocujących:

- struktura otwarta, w której elementy mocujące przyłączone są stycznie do małego odcinka krzywizny komory worka (rys. 1.2 a)),

- struktura zawiasowa, w której elementy mocujące przyłączone są do jednego boku woreczka w postaci zawiasu listwowego (rys. 1.2 b)).



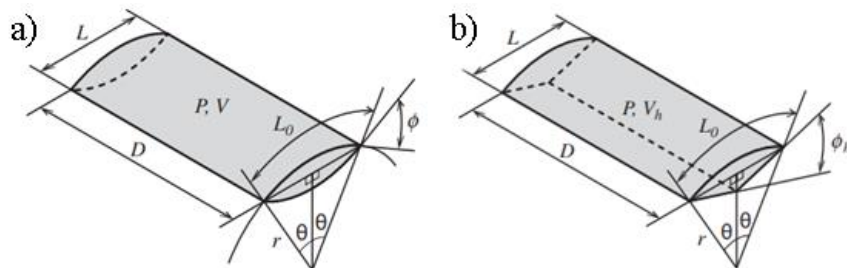
Rysunek 1.2. Struktury obrotowych siłowników woreczkowych a) otwartej;
b) zawiasowej.

Źródło: "Pouch Motors: Printable Soft Actuators Integrated with Computational Design Applications"
[2].

1.2. Geometria siłowników woreczkowych

Modele siłowników woreczkowych pozwalają poznać zasadę ich działania oraz oszacować generowaną siłę skurczu, czy też moment obrotowy woreczka. W tym celu przyjmuje się prosty model, bazujący na zmianach w geometrii oraz podstawowych prawach fizyki. Poniższe wzory są zaczerpnięte z drugiej publikacji autorów rozwiązania [2], a ich wykorzystanie pozwala na porównanie modeli z wartościami mierzonymi podczas ich pracy.

W woreczku poddanym wtłaczaniu powietrza pojawia się wewnętrzne ciśnienie P , które powoduje rozszerzanie się komór (zwiększenie objętości V) na kształt płatów o cylindrycznych powierzchniach - po obu stronach woreczka lub po jednej w przypadku struktury zawiasowej. Schemat zmian geometrii obu struktur siłowników pokazano na rysunku 1.3.



Rysunek 1.3. Geometria woreczków w przypadku struktury a) otwartej; b) zawiasowej.

Źródło: "Pouch Motors: Printable Soft Actuators Integrated with Computational Design Applications"
[2].

Wraz z wypełnianiem wnętrza worka, rośnie objętość komór V i kąt centralny wycinka kołowego θ , zmniejszając promień krzywizny cylindrycznego kształtu r . Model zakłada idealną sztywność tworzywa i tym samym brak energii sprężystości pochodzącej z elastyczności materiału. Dodatkowo, zakłada się, że szerokość woreczka D nie ulega zmianie, a zmiany powierzchni bocznych worka nie są brane pod uwagę. Przy założeniu, że powierzchnie worka są cylindryczne, z geometrii uzyskuje się zależności [2]:

$$L_0 = 2r\theta \quad (1)$$

$$r\sin\theta = \frac{L}{2} \quad (2)$$

gdzie L_0 jest początkową długością płaskiego, niewypełnionego worka, r jest promieniem krzywizny komory, θ jest kątem centralnym wycinka kołowego, a L jest długością worka.

Z równań (1) i (2), wyciągając promień krzywizny r otrzymuje się równanie na długość worka [2]:

$$L(\theta) = L_0 \frac{\sin\theta}{\theta} \quad (3)$$

które jest prawdziwe dla obu siłowników - liniowych i obrotowych. W przypadku siłowników liniowych, objętość worka wyraża się wzorem [2]:

$$V(\theta) = \frac{L_0^2 D}{2} \left(\frac{\theta - \cos\theta \sin\theta}{\theta^2} \right) \quad (4)$$

W siłownikach obrotowych wykonanych w sposób zawiasowy (złączonych z nawierzchnią od jednego boku), objętość można obliczyć korzystając z pola powierzchni przekroju poprzecznego worka A i jego szerokości D [2]:

$$V_h = A_0 D = L_0^2 D \frac{\theta - \cos\theta \sin\theta + \sin\theta \sqrt{\theta^2 - (\sin\theta)^2}}{4\theta^2} \quad (5)$$

Powyższe wzory pozwalają na oszacowanie długości i objętości worka pod wpływem ich wypełniania. Zmiany w geometrii wskazują na siły działające w układzie.

1.2.1. Model liniowego siłownika woreczkowego

W przypadku liniowych siłowników workowych można przyjąć, że praca wtłaczanego powietrza zamieniana jest na siłę naprężenia (skurczu) worka F . Z zasady zachowania energii otrzymuje się zależność [2]:

$$-FdL = PdV \quad (6)$$

gdzie F jest siłą napięcia, P jest wewnętrznym ciśnieniem woreczka, a dL i dV są przemieszczeniami kolejno długości i objętości worka. Przekształcając równanie zasady zachowania energii, otrzymuje się wzór na siłę naprężenia worka [2]:

$$F(\theta) = -P \frac{dV}{dL} = -P \frac{\frac{dV}{d\theta}}{\frac{dL}{d\theta}} = L_0 DP \frac{\cos\theta}{\theta} \quad (7)$$

Dodatkowo, wprowadza się pojęcie współczynnika skurczu L_e jako stosunek całkowitego odkształcenia do długości początkowej [2]:

$$L_e = \frac{L_0 - L}{L_0} = 1 - \frac{\sin\theta}{\theta} \quad (8)$$

Maksymalną wartość współczynnika otrzymuje się dla $\theta = \frac{\pi}{2}$, a wynosi on $L_e \approx 0.363$ (36.3%). Maksymalną siłę skurczu otrzymamy, gdy $L = L_0$. Gdy kąt θ wynosi zero, wtedy otrzymuje się nieskończoną siłę skurczu F , ale w rzeczywistości jest ona ograniczona przez materiał, który może się rozciągać. Rzeczywiste ograniczenie skurczu jest mniejsze niż 36.3%, z powodu znaczącego spadku siły przy większych wartościach skurczu. Większa liczba komórek w siłowniku powoduje spadek maksymalnej wartości współczynnika skurczu, ponieważ segmenty połączeniowe nie ulegają kurczeniu podczas pracy siłownika.

1.2.2. Model obrotowego siłownika woreczkowego

Podobnie jak w przypadku siłownika liniowego, praca wtłaczanego powietrza jest bezpośrednio powiązana z generowaniem momentu obrotowego M . Z zasady zachowania energii otrzymuje się zależność [2]:

$$Md\varphi = PdV \quad (9)$$

gdzie $d\varphi$ odpowiada za zmianę kąta elementu mocującego. Generowany kąt obrotu jest funkcją kąta θ , a jego wartość różni się w zależności od przyjętej struktury siłownika obrotowego. Kolejno dla struktury otwartej i zawiasowej, kąt obrotu wyraża się zależnością [2]:

$$\varphi(\theta) = 2\theta \quad (10)$$

$$\varphi_h(\theta) = 2\cos^{-1}\left(\frac{\sin(\theta)}{\theta}\right) \quad (11)$$

Zasada zachowania energii pozwala wyprowadzić wzory na generowany moment obrotowy dla obu struktur [2]:

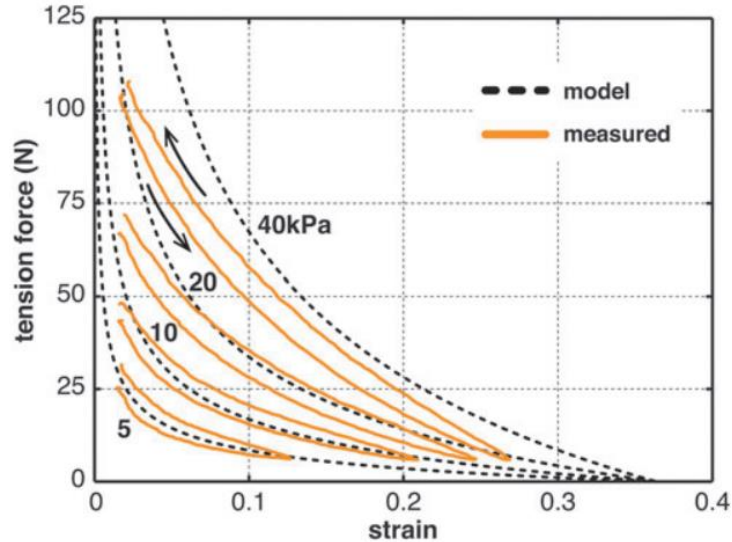
$$M(\theta) = -P \frac{dV}{d\varphi} = -P \frac{\frac{dV}{d\theta}}{\frac{d\varphi}{d\theta}} = L_0^2 DP \frac{\cos\theta(\sin\theta - \theta\cos\theta)}{2\theta^3} \quad (12)$$

$$M_h(\theta) = \frac{L_0^2 DP}{8\theta^2} (-1 + \theta^2 + \cos 2\theta - \sqrt{2}\cos\theta\sqrt{-1 + 2\theta^2 + \cos 2\theta}) \quad (13)$$

W teorii, maksymalny kąt obrotu dla struktury otwartej wynosi π radianów (180°). Dla struktury zawiasowej wynosi on 1.63 radianów (95.3°). Maksymalny moment otrzymuje się dla kąta obrotu φ równego zero.

1.3. Porównanie modeli z obiektami rzeczywistymi

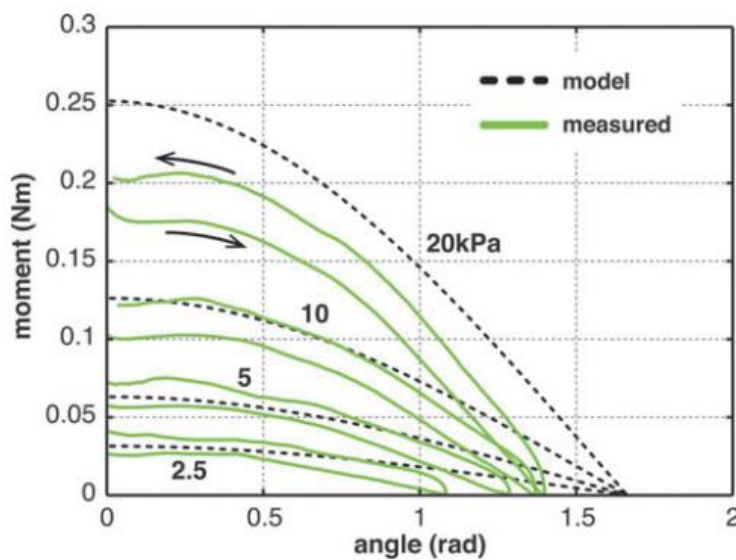
Stworzone modele nie są idealne i nie uwzględniają wielu czynników takich jak właściwości tworzywa, z którego zrobiono siłownik woreczkowy. Z tego powodu, modele będą odstawać od obiektów rzeczywistych. W drugim wydaniu artykułu autorów przedstawiających foliowe siłowniki woreczkowe [2], umieszczono wykresy porównujące stworzone modele z pomierzonymi wartościami dla obu rodzajów siłowników (wyk. 1.4 oraz wyk. 1.5). Siłowniki były wykonane z folii polietylenowej – liniowy o dwóch komorach, wymiarach 7,5x2,5 [cm] i grubości folii 0.102 [mm] oraz obrotowy w strukturze zawiasowej o wymiarach 7,5x2,5 [cm] i grubości folii 0.049 [mm]. Wyniki badań podsumowano na wykresach 1.4 i 1.5.



Wykres 1.4. Wykres generowanej siły naprężenia woreczka liniowego od współczynnika skurczu, dla różnych wartości wewnętrznego ciśnienia. Linie przerywane reprezentują modele, a linie ciągłe wartości zmierzone. Strzałki obok linii ciągłych wskazują kierunek histerezy.

Źródło: "Pouch Motors: Printable Soft Actuators Integrated with Computational Design Applications" [2].

Analizując wykres siłowników liniowych można jasno stwierdzić, że wartości zmierzone różnią się znacząco od tych wyliczonych z modelu. Większe różnice występują przy większych wartościach ciśnieniach wewnątrz worka. Pojawia się niekorzystne zjawisko histerezy, którego prosty model nie uwzględnia. Siła woreczka jest malejącą funkcją skurczu o kształcie lekko wypukłym. Maksymalny zmierzony skurcz wynosi około 30% długości początkowej.



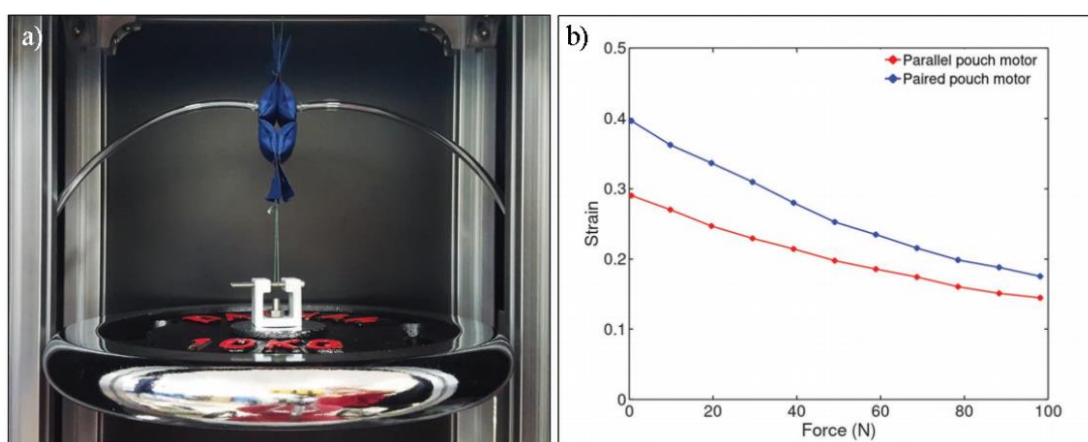
Wykres 1.5. – Wykres generowanego momentu obrotowego od kąta obrotu, dla różnych wartości wewnętrznego ciśnienia. Linie przerywane reprezentują modele, a linie ciągłe wartości zmierzone. Strzałki wskazują kierunek histerezy.

Źródło: "Pouch Motors: Printable Soft Actuators Integrated with Computational Design Applications" [2].

Wykres siłownika obrotowego pokazuje zależność momentu od kąta obrotu siłownika w strukturze zawiasowej, w której model zakłada maksymalny kąt obrotu 1.63 radiana. Podobnie jak w przypadku siłowników liniowych, modele odstają od wartości pomierzonych, im większe ciśnienie występuje w układzie. Pojawia się również zjawisko histerezy, które nie jest korzystne w sterowaniu siłownikiem. Generowany moment jest malejącą funkcją kąta obrotu, o kształcie lekko wklęsłym. Maksymalna zmierzona wartość momentu to 0.2 Nm, a maksymalny kąt obrotu to około 80° dla ciśnienia 20 kPa.

Wnioskując z powyższych wykresów – do uzyskania szerokiego zakresu pracy siłownika woreczkowego, potrzebne jest wyższe ciśnienie w układzie. W prostych aplikacjach siłowników, regulacji poddawana jest ilość wtłaczanego powietrza, która jest proporcjonalna do ciśnienia wewnątrz worka. Dodatkowo, zmierzone przez autorów wartości wskazują na brak dużej precyzji w realnych zastosowaniach siłowników.

Pojawia się zjawisko histerezy, które również utrudnia sterowanie. Same siłowniki woreczkowe nie są w stanie wytrzymać dużych obciążeń, głównie ze względu na obecnie stosowane techniki ich wytwarzania, ograniczające ich wytrzymałość. Jednak istnieją rozwiązania, które pozwalają na uzyskanie lepszych efektywności siłowników. W jednym z artykułów badających foliowe siłowniki woreczkowe [3] stwierdzono, że łączenie tych samych siłowników liniowych w pary pozwala osiągać większe wartości skurczu przy tym samym obciążeniu, niż w przypadku równoległej pracy dwóch tych samych siłowników. Konstrukcja takiej struktury oraz wyniki badań z artykułu są pokazane są na rysunku 1.6.



Rysunek 1.6 a) Przykład struktury siłownika liniowego połączonego w parę; b) Wykres porównujący maksymalne skurcze dla siłowników z woreczkami równoległymi (kolor czerwony) i połączonymi w pary (kolor niebieski) przy ciśnieniu 90 kPa.

Źródło: "Design of Paired Pouch Motors for Robotic Applications" [3].

Struktura pracująca w parze potrafi osiągać maksymalne wartości skurczu ponad teoretyczne 36.3% (zmierzone około 41%), a są to wartości nieosiągalne dla pojedynczej struktury. Powodem tego jest to, że struktury połączone w pary mogą uzyskiwać prawie okrągły przekrój poprzeczny (większy kąt wycinka kołowego), dzięki wzajemnemu dociskaniu się woreczków. Można stwierdzić, struktury sparowane ze sobą pozwalają na zwiększenie zakresu działania siłowników, przede wszystkim tam gdzie korzysta się z ich właściwości przemieszczenia liniowego. W dalszej części artykułu autorzy badali połączenia większej ilości par, co skutkowało jeszcze lepszymi rezultatami.

Główną wadą siłowników woreczkowych są obecnie stosowane materiały do ich produkcji oraz słabość połączeń międzywarstwowych powstałych w wyniku zgrzewania.

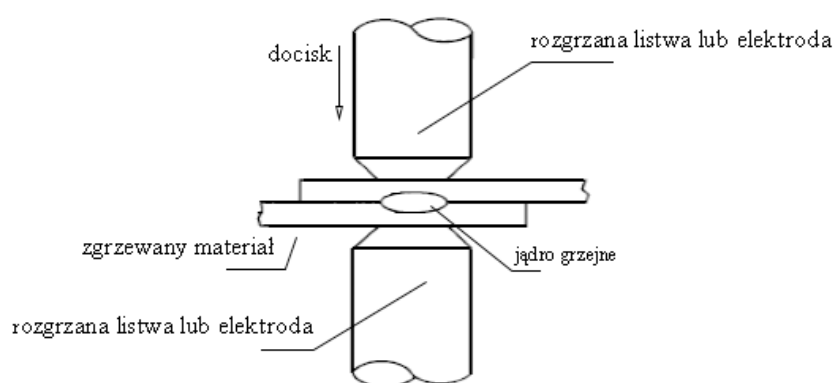
Ogranicza to zakres użytkowania siłowników, głównie podczas ich długotrwałej pracy. Same materiały z których są one wykonywane ulegają powolnym odkształceniom, wpływając negatywnie na ich żywotność. Częstym przypadkiem zgrzewania folii jest nierównomierne łączenie, które skutkuje pojawieniem się słabszych punktów połączeniowych. Podczas implementacji siłownika może się okazać, że mimo optymalnie dobranego zakresu pracy ulega on uszkodzeniu. Konstrukcja korzystająca z wadliwego siłownika będzie wymagać jego wymiany, a jest to nieprzychylne przy częstym użytkowaniu. Proces zgrzewania powinien być powtarzalny i równomierny, pozwalając na wyznaczenie optymalnego zakresu pracy zgrzewanego siłownika oraz optymalnych parametrów zgrzewania. W aplikacjach foliowych robotów miękkich, projektant robota powinien mieć możliwość przewidzenia, do jakiego zakresu zadań będzie się on nadawać, ograniczając wpływ czynników losowych na finalne użytkowanie.

2. Techniki zgrzewania folii

Foliowe roboty miękkie powstają poprzez zgrzewanie - technikę trwałego łączenia materiałów wykonanych z metalu lub tworzyw termoplastycznych. Stykające się powierzchnie materiałów są nagrzewane do uzyskania stanu ich uplastycznienia, a następnie dociskane w celu ich złączenia [4]. Stan uplastycznienia materiału można uzyskać doprowadzając energię cieplną z zewnątrz układu lub wytworzyć ją wewnątrz układu. Dzięki dociskowi, części uplastycznione wnikają między siebie i po ochłodzeniu tworzą trwałe połączenia w zgrzewanych miejscach. Proces zgrzewania materiałów ma charakter dyfuzyjny – to znaczy, że jakość złączenia zależy od temperatury, wielkości nacisku oraz czasu ich trwania. Istnieje wiele różnych technik zgrzewania, lecz w pracy przedstawione zostaną metody najbardziej pasujące do tworzenia foliowych siłowników woreczkowych, z przykładami ich realizacji.

2.1. Zgrzewanie oporowe / metodą gorącej elektrody

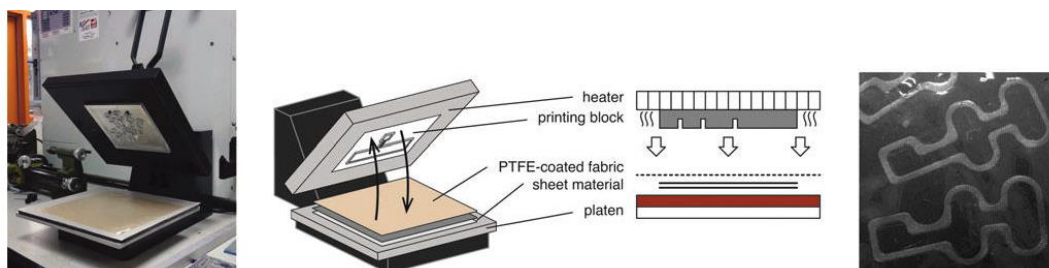
Technika polegająca na dociskaniu zgrzewanych elementów nagrzewaną listwą lub elektrodą do podłoża, czy też dociskaniu materiałów dwoma nagrzewanymi elementami (rys. 2.1). W miejscach ściśnięć powstają jądra grzejne, które po wystygnięciu tworzą trwałe i wytrzymałe połączenie [5]. Złącza pozostają pod naciskiem do momentu ochłodzenia, zanim zostaną wyjęte spod listew.



Rysunek 2.1. Schemat zgrzewania oporowego lub metodą gorącej elektrody.

Metoda ta zapewnia silne łączenia i możliwość wygenerowania dużego nacisku na materiał, ale jest ograniczona co do kształtów, w jakich może być zgrzewany materiał. Czasami zamiast prostych listew stosuje się taśmy albo druty, które pozwalają na bardziej

szczegółowe kształty. Klasycznym przykładem urządzenia zgrzewania oporowego jest zgrzewarka do folii w postaci gilotyny. W przypadku produkcji foliowych robotów miękkich, zastosowanie zgrzewania oporowego zostało przedstawione w maszynie na rysunku 2.2.



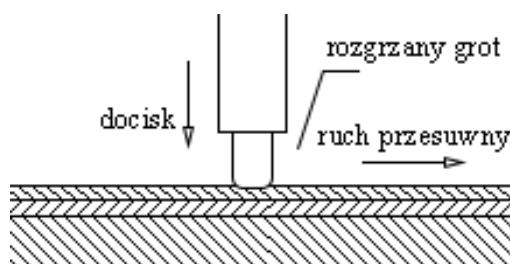
Rysunek 2.2. Przykład maszyny zgrzewania oporowego.

Źródło: “Pouch Motors: Printable Soft Actuators Integrated with Computational Design Applications” [2].

Postać siłownika uzyskiwana jest poprzez ukształtowanie nagrzanego bloku, który naciska na materiał. Folie termoplastyczną zazwyczaj pokrywa się dodatkową warstwą zabezpieczającą przed przywieraniem uplastycznionego materiału do nagrzaných listew – najczęściej wykorzystuje się włókno szklane pokryte PTFE (Politetrafluoroetylen), na który potocznie przyjęło się mówić jako teflon. Zgrzewanie oporowe daje silne i wytrzymałe wiązania folii, ale wymaga fizycznego ukształtowania nagrzanego elementu, co może prowadzić do małej precyzji kształtu zgrzewania i być czasochłonnym procesem przy prototypowaniu i produkcji.

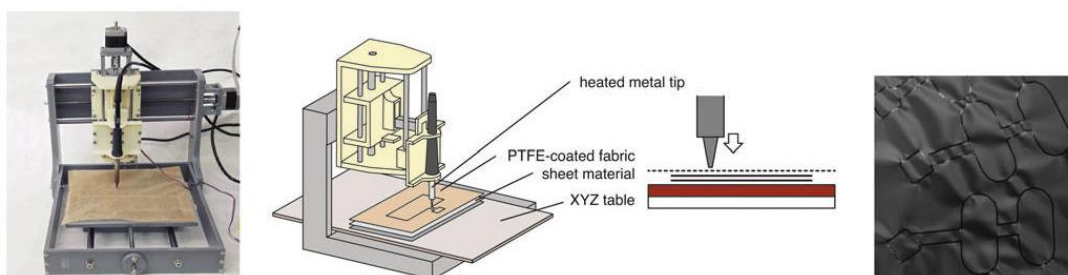
2.2. Zgrzewanie gorącym grotem przesuwным

Technika zgrzewania gorącym grotem przesuwным polega na uplastycznieniu elementów łączonych poprzez kontakt z gorącym grotem, dociskany i przesuwany po zgrzewanych tworzywach według ustalonego kształtu (rys. 2.3).



Rysunek 2.3. Schemat zgrzewania gorącym grotem przesuwным.

Podobnie jak w metodzie zgrzewania oporowego, zaleca się używanie dodatkowej warstwy zabezpieczającej przed przywieraniem uplastycznionego materiału. Do tego rodzaju zgrzewania najczęściej wykorzystuje się maszyny sterowane numerycznie CNC, potrafiące połączyć proces zgrzewania z generowaniem ruchu grotu. Przykład takiego urządzenia przedstawiony jest na rysunku 2.4.



Rysunek 2.4. Przykład maszyny zgrzewania gorącym grotem przesuwным.

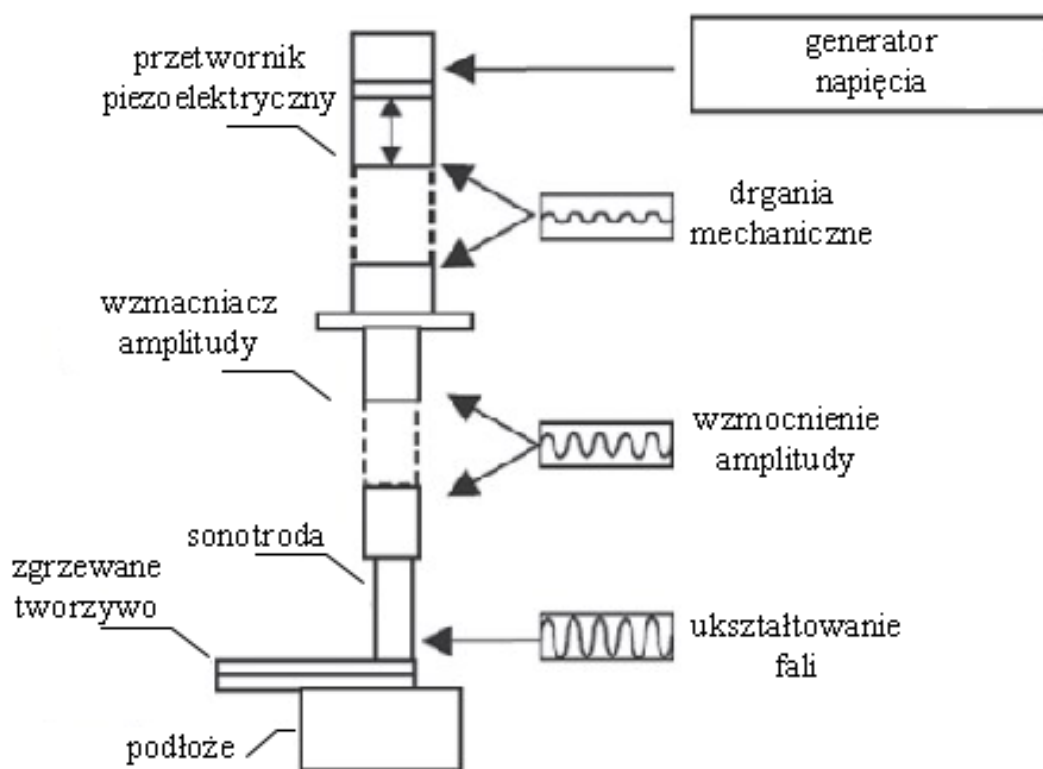
Źródło: "Pouch Motors: Printable Soft Actuators Integrated with Computational Design Applications" [2].

Urządzenie składa się z zestawu napędów elektrycznych, pozwalających na generowanie precyzyjnego ruchu w osiach XYZ, zmieniając położenie rozgrzanego grotu względem stołu roboczego maszyny. Na maszynie przedstawionej powyżej, rolę elementu zgrzewającego folię odgrywa lutownica kolbowa umocowana na ruchomym wózku jednej z głównych osi ruchu. Wszystkie elementy urządzenia podłączone są do systemu sterującego wyposażonego w zaprogramowany mikrokomputer, zarządzający całym procesem zgrzewania. Trajektoria ruchu projektowana jest komputerowo, a następnie tłumaczona na język zrozumiały dla maszyny.

Maszyny korzystające z tej techniki pozwalają na tworzenie bardziej skomplikowanych kształtów zgrzein oraz nie wymagają fizycznej modyfikacji maszyny pod względem zgrzewanego kształtu. Pozwala również na o wiele większą precyzję kształtu zgrzewania, gdyż ruch i parametry są kontrolowane komputerowo i udostępnione dla operatora maszyny. Wadą takiego rozwiązania jest zgrzewanie odcinkowe, które może powodować nierównomierne zgrzewanie kształtu wynikające ze zgrubień materiału. Wpływ ma również nierówność i złe wypoziomowanie stołu roboczego maszyny względem przesuwanego grotu.

2.3. Zgrzewanie ultradźwiękowe

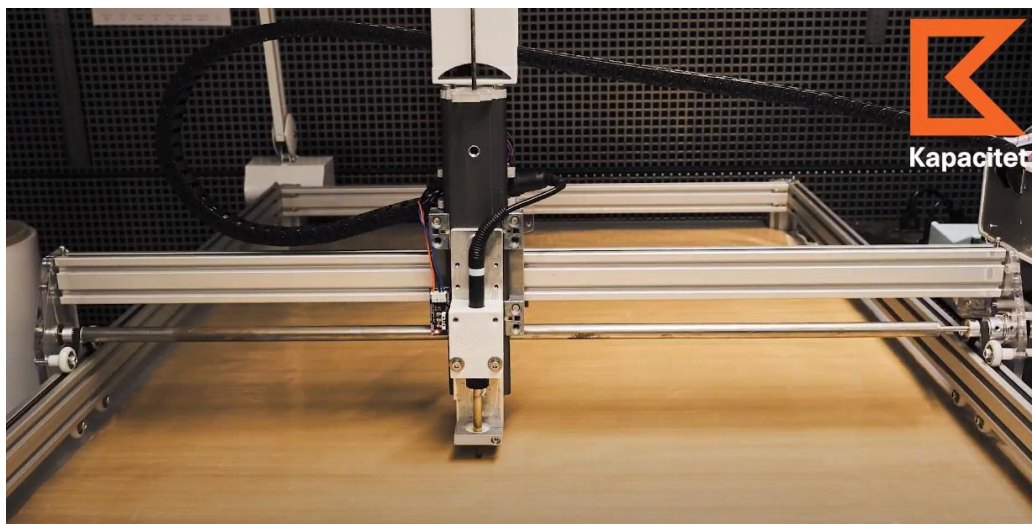
Polega na wprowadzeniu cząsteczek materiału w silne drgania i wywołaniu tarcia międzycząsteczkowego, dzięki czemu wytwarzana jest energia cieplna potrzebna do uplastycznienia materiału [6][7]. Wykorzystywane ultradźwięki są falami dźwiękowymi niesłyszalnymi dla ucha ludzkiego o częstotliwości pomiędzy 20 kHz, a 1 GHz. Na rysunku 2.5 przedstawiono typowy schemat budowy generatora ultradźwięków wykorzystywanego do zgrzewania materiałów.



Rysunek 2.5. Schemat budowy generatora ultradźwięków.

Źródło: "Handbook of Plastics Joining (Second Edition)" [7].

Generatory ultradźwięków budowane są z przetworników piezoelektrycznych, które potrafią zamieniać impulsy napięciowe na drgania mechaniczne. Drgania mechaniczne odbierane są przez falowód ze wzmacniaczem amplitudowym i przekazywane do sonotrody, która kształtuje fale i dociska zgrzewany materiał. Przykład maszyny CNC wykorzystującego ten rodzaj zgrzewania jest przedstawione na rysunku 2.6.



Rysunek 2.6. Maszyna CNC firmy Kapacitet korzystająca ze zgrzewania ultradźwiękowego.

Źródło: www.youtube.com/watch?v=KKEZ3mBz4cU

Maszyna z rysunku 2.6 również korzysta z technologii CNC, która steruje położeniem sonotrody względem stołu roboczego maszyny. W porównaniu do maszyn zgrzewających gorącym grotem przesuwным można stwierdzić, że urządzenia różnią się tylko sposobem doprowadzenia ciepła do materiału. Jednak zgrzewanie ultradźwiękiem oferuje krótsze czasy zgrzewania, brak termicznych uszkodzeń wokół obszaru zgrzewania, wysoką wydajność i większą powtarzalność. Dodatkowo dzięki temu, że narzędzie zgrzewalnicze się nie nagrzewa, można je szybko wymienić i niweluje ryzyko zranienia operatora przez gorące części maszyny. Aktualnie w przemyśle, technika zgrzewania ultradźwiękami staje się coraz bardziej popularna i powoli zastępuje inne pochodne techniki.

2.4. Porównanie technik zgrzewania

Wybór odpowiedniej techniki może znacząco wpłynąć na jakość oraz produktywność zgrzewania. Pewne cechy technik mogą być bardziej zalecane, w zależności od wykorzystania maszyny oraz właściwości zgrzewanego tworzywa. Zgrzewanie oporowe pozwala na generowanie największego nacisku w porównaniu do innych przedstawionych metod. Cecha ta jest pożądana przy zgrzewaniu grubych folii, gdzie duży nacisk na materiałach zagwarantuje stworzenie mocnych wiązań. Technika gorącego grotu jest łatwa w implementacji i tania w eksploatacji. Mimo tych pozytywnych cech, sposób doprowadzania ciepła i mniejszy, nierównomierny nacisk

powoduje częstą losowość w jakości zgrzewania. Zgrzewanie ultradźwiękami potrafi kompensować tę przypadłość i zapewnić największą regularność wyników zgrzewania. W produkcji siłowników woreczkowych ważną cechą jest powtarzalność i precyzja zgrzewania, dlatego wykorzystanie ultradźwięków jest zdecydowanie lepszym, ale droższym rozwiązaniem do ich produkcji. Mimo to, naprawa uszkodzonego generatora ultradźwięków może być o wiele bardziej kosztowna, niż w przypadku wymiany prostej grzałki grotu. Dlatego też, podejmując decyzję o tworzeniu maszyny korzystającej z wybranej techniki należy przemyśleć do jakich zastosowań będą przeznaczone jej produkty, czy też opłacalne jest akceptowanie pewnej losowości jakości zgrzein wynikającej z wybranej techniki zgrzewania.

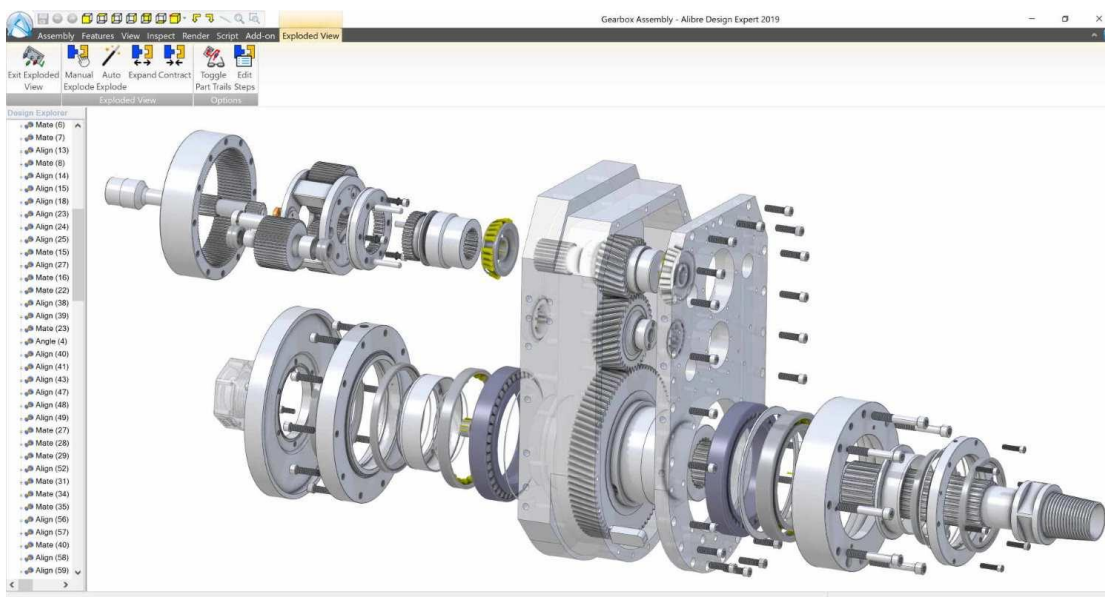
3. Programowanie maszyn CNC i budowa drukarek 3D

Maszyny CNC (ang. *Computerized Numerical Control*), czyli komputerowo sterowane urządzenia numeryczne są coraz częściej spotykanym typem urządzeń w dzisiejszym przemyśle. Sterowanie maszyną odbywa się za pomocą mikrokomputera zintegrowanego z urządzeniem, który może być interaktywnie programowany przez operatora w celu zaplanowania produkcji. Za maszyny CNC uważa się wszelkiego rodzaju obrabiarki (tokarki, frezarki, elektronarzędzia) oraz maszyny wydruku przestrzennego (drukarki 3D) [8]. Ich rozpowszechnienie zawdzięczają dzięki dużej powtarzalności efektów pracy, szybkiemu przebiegowi produkcyjnemu i dużej precyzji obróbki. Dzięki zintegrowanemu komputerowi wykonują z góry narzuconą przez operatora pracę, a kontrola nad całym procesem obróbki jest w pełni zautomatyzowana [9]. Takie rozwiązanie pozwala na zniwelowanie błędów pracy manualnej człowieka, tym bardziej przy produkcjach, w których dużą rolę odgrywa precyzja i szybkość pracy. Podstawowy proces obróbki i programowania maszyn CNC obejmuje następujące etapy:

- Stworzenie modelu CAD,
- Konwersja pliku CAD w programie CAM,
- Przygotowanie maszyny CNC,
- Wykonanie operacji obróbki.

3.1. Oprogramowanie CAD/CAM

Termin CAD odnosi się do projektowania wspomaganego komputerowo (ang. *Computer Aided Design*), które w dzisiejszym przemyśle odgrywa bardzo ważną rolę przy wszelkiego rodzaju projektowaniu i prototypowaniu. Przed rozwojem technologii komputerowej, wszelkie projektowanie było wykonywane na papierze za pomocą rysunku technicznego, na podstawie którego operator maszyny w odpowiedni sposób obrabiał materiał. W dzisiejszych czasach częściej spotyka się projekty wykonywane w oprogramowaniu komputerowym, w tym też projekty wytworów maszyn CNC. Przed obróbką detalu projektant modeluje obiekt w programach typu CAD, który chce wytworzyć, tworząc jego model geometryczny [10]. Przykład takiego projektu komputerowego, pokazano na złożonym modelu skrzyni biegów w oprogramowaniu CAD na rysunku 3.1.



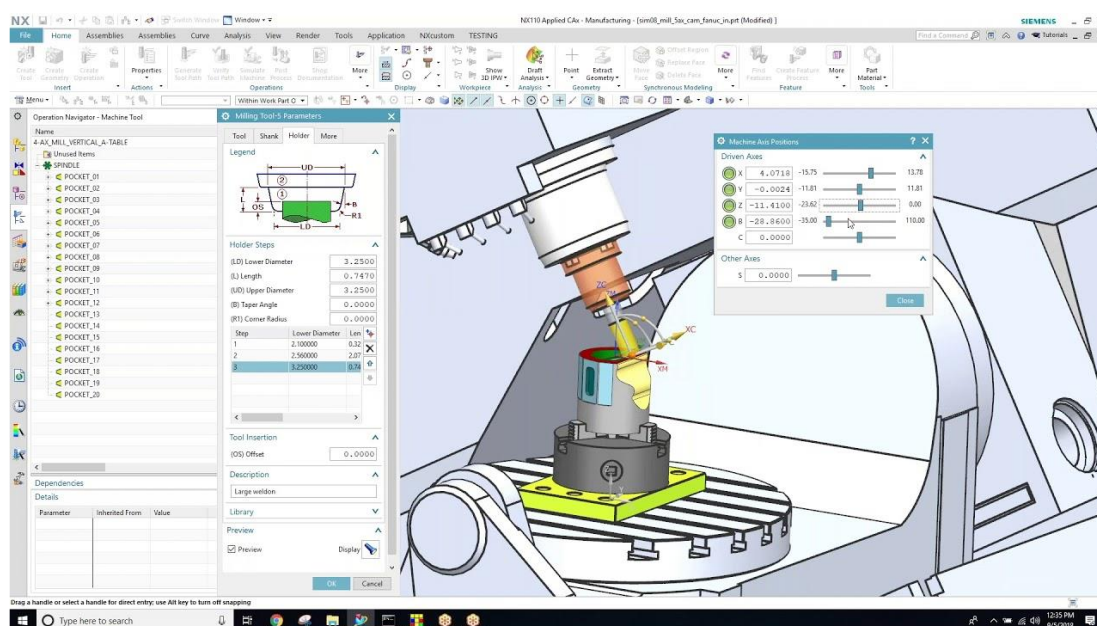
Rysunek 3.1. Przykład projektu skrzyni biegów w programie CAD „Alibre”.

Źródło: <https://www.alibre.com>

Projektowanie obiektu metodą komputerową pozwala na produkcję z bardzo dużą dokładnością, której człowiek podczas pracy manualnej nie mógłby uzyskać. Każdy element takiego projektu można wytworzyć osobno, a dzięki dużej precyzji maszyn CNC, gwarantują one kompatybilność wszystkich obrobionych elementów, podobnie jak w stworzonym komputerowo modelu.

Jednak samo posiadanie modelu nie pozwoli na bezpośrednią interakcję z urządzeniem. Stworzony model musi być przetłumaczony na język znany mikrokomputerowi zintegrowanemu z maszyną [10]. Do tego celu służy oprogramowanie CAM (Komputerowe wspomaganie wytwarzania, ang. *Computer Aided Manufacturing*), które integruje etapy projektowania i wytwarzania produktów maszyn CNC. Oprogramowanie CAM ma za zadanie wygenerowanie kodu maszynowego zwanego G-code, w oparciu o dostarczony do oprogramowania model CAD i dodatkowe parametry obróbki wprowadzone w oprogramowaniu. Zapewnia również dostęp do podstawowych informacji na temat maszyny, dostępnych narzędzi i przewidywanych parametrów pracy. Środowisko programu CAM będzie się różnić w zależności od maszyny, dla której jest ono przeznaczone. Każdy typ urządzenia przyjmuje inne parametry obróbki, wpływając na finalny program wyznaczania ścieżki ruchu i kontroli efektora maszyny. Oprogramowanie wspierające wydruk przestrzenny nie będzie posiadać interpretacji parametrów frezowania, takich jak prędkość i szerokość skrawania obrotowym wiertłem. Ruch efektora maszyny musi być zaplanowany z uwzględnieniem tego jak on wpływa na

proces obróbki detalu. Inne rezultaty programu CAM uzyska się dla frezowania, inne dla spawania, a inne dla drukarek 3D. Oprogramowanie musi mieć konkretną informację, dla jakiego typu urządzenia musi stworzyć program i zaprojektować trajektorię ruchu narzędzia. Dzisiejsze programy oferują także symulację procesu obróbki detali. Standardem staje się również łączenie programów CAD i CAM w jeden w pełni funkcjonalny program, dążąc do pełnej uniwersalności i automatyzacji procesu produkcyjnego. Przykład oprogramowania CAM z symulacją obróbki obiektu pokazano na rysunku 3.2.



Rysunek 3.2. Przykład oprogramowania CAM z symulacją dla frezarek „NX CAM”.

Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=j01OI08tMKQ>

Wszystkie informacje pobrane z geometrii modelu wraz z wprowadzonymi parametrami obróbki, tłumaczone są przez program CAM na wspomniany język programowania G-code (inaczej RS-274), który jest najbardziej powszechnym językiem programowania urządzeń sterowanych numerycznie. Język G-code mówi bezpośrednio maszynie o tym, jakie zadanie ma wykonać za pomocą pojedynczego polecenia wysyłanego do mikrokomputera. Ciąg takich instrukcji tworzy zwarty program, wykonywany przez maszynę linia po linii. Może on być pisany odręcznie w edytorach tekstu, wprowadzany pojedynczo na panelu operatorskim urządzenia lub wygenerowany programem typu CAM. Składnie pojedynczej instrukcji można porównać do wywoływania funkcji i podawania jej z góry narzuconych parametrów (rys. 3.3). Dla

przykładu, przesunięcie elementu wykonawczego maszyny oprócz wywołania komendy wymaga podania parametrów przesunięcia osi oraz prędkość, z jaką efektor ma być przesunięty.

```
3G28 ; Ustaw na pozycji bazowej  
4G1 Z15 F100 ; Przesun się w osi Z o 15 mm z prędkością 15 steps/s  
5M107 ; Turn off fan  
6G1 F50 X1 Y1 E1 ; Przesun się w osi Z o 15 mm z prędkością 50 steps/s
```

Rysunek 3.3. Przykład fragmentu programu G-code.

Długi ciąg tych instrukcji tworzy spójny program, który wysyłany jest linia po linii do mikrokomputera w zrozumiałym dla niego języku. Maszyna powinna posiadać interpretację komend pozwalających sterować każdym elementem składającym się na maszynę CNC.

3.2. Oprogramowanie sprzętowe maszyn CNC

Mając stworzony model w oprogramowaniu CAD, który został zredefiniowany na język zrozumiały dla maszyny w programie CAM, kompletny program wysyłany jest do mikrokomputera w celu jego wyegzekwowania. Jednak urządzenie musi posiadać swoje własne oprogramowanie, które zapewni właściwą interpretację przesłanego kodu, obsługę urządzeń peryferyjnych i elektroniki. Mówi się o tym, jako o oprogramowaniu wbudowanym (ang. *firmware*), które będąc umieszczonym na stałe w pamięci urządzenia zapewnia działanie jego podstawowych funkcji [11]. Firmware znajduje się w pamięciach nieulotnych, a urządzenie ma do niego dostęp w każdej chwili pracy. Zajmuje się ono zarządzaniem wszystkimi wydarzeniami w czasie rzeczywistym i posiada niezbędne informacje do obsługi zadań. Dla przykładu maszyn CNC, oprogramowanie wbudowane posiada informację na temat komend języka G-code, na podstawie których potrafi rozszyfrować polecenie i wysterować odpowiednie podzespoły zespólone z urządzeniem. Firmware jest niezbędną częścią wszystkich dzisiejszych przyrządów elektronicznych i znajduje się praktycznie w każdym urządzeniu użytku codziennego. Producenci zazwyczaj tworzą dedykowane oprogramowania do swoich produktów, aby wykorzystać w pełni ich możliwości. W przypadku mniejszych projektów, korzysta się z gotowych rozwiązań na konkretne platformy mikrokomputerowe. Oprogramowanie firmware maszyn CNC musi zapewnić obsługę podstawowych podzespołów składających się na w pełni funkcjonalną maszynę.

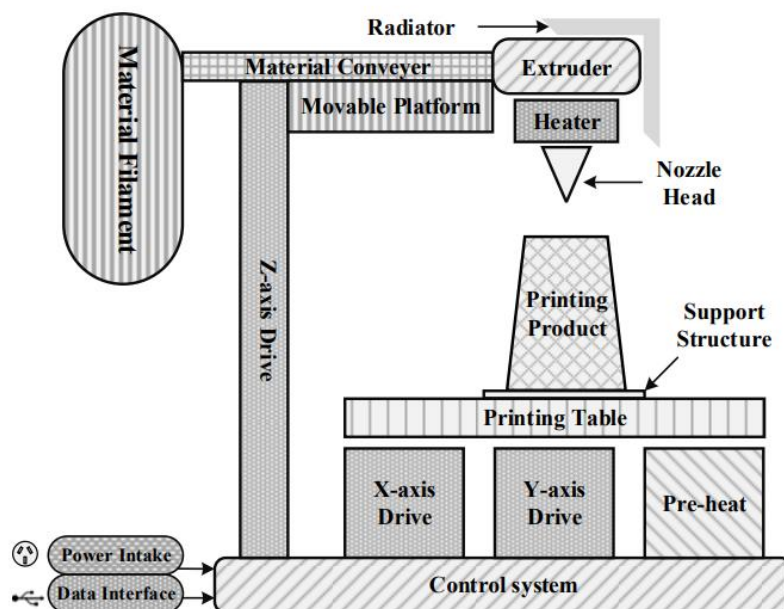
3.3. Drukarki 3D w świecie maszyn CNC

Drukarki 3D są względnie nowymi urządzeniami w branży produkcyjnej i często można usłyszeć opinię, że nie są one postrzegane jako tradycyjne maszyny CNC. Jednak podobnie jak maszyny CNC, większość z nich działa w oparciu o program napisany w języku G-code, tworzony i modyfikowany przy pomocy systemów CAM, a obiekty projektowane są w programach typu CAD. Termin CNC został głównie przypisany przez przemysł frezarkom i tokarkom CNC ze względu na ich duży udział w produkcji. Maszyny CNC nie służą tylko i wyłącznie do wytworu i obróbki detali. Można spotkać się z urządzeniami typu szlifierki, giętarki, spawarki, czy też narzędzia pomiarowe CNC. Wszystkie te maszyny łączy wspólna koncepcja produkcyjna, w której dąży się do pełnej automatyzacji procesu za pomocą komputerowego wspomaganie urządzeń sterowanych numerycznie.

Główna różnica między drukarkami 3D, a klasycznymi maszynami produkcyjnymi obróbki CNC jest sposób, w jaki tworzony jest obiekt. Drukarki 3D korzystają z koncepcji produkcji addytywnej (AM, ang. *Additive Manufacturing*), który odnosi się do procesu, w którym obiekt jest tworzony dodając materiał warstwa po warstwie [12]. Tradycyjne maszyny CNC korzystają z koncepcji produkcji subtraktywnej (SM, ang. *Subtractive Manufacturing*), która w procesie produkcyjnym usuwa materiał, aby stworzyć obiekt. Produkcja addytywna jest formalną nazwą tego, co kiedyś w przemyśle nazywano mówić Rapid Prototyping (RP, z ang. szybkie prototypowanie), a dzisiaj przyjęto to nazywać wydrukiem 3D. Termin RP odnosi się do procesu, w którym przed finalnym wydaniem lub masową produkcją obiektu docelowego, tworzono jego szybki prototyp lub model bazowy, z którego powstawały kolejne modele, a w końcu produkt końcowy. Wraz z biegiem czasu, znaczna poprawa jakości produkcji addytywnej sprawiła, że coraz częściej wynikiem produkcji AM/RP jest produkt końcowy, a wiele części jest bezpośrednio produkowanych w tych maszynach. Z tego powodu przestało się przyjmować wydruk trójwymiarowy jako prototypowanie, a stworzyło nowy nurt w gałęzi produkcyjnej.

3.4. Budowa drukarek 3D

Poznanie budowy urządzenia jakim jest drukarka 3D pozwala na zrozumienie podstawowej konstrukcji i zasad działania większości maszyn CNC. Budowę klasycznej drukarki 3D można porównać do 3-osiowego robota kartezjańskiego (znanego, jako robota liniowego), którego trzy główne osie ruchu są osiami liniowymi, ustawionymi względem siebie pod kątem prostym [14]. Efektor robota porusza się po przestrzeni trójwymiarowej względem stołu roboczego, dzięki skoordynowanej pracy zespołów napędowych każdej z trzech osi. Schemat poglądowy budowy typowej drukarki 3D przedstawiono na rysunku 3.4.



Rysunek 3.4. Schemat budowy klasycznej drukarki 3D.

Źródło: *Analysis of Energy Utilization in 3D Printing Processes* [15].

Ogólną kontrolę nad maszyną sprawuje system wbudowany, najczęściej mikrokontroler lub inne systemy dedykowane do danego rozwiązania [15]. System kontrolny może być zasilany z takiego samego źródła energii, co reszta urządzeń maszyny, jednak zazwyczaj stosuje się oddzielne zasilanie elektroniki. Zapobiega to pojawieniu się wyższych mocy mogących uszkodzić układ sterowania. System kontrolny ma również możliwość sprawowania pełnej władzy nad jego peryferiami. Operator urządzenia wykorzystuje interfejsy komunikacyjne do monitorowania stanu maszyny i egzekwowania poleceń. Zadania operatora mogą być wysyłane w czasie rzeczywistym

lub zapisane w pamięci urządzenia i wyegzekwowane w dowolnej chwili. Za generowanie ruchu głowicy w liniowych osiach zazwyczaj odpowiada silnik krokowy wraz ze sterownikiem [16]. Do podawania tworzywa głowicy zazwyczaj korzysta się z wytłaczarki zrobionej z zestawu tego samego silnika krokowego i sterownika, którego używa się w sterowaniu ruchem głowicy. Drukarka posiada dwa elementy grzewcze – wspomnianą głowicę, która topi i rozprowadza materiał po stole oraz nagrzewany stół. Nagrzewanie stołu jest wykorzystywane podczas wydruku, gdyż podnosi on jakość finalnego produktu dzięki utrzymaniu ciepła wytłoczonego tworzywa, które zapobiega jego wypaczeniu. Porównując ogólną budowę klasycznej drukarki 3D do klasycznych maszyn obróbki CNC, w większości przypadków różnią się one tylko i wyłącznie typem elementu odpowiadającego za tworzenie produktu końcowego.

3.5. Drukarka 3D w koncepcji zgrzewarki CNC

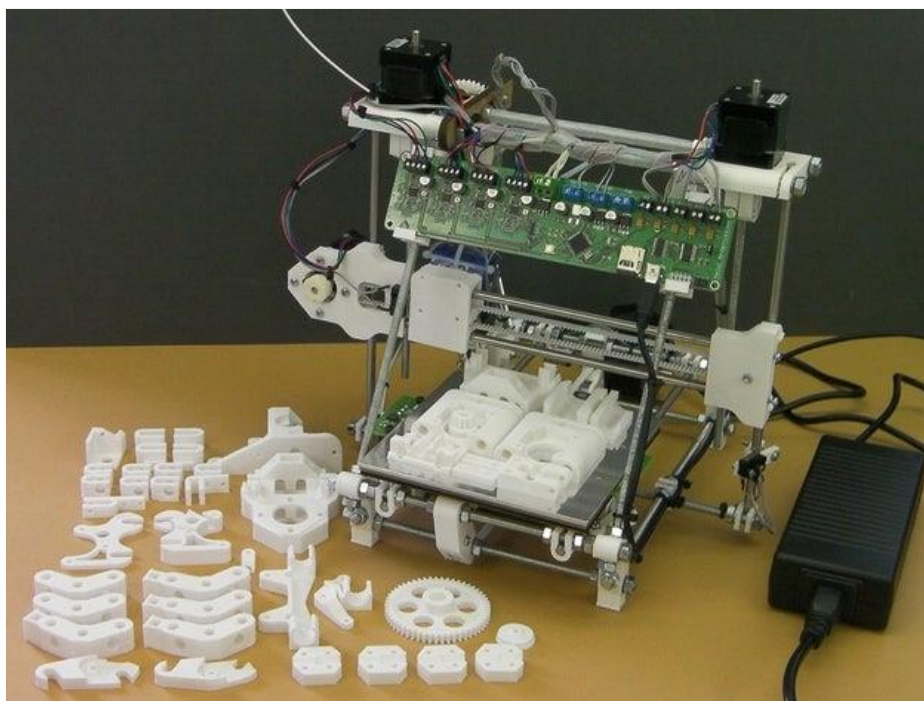
Koncepcja zgrzewarki CNC jest bardzo podobna do drukarek 3D z punktu widzenia ich budowy i oprogramowania. Obie maszyny przyjmują parametr temperaturowy narzędzia, a zaplanowana trajektoria jest prostopadła do stołu roboczego maszyny. Możliwość przesunięcia pionowej osi ruchu pozwala na generowanie nacisku na zgrzewane tworzywa. Model zgrzewania można zaprojektować w tym samym programie CAD, a parametry oprogramowania CAM drukarek 3D pozwalają na kontrole wszystkich elementów zgrzewarki. Różnicą pomiędzy koncepcjami maszyn jest ekstruzja tworzyw sztucznych drukarek 3D. Oprogramowanie CAM dla drukarek 3D w zamyśle ma tworzenie programu dla wytapiania tworzywa na stół roboczy maszyny. Parametry tego procesu dobrane w oprogramowaniu mogą negatywnie wpłynąć na proces zgrzewania. Dla przykładu, wytapianie plastiku uwzględnia średnicę dyszy, która ją topi. Tworzywo potrzebuje pewnego odstępu od stołu roboczego, aby pogodzić jego wykładanie z lekkim naciskiem dyszy głowicy na stół roboczy. System CAM drukarek 3D generując program uwzględnia tę zależność, dodając dodatkowe przesunięcie pionowej osi Z w wykonywanym programie. Generowanie programu zgrzewania poprzez CAM drukarek 3D bez znajomości podstawowych parametrów drukarek i komend języka G-code może utrudnić pracę maszyny jako zgrzewarka.

Powyższe podobieństwa sprawiają, że drukarka 3D nadaje się do modyfikacji w celu stworzenia zgrzewarki folii CNC, pod warunkiem znajomości pierwotnej maszyny, z której ją wykonano.

4. Elementy maszyny i użyte oprogramowanie

4.1. Drukarka RepRapPro Huxley

Podstawą maszyny stworzonej w pracy jest drukarka 3D „RepRapPro Huxley”, pokazana na rysunku 4.1. Wywodzi się ona z projektu RepRap, który był inicjatywą stworzenia ogólnodostępnego urządzenia mogącego replikować swoje własne części. Projekt miał na celu doprowadzenie do zmian standardów przemysłu i pozwolić na szeroką produkcję maszyn minimalnym kosztem.



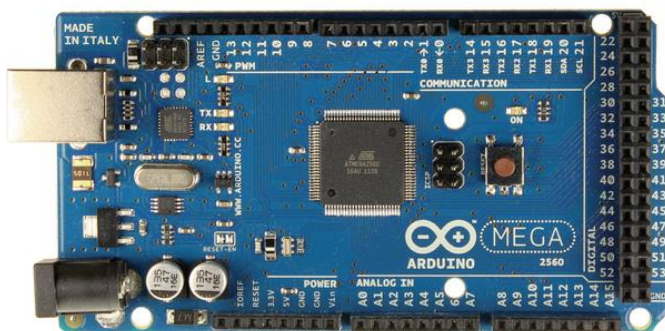
Rysunek 4.1. Drukarka RepRapPro Huxley.

Źródło: https://reprap.org/wiki/RepRapPro_Huxley.

Projekt zakładał również szybkie spopularyzowanie idei, które miało napędzić prototypowanie innych typów maszyn na podstawie pierwotnej maszyny. Posiadacze drukarki mieli mieć możliwość ściągania schematów innych urządzeń i produkować je bez udziału innych maszyn przemysłowych. Projekt osiągnął sukces, a na podstawie idei otwartej budowy maszyn do dziś powstaje wiele projektów urządzeń typu frezarki, wycinarki, czy też zgrzewarki. Bazowa konstrukcja oraz części drukarki zazwyczaj pozostają takie same, a w projektach innego rodzaju maszyn zmieniany jest efektor oraz modyfikowane jest oprogramowanie wbudowane.

4.2. Mikrokontroler Arduino

Mikrokontrolerem użytym w pracy jest Arduino Mega 2560 opartym na procesorze Atmega2560 (rys. 4.2). Jest to częsty wybór w przypadku budowy drukarek 3D i robotów, gdyż mimo niskiego kosztu zakupu posiada on dużą ilość portów I/O (wejścia/wyjścia), pamięci flash, RAM oraz wyposażony jest w popularne interfejsy komunikacyjne. Jest również wyposażony w Bootloader – jest to część oprogramowania mikrokontrolera zapisana w pamięci nieulotnej, która pozwala na aktualizację oprogramowania wbudowanego bez konieczności użycia zewnętrznego programatora.



Rysunek 4.2. Płytki Arduino Mega 2560.

Źródło: <http://www.robotpark.com/Arduino-MEGA-2560-En>

Podstawowym zadaniem mikrokontrolera jest odbieranie, analizowanie i przesyłanie informacji między podłączonymi urządzeniami, zgodnie ze stworzonym programem. Jest on swoistym sercem maszyny, które kontroluje i zarządza obsługą jego peryferii w czasie rzeczywistym. Ogólna dostępność i niski koszt w połączeniu z dużą wydajnością sprawiła, że powstała duża ilość dostępnych systemów CAM i Firmware współpracujących z platformą Arduino.

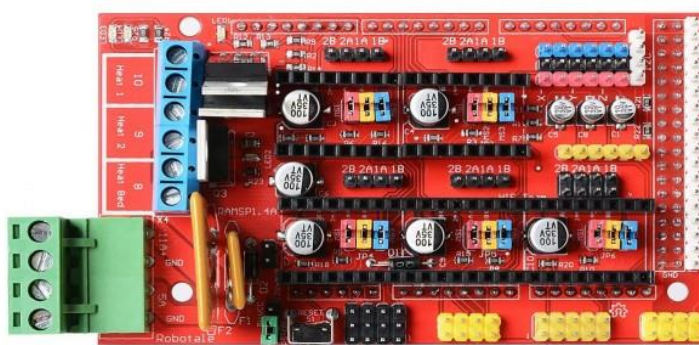
4.3. Oprogramowanie wbudowane Marlin

Oprogramowaniem wbudowanym użytym w pracy jest Marlin Firmware 2.0 napisanym w języku programowania C++. Marlin opiera się na licencji typu open-source (z ang. otwarty kod źródłowy), w którym właściciel praw autorskich pozwala użytkownikom do dowolnej modyfikacji programu. Oprogramowanie powstało z myślą o projekcie RepRap z użyciem mikrokontrolera Arduino, ale wraz ze wzrostem

popularności oprogramowanie Marlin znalazło również swoje tłumaczenia na platformach takich jak STM32 czy Teensy. Głównym zadaniem tego oprogramowania jest tłumaczenie języka zapisu poleceń G-code na wykonywanie konkretnych poleceń maszyny. W oprogramowaniu wbudowanym znajdują się także wszystkie algorytmy sterowania czy też informacje o rozkładzie połączeń podzespołów z płytką mikrokontrolera.

4.4. Sterownik drukarki RAMPS 1.4

Sterownik drukarki RAMPS 1.4 służy do podłączenia wszystkich podzespołów potrzebnych do uruchomienia drukarki 3D (rys. 4.3). Układ jest kompatybilny z mikrokontrolerem Arduino Mega 2560 i jest stosowany jako układ rozszerzający płytkę w formie nakładki (ang. *shield*).



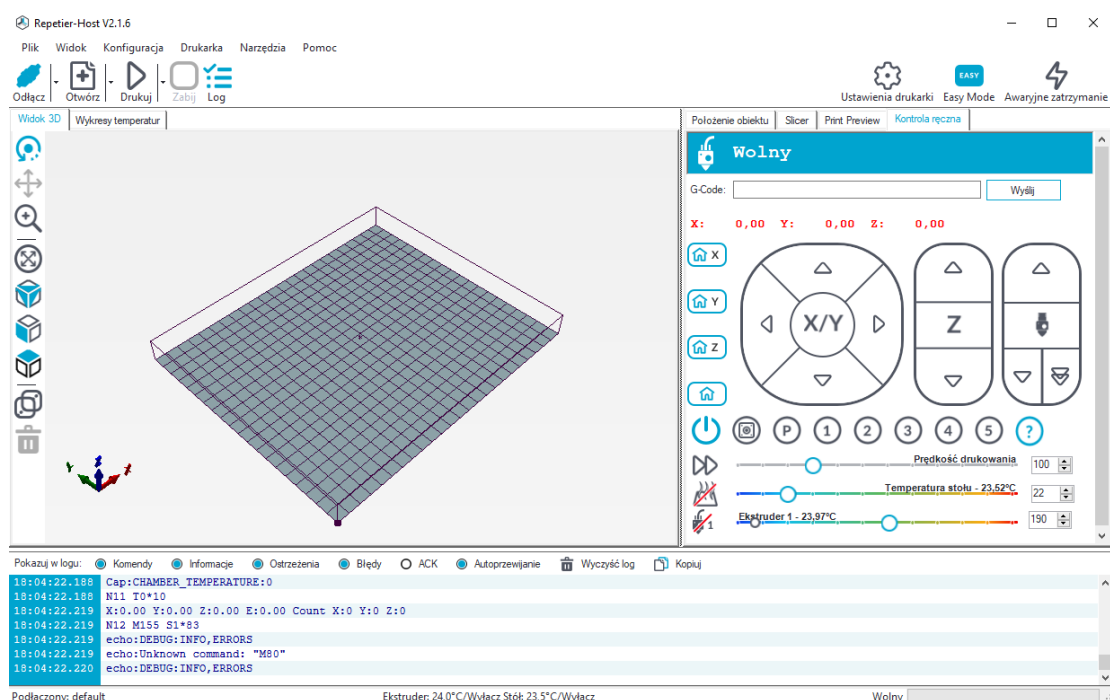
Rysunek 4.3. Płytkę sterownika drukarki RAMPS 1.4.

Źródło: https://www.twinschip.com/RAMPS1.4_Board

Przede wszystkim, płytka pozwala na bezpośrednie podłączenie silników krokowych wraz z ich sterownikami A4988. Oprócz tego, posiada wyprowadzenia dla zasilania układów, czujników temperatur, czujników krańcowych, grzałek, wentylatorów czy też wyświetlacza LCD. Płytkę, jako rozszerzenie mikrokontrolera Arduino wyposaża go w dodatkową elektronikę – dla przykładu tranzystory MOSFET większej mocy do sterowania zasilaniem grzałek lub rezystory podciągające do czujników temperatur.

4.5. Oprogramowanie CAM Repetier-Host

Repetier-Host jest programem komputerowym typu CAM służącym do sprawowania kontroli nad maszyną w czasie rzeczywistym (rys. 4.4). Komunikacja komputera z maszyną odbywa się przez port szeregowy mikrokontrolera, wykorzystując układ scalony UART. Oprócz możliwości kontroli, pozwala również na wyegzekwowanie programu napisanego w języku G-code oraz jego dowolną modyfikację.



Rysunek 4.4. Interfejs oprogramowania Repetier-Host.

W programie można zmieniać i testować takie parametry jak prędkość poruszania się głowicy, jej temperatura czy rozmiary przestrzeni roboczej. Program pozwala na wgranie dowolnego pliku modelu trójwymiarowego CAD, na podstawie którego wygeneruje program w języku G-code wraz z narzuconymi w programie parametrami. Program pozwala również na podgląd modelu w stosunku do przestrzeni roboczej oraz wyświetla informacje o aktualnym stanie maszyny. Posiada również konsolę, która informuje o wykonywanych poleceniach i ewentualnych błędach w ich egzekwowaniu.

4.6. Pozostałe elementy drukarki w projekcie

- **Sterownik silnika krokowego A4988**

Zadaniem tego sterownika jest kontrola pojedynczego silnika krokowego maszyny (rys. 4.5). Z jego pomocą, mikrokontroler w łatwy sposób może zarządzić kierunkiem i prędkością obrotu silnika oraz wykonywać krok wału ze zwiększoną rozdzielczością.



Rysunek 4.5. Silnik krokowy A4988.

Źródło: https://www.twinschip.com/A4988_Stepper_Motor_Driver

Dla przykładu, jeżeli wybrany silnik krokowy posiada rozdzielczość 200 kroków na cały obrót wału, wybranie w sterowniku rozdzielczości ćwierć krokowej spowoduje, że silnik sterowany przez układ będzie w stanie wykonywać 800 mikrokroków na cały obrót. Osiąga się to poprzez zasilanie cewek prądem o pośrednim natężeniu. Sterownik jest bezpośrednio podłączony z dwoma zestawami uzwojeń stojana i generuje impulsy napięciowe sterujące wałem silnika. Większa częstotliwość impulsów zwiększa prędkość obrotową silnika. Dodatkowo, posiada on regulowane ograniczenie prądowe, zabezpieczenie nadprądowe, termiczne oraz pięć różnych rozdzielczości kroków.

- **Silniki krokowe NEMA 17 JK42HS34-0404**

Silniki NEMA 17 firmy JK są silnikami krokowymi bipolarnymi, o rozdzielczości 200 kroków na pełen obrót wału. Zasilane napięciem 12 V, w warunkach pracy nominalnej pojedyncza cewka pobiera prąd o wartości 400 mA. Wał silnika wykonany jest magnesu trwałego, który porusza się między biegunami stojana, naprzemiennie zasilanymi przez układ sterujący. Pojedynczy krok silnika oznacza przejście wału przez długość pojedynczego żłobka, który w silnikach NEMA 17 odpowiada obrotowi wału o 1.8 stopnia. Krok jest wykonywany poprzez podanie pojedynczego impulsu napięciowego na pojedynczą parę cewek stojana. Silnik NEMA 17 posiada dwa zestawy uzwojeń zasilanych naprzemiennie. Zaciski uzwojeń są wyprowadzone na zewnątrz układu i służą one jednocześnie do zasilania i sterowania silnikiem.

- **Lutownica kolbowa oporowa 100W 230V**

Lutownica w projekcie służy jako element zgrzewający folie. Założeniem było stworzenie układu pozwalającego podłączyć dowolną lutownicę kolbową oporową zasilaną z napięcia sieciowego 230V. Zamiast głowicy drukarki powstanie ruchome mocowanie pozwalające umieścić lutownicę prostopadle do stołu roboczego. Sama lutownica powinna mieć odpowiednio dużą moc zdolną wygenerować zadaną temperaturę, a mocowanie powinno zabezpieczać resztę układu przed jej rozgrzaniem częściami.

- **Termistor HT-NTC100K NTC B3950**

Czujnikiem temperatury lutownicy użytym w projekcie jest termistor z rodziny NTC (ujemny współczynnik temperaturowy) o rezystancji 100 kΩ w temperaturze 25°C. Termistory są czujnikami temperatury, które zmieniają rezystancję elementu półprzewodnikowego w funkcji temperatury, na którą są wystawione. Ujemny współczynnik temperaturowy oznacza, że rezystancja półprzewodnika maleje wraz ze wzrostem temperatury, dzięki czemu można wyznaczyć aktualną temperaturę na termistorze. Użyty termistor pozwala na pomiar temperatury w zakresie od -50°C do +350 °C. Termistory NTC zazwyczaj podłącza się do układu pomiarowego z rezystorami podciągającymi (ang. pull-up resistor), aby wyeliminować wpływ zakłóceń otoczenia dla pomiaru przy mniejszych rezystancjach termistora. Współczynnik B3950 mówi o relacji między zmianą temperatury i rezystancji półprzewodnika. Większy współczynnik wskazuje na większą zmienność rezystancji przy stałym wzroście temperatury, co oznacza lepszą czułość czujnika.

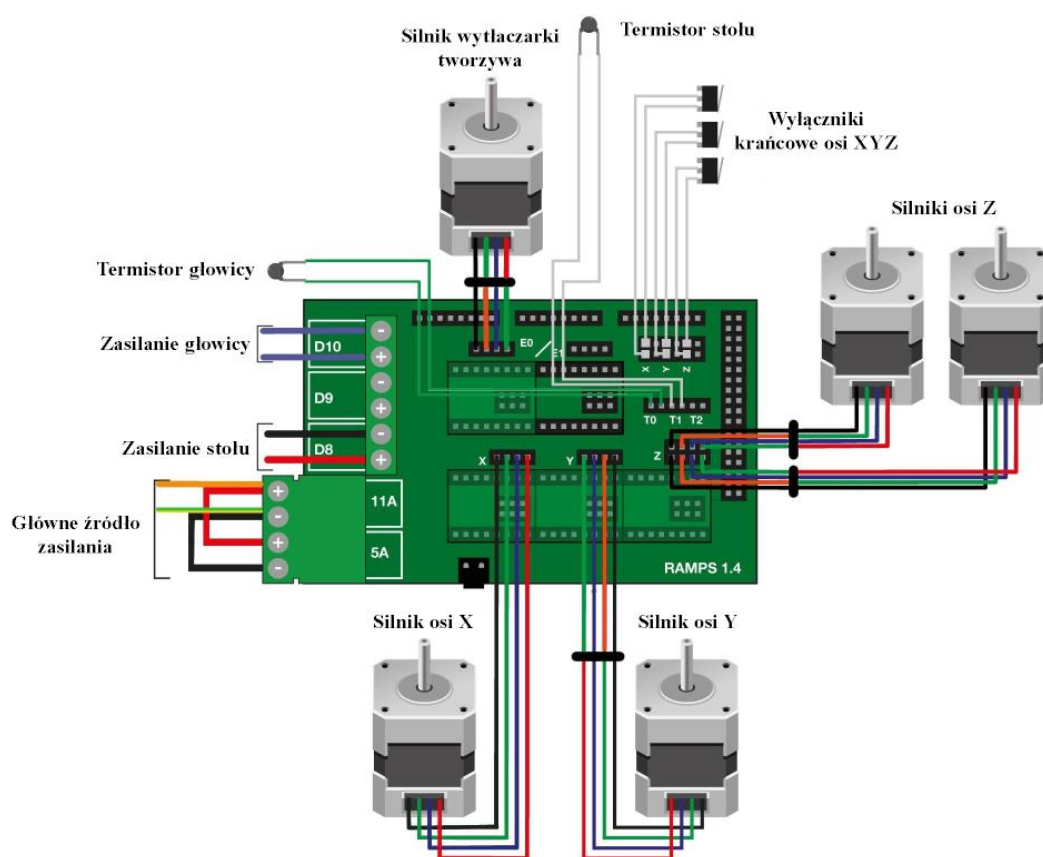
- **Przełącznik Fotek SSR-10 DA 10A DC-AC**

Przełącznik służy w projekcie do sterowania zasilaniem lutownicy, tym samym regulując jej temperaturę. Użyty przełącznik jest przełącznikiem półprzewodnikowym i zmienia stan napięcia przemiennego zacisków AC w zależności od pojawienia się napięcia stałego na zaciskach DC. W porównaniu do przełączników elektromechanicznych, SSR ma szybsze czasy przełączania i dłuższą żywotność, gdyż nie korzysta ze zużywających się elementów mechanicznych do przełączania. Służy również jako separator galwaniczny zasilania lutownicy od mikrokontrolera, gdyż stan wyjścia zasilania zależy bezpośrednio od stanu fotodiody umieszczonej w obwodzie sterującym przełącznika.

5. Budowa maszyny

5.1. Przebudowa drukarki

Proces budowy drukarki 3D RepRapPro Huxley jest w całości przedstawiony na stronie projektu RepRap [17], dlatego też opis budowy zgrzewarki CNC będzie rozpoczynać się od przebudowy złożonej drukarki 3D. Ideowy schemat połączeniowy drukarki (rys. 5.1) korzystającej ze sterownika RAMPS 1.4, pozwoli na zorientowanie się w połączeniach wszystkich elementów ze sterownikiem.



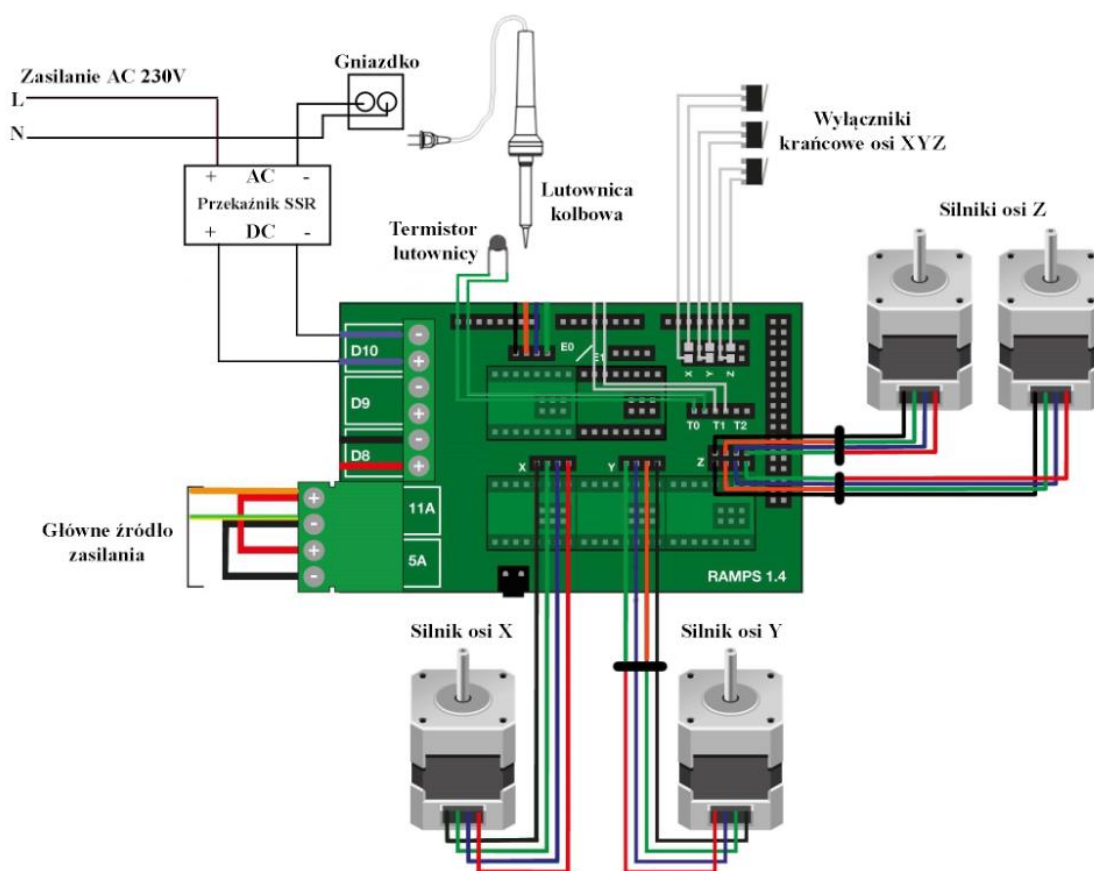
Rysunek 5.1. Schemat połączeniowy klasycznej drukarki 3D sterownika RAMPS 1.4.

Źródło: <https://www.asensar.com/guide/prusai3/how-to-wire-ramps-electronics-prusai3.html>

Powyższy schemat jest standardowym typem połączenia elementów do sterownika RAMPS 1.4, lecz istnieje możliwość zamiany rozłożenia PIN'ów w oprogramowaniu sprzętowym. W pracy założono, że głowica drukarki będzie zastąpiona lutownicą kolbową oporową, podłączoną do napięcia sieciowego i sterowana z mikrokontrolera drukarki. Takie połączenie nie tylko stworzy separację układu

mikrokontrolera od wyższych napięć, ale także pozwoli na korzystanie z lutownicy wyższych mocy. Główny układ zasilania drukarki korzysta z napięcia 12V i ograniczenia prądowego do 11A, dlatego też lutownica pobierająca dużą moc, podłączona do głównego źródła zasilania maszyny mogłaby grozić spalaniem układu przy większych obciążeniach grzałki. Wylączarka drukarki została zdemonstrowana, podobnie odłączone zostało ogrzewanie stołu roboczego – są to zbędne elementy, które nic nie wnoszą do projektu zgrzewarki.

Sterownik RAMPS 1.4 do regulowania temperatury głowicy i stołu wykorzystuje tranzystory MOSFET, które przełączają źródło zasilania grzałki. Dlatego też, w projekcie potrzebny jest dodatkowy element, który pozwoli mikrokontrolerowi na przełączanie zasilania lutownicy. W projekcie użyto przekaźnika półprzewodnikowego o krótkim czasie przełączania i sporym zapasie zabezpieczenia prądowego. Temperatura grotu lutownicy jest pośrednio sczytywana z termistora zaciśniętego na grocie. Wprowadzając te założenia, schemat połączeniowy maszyny pokazano na rysunku 5.2.

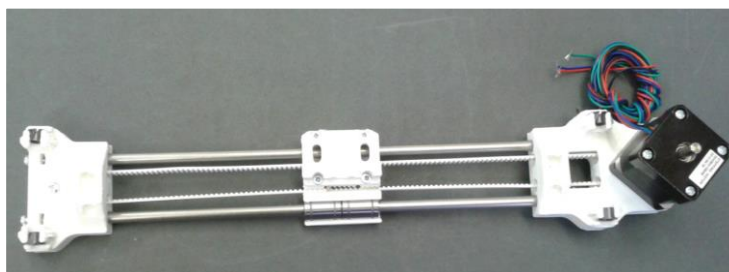


Rysunek 5.2. Zmodyfikowany schemat połączeniowy sterownika RAMPS 1.4.

Źródło: <https://www.asensar.com/guide/prusai3/how-to-wire-ramps-electronics-prusai3.html>

Podłączenie zacisków sterujących przełącznika SSR do zacisków zasilania głowicy pozwala regulatorowi na pośrednie sterowanie stanem przełącznika. Regulator temperatury wypracowuje sygnał kluczujący dla tranzystora MOSFET na płycie sterownika, który bezpośrednio zmienia stan zacisków głowicy. Rozwiązanie to nie wymaga dodatkowej rezystancji ograniczającej prąd, gdyż jest ona uwzględniona w budowie przełącznika.

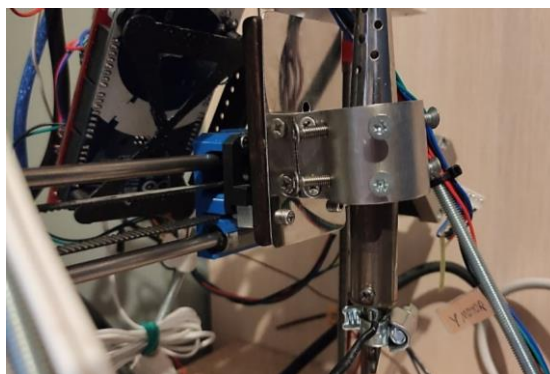
Następnym krokiem było stworzenie mocowania dla lutownicy. W drukarce RepRapPro Huxley głowica drukarki porusza się na wózku umieszczonym na osi ruchu X. Wózek zaczepiony jest na prętach przez łożyska liniowe oraz pasku zębatym, dzięki któremu ruch obrotowy silnika zamieniany jest ruch postępowy wózka (rys. 5.3).



Rysunek 5.3. Wygląd budowy osi X drukarki RepRapPro Huxley.

Źródło: https://reprap.org/wiki/RepRapPro_Huxley_x_axis_assembly

Wózek jest jednym z drukowanych elementów drukarki, dlatego też istnieje możliwość modyfikacji jego modelu CAD czy też w łatwy sposób przewiercić się przez materiał. Tworzywo, z którego wykonany jest wózek ma niską odporność na temperaturę, dlatego należy odizolować nagrzewaną lutownicę od reszty mocowania. Zaproponowane rozwiązanie wykorzystało możliwość przewiercenia się przez tworzywo, umieszczając mocowanie na śrubach z użyciem dodatkowych dystansów zabezpieczając układ przed temperaturą (rys. 5.4).

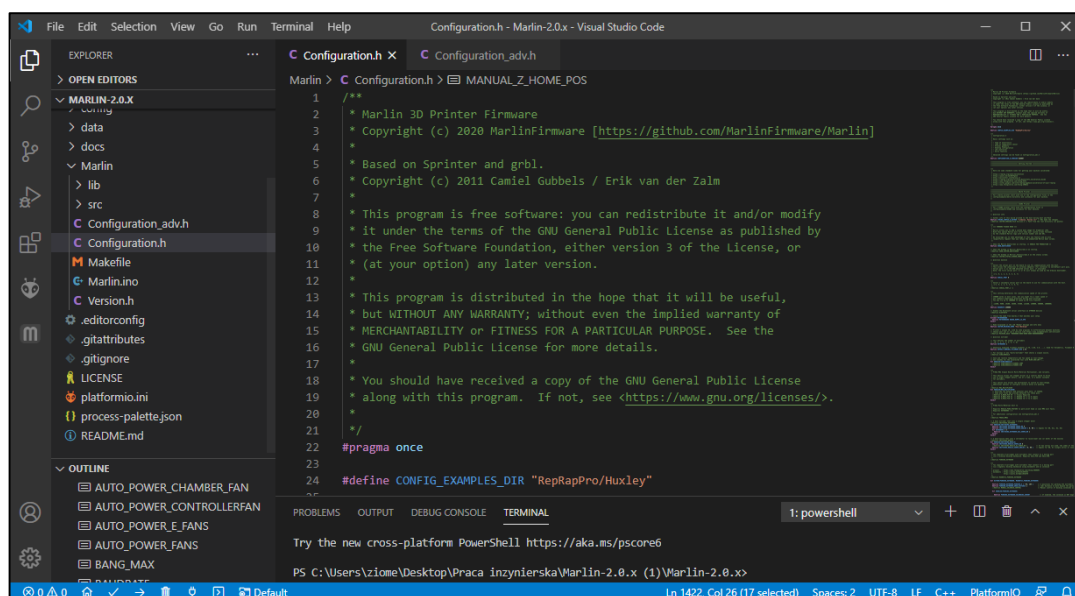


Rysunek 5.4. Mocowanie lutownicy w projekcie maszyny do zgrzewania folii.

Mocowanie na śruby pozwala na montaż lutownicy o dowolnej średnicy kolby i wypoziomowanie grotu względem stołu roboczego. Ogranicza również kontakt reszty elementów z rozgrzaną kolbą. Powietrze jest dobrym izolatorem ciepła, ale dodatkowe użycie ekranu z aluminium oraz dystansów pomogą odizolować ciepło w wyższych temperaturach zgrzewania i dłuższym czasie pracy. W przypadku termistora, metalowa opasa zaciskowa zapewnia mocny ścisk półprzewodnika z grotem, także przy wyższych temperaturach.

5.2. Konfiguracja oprogramowania Marlin

Mając wszystkie elementy podłączone według schematu, następnym krokiem jest wyposażenie mikrokontrolera w oprogramowanie sprzętowe. W pracy zdecydowano się na wspomniany Marlin 2.0 napisany w języku C++, który posiada gotową konfigurację połączeń PIN'ów sterownika RAMPS 1.4 oraz parametrów konstrukcyjnych drukarki RepRapPro Huxley. Główne ustawienia maszyny udostępnione są w dwóch plikach nagłówkowych - *Configuration.h* oraz *Configuration_adv.h*. Konfiguracja oprogramowania w pracy odbywa się w programie Visual Studio Code (rys. 5.5).



Rysunek 5.5. Konfiguracja oprogramowania Marlin w programie Visual Studio Code.

Marlin udostępnia użytkownikom łatwą zmianę podstawowych parametrów maszyny w postaci definicji zmiennych programu. Każda definicja posiada opis w języku angielskim informując, do czego służy i jakie przyjmuje parametry. Na początku

przedstawione zostaną najważniejsze parametry oprogramowania w plikach konfiguracyjnych pozwalające na pierwsze uruchomienie maszyny. Następnie przedstawione zostaną dodatkowe modyfikacje wynikające z poznania odpowiedzi układu na wymuszenie temperatury lutownicy.

5.2.1. Parametry połączenia i konstrukcji maszyny

Poniższe definicje odpowiadają za komunikację komputera z mikrokontrolerem, konfigurację użytych elementów i parametry fizyczne maszyny.

- **Wybór sterownika i modelu maszyny**

Pierwszą definicją jest wybór połączeń płytki sterownika z elementami drukarki – odpowiada za to parametr definicji MOTHERBOARD. Marlin posiada tłumaczenia wielu platform, dlatego też udostępniony jest plik nagłówkowy *boards.h*, który pozwala wybrać gotową konfigurację wraz z rozwiązaniem połączenia elementów. W przypadku pracy wykorzystywany jest sterownik RAMPS 1.4 z zaciskami głowicy używanymi do regulacji temperatury lutownicy. Program interpretuję lutownicę jako głowicę drukarki, dlatego należy wybrać dowolną konfigurację z uwzględnioną głowicą drukarki.

```
131: #ifndef MOTHERBOARD
132:  #define MOTHERBOARD BOARD_RAMPS_14_EFB // wybór sterownika RAMPS 1.4
133: #endif
```

- **Wybór portu szeregowego i prędkość transmisji danych**

Arduino korzysta z interfejsu UART do komunikacji szeregowej z komputerem operatora. Domyślny port komunikacji to port numer 0, ale mikrokontroler wyposażony jest w większą liczbę portów szeregowych, pozwalając na podłączenie innych interfejsów wymiany danych. Domyślna prędkość przesyłu danych to 250000 bit/s, lecz w przypadku zauważenia utraty danych podczas transmisji, należy tą prędkość zmniejszyć.

```
108: #define SERIAL_PORT 0 // wybór portu komunikacyjnego mikrokontrolera „0”
125: #define BAUDRATE 250000 // wybór prędkości transmisji danych 250000 bit/s
```

- **Wybór termistora**

W pliku konfiguracyjnym znajduje się lista najpopularniejszych termistorów dostępnych na rynku. Na podstawie wyboru, program używa parametrów termistora do przeliczenia temperatury w funkcji aktualnej rezystancji półprzewodnika. Rezystor podciągający znajduje się na płycie sterownika RAMPS i trzeba go uwzględnić przy wyborze.

```
384: * 11 : 100k beta 3950 1% thermistor (4.7k pullup)
420: #define TEMP_SENSOR_0 11 // wybór numeru termistora z udostępnionej listy „11”
```

- **Wyłączniki krańcowe**

Wyłączniki krańcowe służą głównie do określenia pozycji bazowej urządzenia. Są też zabezpieczeniem przed uszkodzeniem silników krokowych gdyby napisany program żądał ruchu w stronę spoza obszaru roboczego maszyny. Wyłączniki mogą być wykonane w różnej logice, dlatego należy określić domyślny stan logiczny wyłącznika oraz w którym kierunku osi się znajdują.

```
619: #define USE_XMIN_PLUG // położenie wyłącznika krańcowego osi X w kierunku ujemnym
620: #define USE_YMIN_PLUG // położenie wyłącznika krańcowego osi Y w kierunku ujemny
621: #define USE_ZMIN_PLUG // położenie wyłącznika krańcowego osi Z w kierunku ujemnym
653: #define X_MIN_ENDSTOP_INVERTING false // logika pozytywna wyłącznika X
654: #define Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING false // logika pozytywna wyłącznika Y
655: #define Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING false // logika pozytywna wyłącznika Z
```

- **Wymiary przestrzeni ruchu XYZ**

Wymiary podawane są w milimetrach i stanowią przestrzeń roboczą efektoru maszyny. Na ich podstawie oprogramowanie może stwierdzić, czy aktualnie zarządzany ruch jest możliwy do wykonania. Wyłączniki krańcowe zazwyczaj określają pozycje (0,0,0) efektoru. Podanie ujemnego ograniczenia pozwala na dalszy ruch efektoru mimo załączenia wyłącznika krańcowego – tą zależność wykorzystuje się do poziomowania stołu względem efektoru.

```
1173: #define X_MIN_POS 0 // minimalna wartość wymiaru X przestrzeni roboczej w mm
1174: #define Y_MIN_POS 0 // minimalna wartość wymiaru Y przestrzeni roboczej w mm
1175: #define Z_MIN_POS -1 // minimalna wartość wymiaru Z przestrzeni roboczej w mm
1177: #define X_MAX_POS 220 // maksymalna wartość wymiaru X przestrzeni roboczej w mm
1178: #define Y_MAX_POS 170 // maksymalna wartość wymiaru Y przestrzeni roboczej w mm
1179: #define Z_MAX_POS 20 // maksymalna wartość wymiaru Z przestrzeni roboczej w mm
```


- **Wybór sterownika silników krokowych**

Podobnie jak w przypadku termistora, oprogramowanie wymaga określenia jakiego rodzaju sterownika silników krokowych użyto w maszynie. W przypadku użycia innego sterownika można znaleźć go na udostępnionej liście lub stworzyć własny kod sterownika.

```
677: #define X_DRIVER_TYPE A4988 // wybór sterownika silnika krokowego osi X „A4988”  
678: #define Y_DRIVER_TYPE A4988 // wybór sterownika silnika krokowego osi Y „A4988”  
679: #define Z_DRIVER_TYPE A4988 // wybór sterownika silnika krokowego osi Z „A4988”
```

- **Ustawienia ruchu**

Program wykorzystuje wiedzę o użytych elementach odpowiadających za ruch do obliczenia konkretnej długości pojedynczego kroku. W przypadku projektu użyto pasków oraz kół zębatach o parametrach zalecanych dla drukarki, ale w sytuacji użycia innego zestawu pasa i koła zębatego należy zmienić ich parametry w oprogramowaniu. To samo dotyczy się podziałki pręta osi Z, silników krokowych i jego sterowników.

```
731: #define NEMA17_FULL_STEPS 200.0 // rozdzielczość silników na pełen obrót wału  
732: #define TEMP_XY_MICROSTEPS 16.0 // rozdzielczość mikrokroków sterowników silników  
742: #define XY_PULLEY_PITCH 2.5 // użyty pas zębata o podziałce zębów 2.5 milimetra  
743: #define XY_PULLEY_TEETH 14.0 // użyte koło zębata o 14 zębach  
748: #define Z_RODS_PITCH 0.8 // podziałka pręta osi Z w milimetrach
```

Powyższa konfiguracja Marlina pozwala na pierwsze uruchomienie i sprawdzenie poprawności kinematyki maszyny. Instalacja oprogramowania odbywa się przez port USB mikrokontrolera i nie wymaga zewnętrznego programatora, gdyż użyty mikrokontroler posiada wgrany Bootloader. Oprogramowanie w pracy jest wgrywane za pomocą środowiska programistycznego PlatformIO, jako rozszerzenie do programu Visual Studio Code.

Jeżeli oprogramowanie wgrało się pomyślnie, można przystąpić do sprawdzenia działania urządzenia. Łącząc maszynę z programem Repieter-Host należy określić port szeregowy komputera, z którym podłączony jest mikrokontroler maszyny oraz tą samą prędkość przesyłu danych, ustawianą w konfiguracji Marlina. Po udanym podłączeniu użytkownik powinien uzyskać dostęp do panelu kontroli ręcznej maszyny. W tym panelu użytkownik może zmieniać położenie lutownicy w dowolnej z osi oraz umieścić ją w pozycji bazowej wynikającej z umiejscowienia wyłączników krańcowych. Zakładka posiada również możliwość wysyłania pojedynczych poleceń G-code. Można również

ręcznie wymusić temperaturę lutownicy i monitorować jej aktualny odczyt na wykresie temperatury.

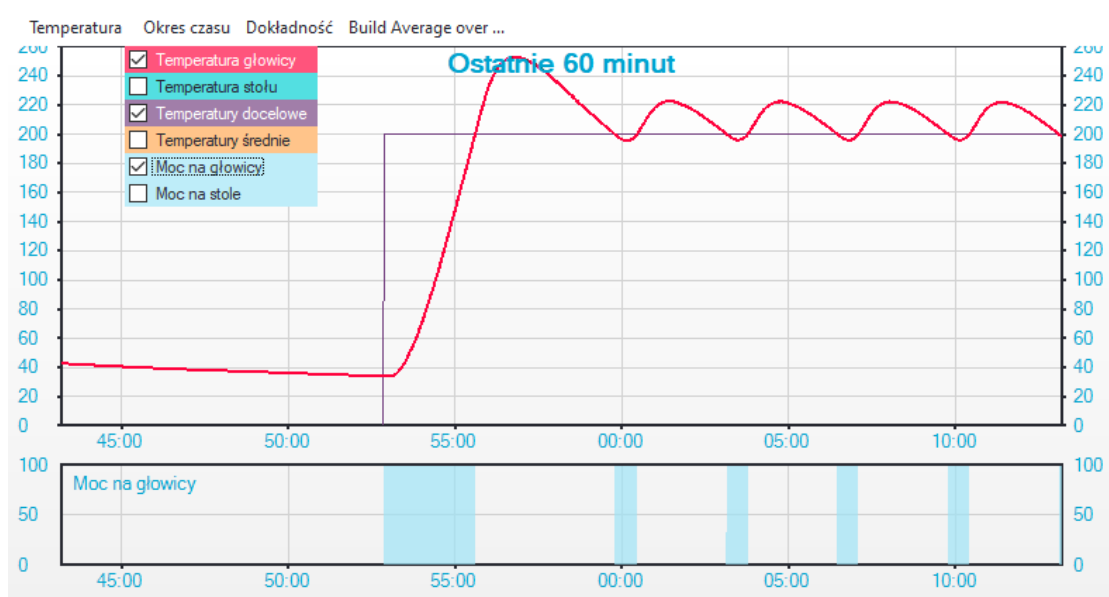
5.2.2. Parametry temperaturowe (lutownicy)

W przypadku zmiany lutownicy używanej do zgrzewania folii, należy zmienić poniższe parametry w oprogramowaniu Marlin. Wynikają one ściśle z charakteru urządzenia, dlatego też brak zmiany tych parametrów może powodować błędną pracę maszyny i grozić jej uszkodzeniem.

- **Regulator PID temperatury lutownicy**

Jeżeli termistor zaciśnięty na grocie nierozgrzanej lutownicy prawidłowo odczytuje temperaturę otoczenia, można przystąpić do konfiguracji regulatora temperatury. Domyślnie Marlin działa w trybie regulatora dwupołożeniowego, który w przypadku grzałek nie działa najskuteczniej. Jednak odpowiedź tego regulatora pozwala na wyznaczenie nastaw regulatora PID. Regulator PID w oprogramowaniu Marlin jest zapisany w postaci równania niezależnych parametrów o nastawach regulatora - K_p , K_i i K_d . Wypracowuje on na swoim wyjściu sygnał PWM o częstotliwości 7 Hertzów dla sterowania elementem kluczującym grzałki. Jeżeli obiekt sterowania wymaga większej częstotliwości sygnału PWM, można ją zmienić w oprogramowaniu Marlin. W przypadku tej maszyny, regulator wypracowuje sekwencje przełączeń przełącznika, która pośrednio wskazuje na aktualną moc lutownicy.

W panelu kontroli ręcznej należy wpisać zadaną temperaturę oraz ją zatwierdzić, klikając na ikonkę główicy. Uruchomi to pracę regulatora dwupołożeniowego lutownicy wraz z rysowaniem wykresu temperatury, dzięki czemu można sprawdzić czy lutownica wraz z termistorem prawidłowo działa (rys. 5.6) . Dodatkowo, aktualny stan przełącznika pokazuje dioda LED umieszczona na jej obudowie.



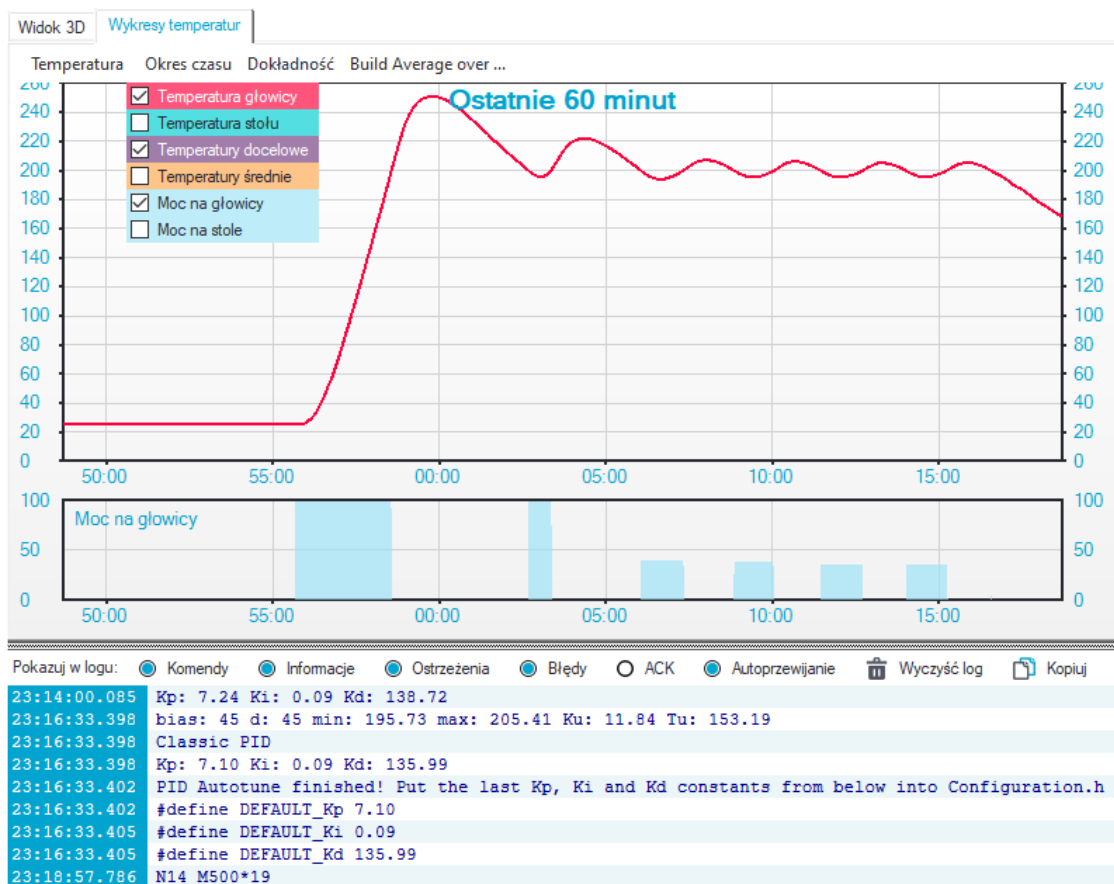
Rysunek 5.6. Odpowiedź jednostkowa układu z regulatorem dwupołożeniowym.

Można stwierdzić, że użyta lutownica jest elementem o dużej inercji, która jest powodem długiego czasu narastania i opadania temperatury. Występują również duże przeregulowania, wynikające z charakteru obiektu sterowania. Lutownica potrafi się nagrzać, ale nie posiada mechanizmu odprowadzającego temperaturę. Na podstawie odpowiedzi oraz oscylacji wokół zadanej temperatury można wyznaczyć optymalne nastawy regulatora. Marlin posiada opcje auto strojenia regulatora PID, wykorzystującą algorytm Zieglera-Nicholsa do obliczania nastaw. Wraz z każdą oscylacją wokół zadanej temperatury, program testuje nowe nastawy i je koryguje.

Proces auto strojenia maszyny uruchamia się komendą G-code M303, którą można wpisać ręcznie w programie Repetier-Host.

M303 C<count> E<index> S<temp>

Liczba przy parametrze C oznacza liczbę oscylacji wokół zadanej temperatury. Liczba przy parametrze E oznacza indeks elementu, którego auto strojenie dotyczy. Liczba S wyznacza zadaną temperaturę strojenia. Dla zbudowanej maszyny przyjęto 5 cykli o temperaturze 200°C. Wynik auto strojenia pokazano na rysunku 5.7.



Rysunek 5.7. Wynik auto strojenia PID oraz wykres temperatury i mocy w trakcie auto strojenia PID.

Nastawy należy zatwierdzić, wpisując je do pamięci EEPROM mikrokontrolera komendą `M500`. Jednak przy każdorazowym aktualizowaniu oprogramowania wbudowanego, część wewnętrznej pamięci jest nadpisywana, w tym też nastawy regulatora. Dlatego też wynik należy wpisać do kodu oprogramowania. Za nastawy regulatora odpowiadają definicje:

```

498: #define DEFAULT_Kp 7.1
499: #define DEFAULT_Ki 0.09
500: #define DEFAULT_Kd 133.99

```

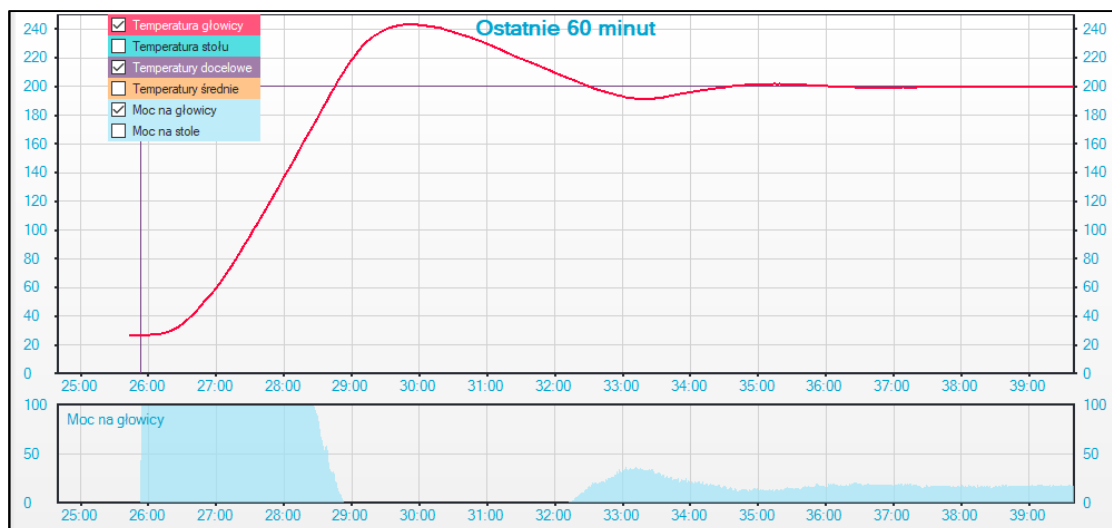
Regulator PID uruchamia się w oprogramowaniu, deklarując poniższą definicję:

```

480: #define PIDTEMP

```

Ponowne wgranie oprogramowania spowoduje, że następne wymuszenie temperatury lutownicy będzie realizowane przez regulator PID z wyznaczonymi nastawami. Efekt regulacji pokazany jest na rysunku 5.8.



Rysunek 5.8. Efekt regulacji PID po auto strojeniu nastaw regulatora.

Po około 7 minutach, lutownica utrzymuje temperaturę bardzo zbliżoną do zadanej, a regulacja przebiegła pomyślnie. Jednak komentarz wymaga duża wartość części różniczkującej D, gdyż jest ona kilkanaście razy większa od części proporcjonalnej P. Część różniczkująca w regulatorach działa jak hamulec lub tłumik, – gdy regulator wymaga nagłej zmiany wartości, część różniczkująca pomaga ustawić kierunek regulacji. W przypadku grzałek, duża wartość części różniczkującej jest zalecana, gdyż pomaga szybko zareagować na przekroczenie temperatury zadanej. Posiadanie wykresu regulacji pozwala na ustawienie parametrów histerezowych i zabezpieczających procesu grzania. Poniższe parametry zmienione w oprogramowaniu dotyczą bezpieczeństwa urządzenia.

- **Histeresa regulacji temperatury**

Histeresa określa zakres temperatury, który jest przyjmowany za wystarczający do rozpoczęcia pracy. Zegar czasu pozwoli na uruchomienie programu dopiero po utrzymaniu się temperatury przez określony czas.

```
441: #define TEMP_RESIDENCY_TIME 50 //ustalenie czasu dla zegara
442: #define TEMP_WINDOW 3 //okno temperatury odliczania czasu zegara
443: #define TEMP_HYSTERESIS 3 //histeresa temperatury
```

- **Ograniczenia temperaturowe**

Ograniczenia temperaturowe jest ważnym elementem zabezpieczającym maszynę. Dolne ograniczenie pozwala chronić przed fałszywymi pomiarami termistora i

może wskazywać na jego uszkodzenie. Górne ograniczenie chroni przed przegrzaniem lutownicy.

```
451: #define HEATER_0_MINTEMP 5 // temp. minimalna grzałki
464: #define HEATER_0_MAXTEMP 400 // temp. maksymalna grzałki
```

Dodatkowym zabezpieczeniem jest wyłączenie urządzenia przy braku wzrostu temperatury w przypadku jej wymuszenia. Definicje tego zabezpieczenia znajdują się w pliku **Configuration_adv.h** i wskazują na wzrost i czas oczekiwania wzrostu temperatury. Parametry tych definicji powinny wynikać z opóźnienia rozpoczęcia grzania na wymuszenie temperatury.

```
209: #define WATCH_TEMP_PERIOD 60 // czas wyłączenia przy braku wzrostu temperatury
210: #define WATCH_TEMP_INCREASE 4 // minimalny wzrost temperatury
```

Podobnym parametrem jest zakres i czas, w którym temperatura lutownicy musi się znajdować podczas pracy. Jeżeli temperatura spadnie poniżej wskazanej histerezy, program wyłączy urządzenie. Ten parametr znajduje również znajduje się w pliku **Configuration_adv.h**.

```
189: #define THERMAL_PROTECTION_PERIOD 30 // czas poza zakresem pracy
190: #define THERMAL_PROTECTION_HYSTERESIS 10 // histereza temp. czasu
```

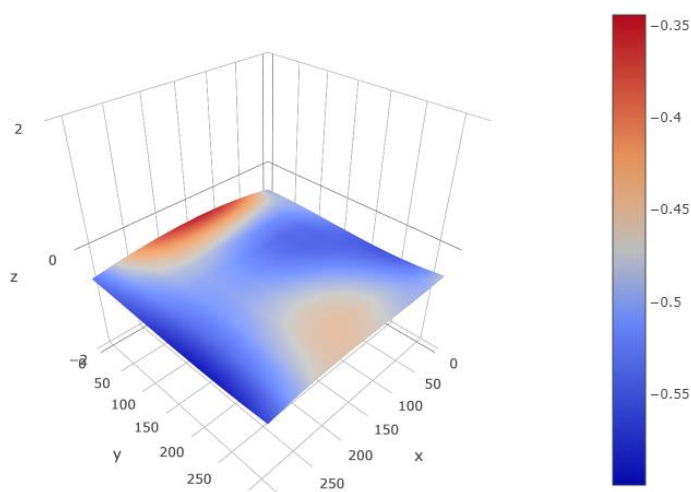
5.3. Poziomowanie stołu roboczego

Wypoziomowanie stołu roboczego jest jednym z najważniejszych aspektów zgrzewania folii. Proces zgrzewania wymaga nie tylko temperatury, ale także równomiernego docisku ze strony elementu zgrzewającego. Dlatego też, poruszająca się lutownica po przestrzeni roboczej musi się znajdować w odpowiedniej wysokości w stosunku do materiału. Nacisk na materiał nie może być za duży, ale także grot nie może być zbyt wysoko. Lutownica powinna być zamontowana prostopadle do stołu, aby punkt kontaktu podczas poruszania się pozostał taki sam we wszystkich kierunkach. Maszyna nie posiada żadnego mechanizmu pozwalającego na automatyczne wypoziomowanie, więc jakość zgrzewania będzie silnie zależeć od przyjętego punktu startowego pionowej osi Z. Trzeba tutaj zaznaczyć, że generowanie nacisku w maszynie jest możliwe ze względu na mocowanie stołu roboczego. Stół roboczy umieszczony jest na śrubach z nakrętkami, pomiędzy którymi znajdują się sprężyny wypychające stół do góry.

Sprężyny są elastyczne i przyjmują siłę nacisku do pewnej wartości, bez odkształcania mocowania lutownicy. Dzięki temu, istnieje możliwość wytworzenia równomiernego nacisku wywołując program na pewnym ujemnym poziomie pionowej osi ruchu Z.

Pierwszym z zaproponowanych sposobów poziomowania jest ręczna zmiana wysokości stołu roboczego oraz wyłącznika krańcowego osi Z. Dokręcając śruby ze sprężynami można zmienić wysokość stołu, a ich wzajemny poziom wkręcenia ustawia poziom stołu. Zmieniając wysokość wyłącznika krańcowego ustawia się punkt bazowy osi Z, dlatego też wyłącznik należy umieścić tak, aby przy bazowaniu maszyny grot lutownicy znajdował się blisko podłoża. W poziomowaniu manualnym stosuje się kawałek cienkiego materiału o grubości docelowej zgrzewanego materiału, który umieszcza się pomiędzy grotem lutownicy a stołem. Przeciągając materiał pod grotem sprawdza się nacisk w danym punkcie. Czynność powtarza się dla każdego z boków stołu tak, aby uzyskać równomierny nacisk na całym stole. Ta metoda jest bardzo niedokładna, dlatego też często stosuje się dodatkowe układy czujników do poziomowania podłoża.

Druga metoda polega na podejściu wirtualnym do poziomowania. Nigdy nie jest tak, że podłoże którego się używa jest idealnie płaskie i równe w każdym miejscu. Dlatego każda metoda opierająca się na bezwzględnej wysokości względem podłoża będzie obarczona błędem. W środowisku użytkowników drukarek 3D pojawiło się rozwiązanie nazywające się *Mesh Bed Leveling*. Polega ono na zmianie wysokości efektora w trakcie wykonywania programu, ówczesnie zbierając dane o nierówności tego podłoża. Wizualizacja metody przedstawiona jest na rysunku 5.9.



Rysunek 5.9. Wizualizacja metody *Mesh Bed Leveling*.

Źródło: https://www.reddit.com/r/klippers/comments/c4umgb/mesh_bed_leveling_not_working_properly/

Marlin jest wyposażony w algorytm tego typu poziomowania i pozwala na zebranie danych o podłożu wywołując komendę G-code. Pozwoli to na równomierne rozłożenie nacisku w każdym punkcie, mimo nierówności i niedokładnego manualnego wypoziomowania.

Kroki postępowania są podobne jak w przypadku pierwszej metody, z tą różnicą że zmiana poziomu stołu nie będzie widoczna fizycznie, tylko w trakcie wykonywania programu. Najpierw należy uruchomić opcję Mesh Bed Levelingu w oprogramowaniu Marlin, tworząc w pliku *Configuration.h* poniższą definicję:

```
1284: #define MESH_BED_LEVELING
```

Stworzenie definicji pozwala na użycie komendy G-code odpowiadającej za poziomowanie:

```
G29 S<0|1|2|3|4|5> [X<count>] [Y<count>] [Z<linear>];
```

Wartości parametru S określają różne funkcje komendy:

- S0: Pokaż aktualnie zebrane wartości.
- S1: Rozpocznij poziomowanie.
- S2: Przejdź do następnego punktu w trakcie poziomowania.
- S3: Zmień ręcznie pojedynczy punkt XYZ. (See also M421.).
- S4: Ustaw przesunięcie osi Z.
- S5: Zresetuj i wyłącz opcje poziomowania.

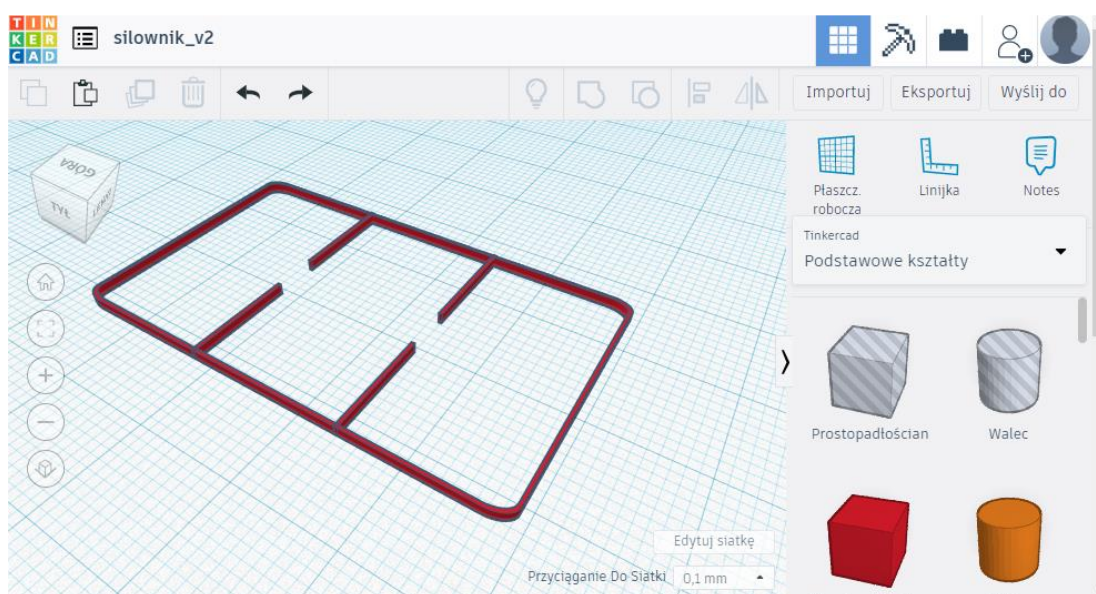
Wysłanie komendy **G29 S1** włączonej maszynie rozpocznie proces poziomowania. Domyślnie komenda pozwoli na zebranie 9 punktów po całej powierzchni stołu, których nacisk grotu względem punktu stołu dostosowuje się ręcznie zmieniając wysokość osi Z w panelu kontroli programu Repetier-Host. Pojedynczy punkt zatwierdza się komendą **G29 S2**. Po zebraniu wszystkich punktów, wynik poziomowania należy zapisać w pamięci EEPROM komendą **M500**.

Aby uaktywnić Mesh Bed Leveling podczas programu zgrzewania, należy zmodyfikować program G-code wysyłany do mikrokontrolera. Dodatkowo, należy usunąć jakiegokolwiek przesunięcia osi Z w pierwszych liniach kodu programu, które mogłyby wskazywać na źle dobrane parametry w programie CAM. Po komendzie **G28**, która odpowiada za bazowanie osi, należy dodać 2 linijki kodu:

```
G29;  
M420 S1 Z0;
```

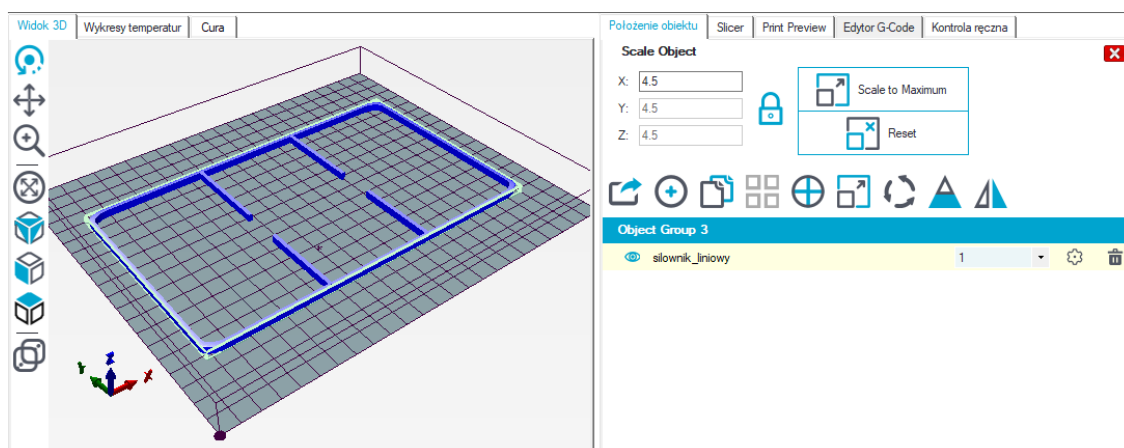

6. Przykładowy proces zgrzewania foliowego siłownika

Skonfigurowana maszyna jest gotowa do zgrzewania folii termoplastycznej. Zgrzewanie maszyny będzie pokazane na przykładzie foliowego siłownika woreczkowego. Najpierw należy stworzyć model siłownika w dowolnym programie CAD, na przykład w programie dostępnym na przeglądarki internetowej TinkerCAD, pokazanym na rysunku 6.1. W celu prezentacji zostanie stworzony model siłownika liniowego z trzema komorami.



Rysunek 6.1. Prosty model siłownika woreczkowego w programie TinkerCAD.

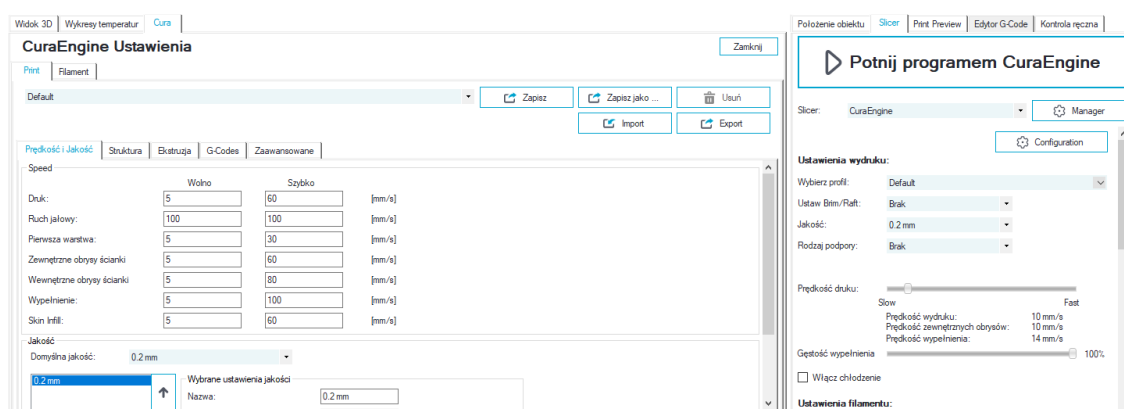
Grot lutownicy będzie się poruszać względem podłoża po obwodzie modelu CAD. Jeżeli chodzi o grubość linii modelu, najlepiej jest ją dobrać jak najcieńszą. Jeżeli dobrana grubość będzie ponad szerokością pojedynczej linii przyjętej w programie, program przejdzie po zewnętrznych liniach obwodu, a resztę długości wypełni dobranym w programie wzorem. Spowoduje to ponowne zgrzewanie tych samych miejsc, które może skutkować nieszczelnością woreczka. Wygenerowany model CAD można wgrać do programu Repetier-Host w zakładce „Położenie obiektu” (rys. 6.2).



Rysunek 6.2. Widok zakładki „Polożenie obiektu” programu Repetier-Host.

W zakładce możliwy jest podgląd i modyfikacja położenia stworzonego obiektu 3D w stosunku do przyjętej przestrzeni roboczej maszyny. Można również skalować, przenosić i obracać model. Ważne jest, żeby model nie wychodził poza obszar roboczy maszyny, gdyż spowoduje to ucięcie i stworzenie niepełnego programu. Warto jest wyśrodkować model i zachować minimalne odstępów od krawędzi obszaru roboczego.

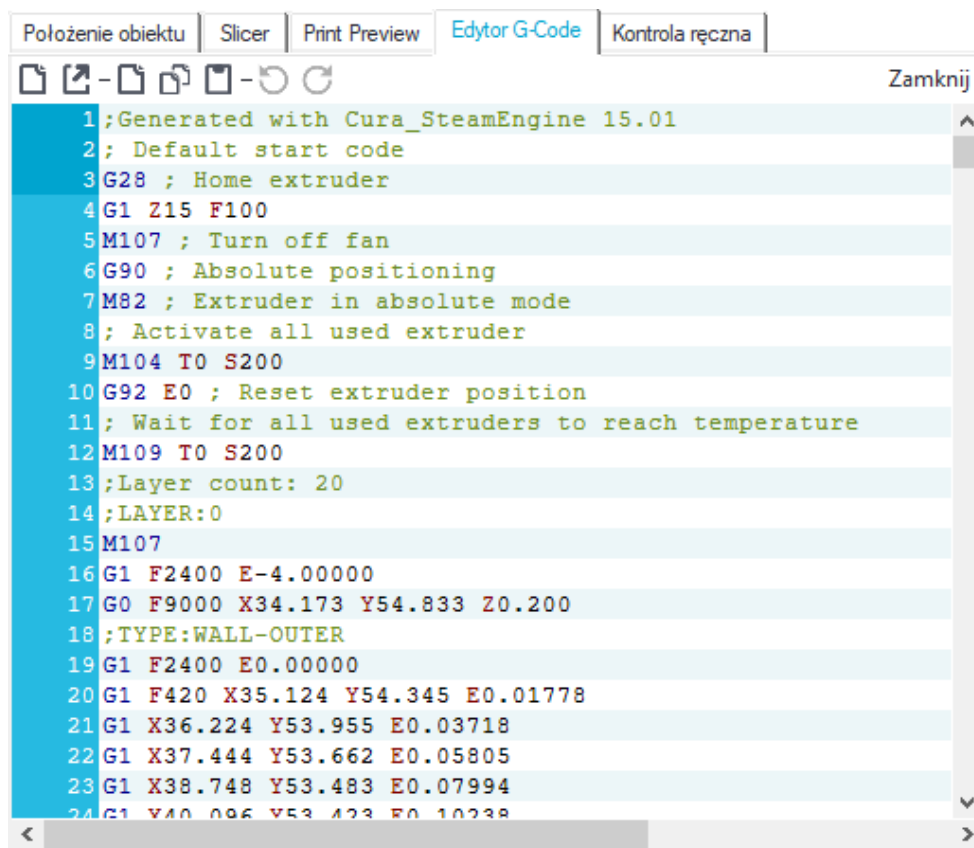
Mając dopasowany model, należy przejść do kolejnej zakładki „Slicer”. Ta zakładka odpowiada za część systemu CAM programu Repetier-Host i pozwala wygenerować program G-code na podstawie stworzonego modelu (rys. 6.3). Użytkownik ma możliwość wprowadzenia takich parametrów jak prędkość wydruku, prędkość ruchu jałowego, temperatura zgrzewania i wielu innych ustawień drukarki 3D.



Rysunek 6.3. Wygląd części konfiguracyjnej wydruku programu Repetier-Host.

Trzeba zaznaczyć, że program jest dedykowany dla drukarek 3D, dlatego też większość ustawień jest zbędna przy zgrzewaniu folii. Ustawienie wydruku może się

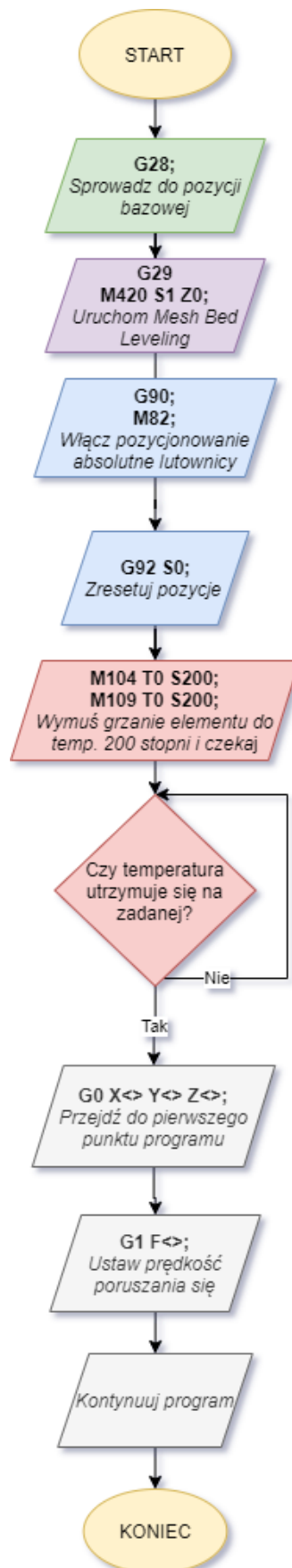
również odbywać przez zmianę wygenerowanego programu G-code, co jest bardziej optymalnym rozwiązaniem dla zgrzewarki w pracy. Wygenerowany kod jest możliwy do wglądu i edycji, wchodząc w zakładkę „Edytor G-code” (rys.6.4).



```
1;Generated with Cura_SteamEngine 15.01
2; Default start code
3G28 ; Home extruder
4G1 Z15 F100
5M107 ; Turn off fan
6G90 ; Absolute positioning
7M82 ; Extruder in absolute mode
8; Activate all used extruder
9M104 T0 S200
10G92 E0 ; Reset extruder position
11; Wait for all used extruders to reach temperature
12M109 T0 S200
13;Layer count: 20
14;LAYER:0
15M107
16G1 F2400 E-4.00000
17G0 F9000 X34.173 Y54.833 Z0.200
18;TYPE:WALL-OUTER
19G1 F2400 E0.00000
20G1 F420 X35.124 Y54.345 E0.01778
21G1 X36.224 Y53.955 E0.03718
22G1 X37.444 Y53.662 E0.05805
23G1 X38.748 Y53.483 E0.07994
24G1 Y40.096 Y53.423 E0.10238
```

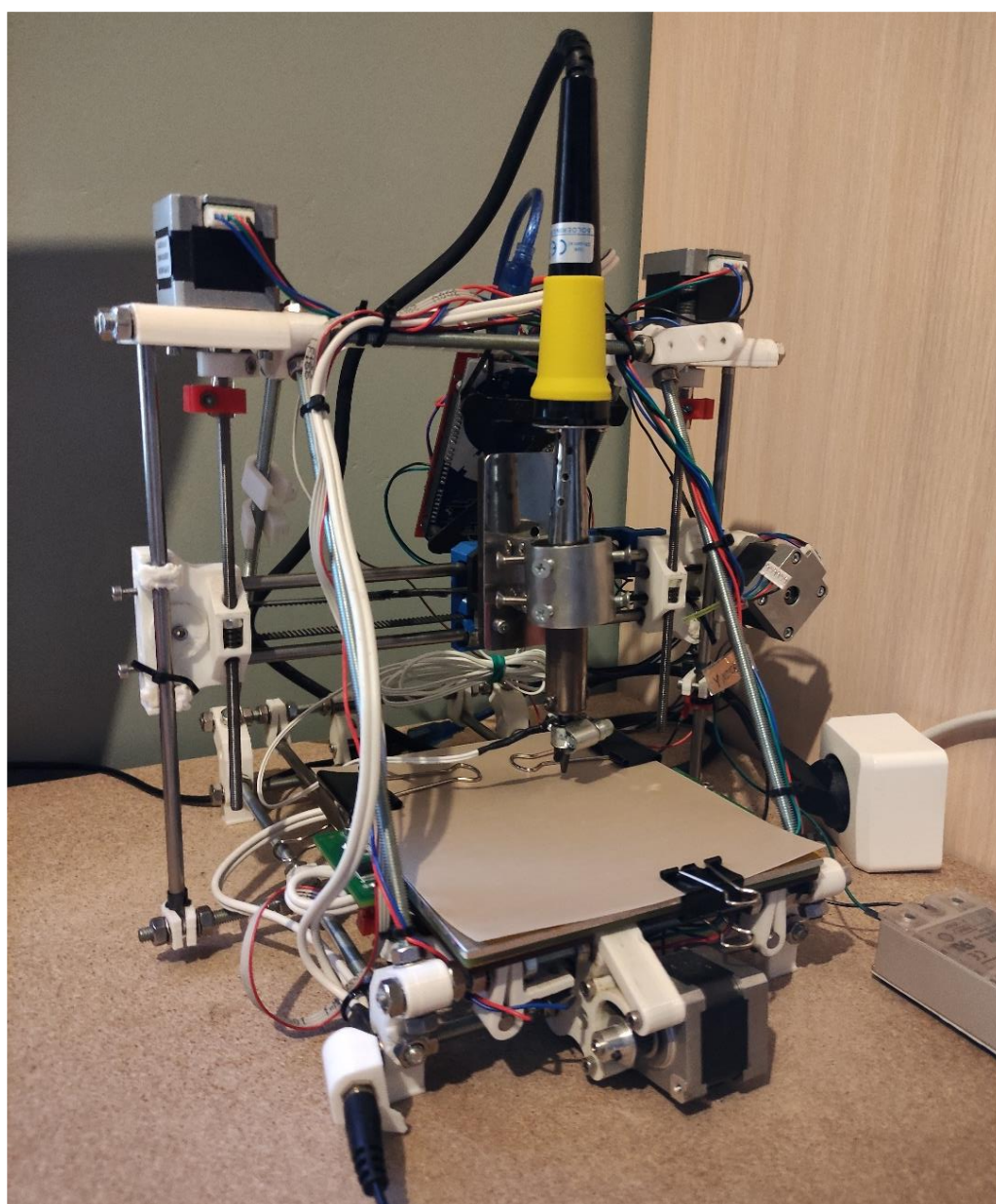
Rysunek 6.4. Widok zakładki „Edytor G-code” po wygenerowaniu kodu programu.

Program oprócz samych komend języka G-code, generuje proste komentarze informujące o ich przeznaczeniu. Wszelkie dostępne polecenia wraz z opisami można znaleźć w plikach oprogramowania Marlin lub wyszukać je na stronie oprogramowania. Przybliżony schemat wygenerowanego programu G-code z uwzględnieniem Mesh Bed Levelingu pokazano na schemacie 6.5:



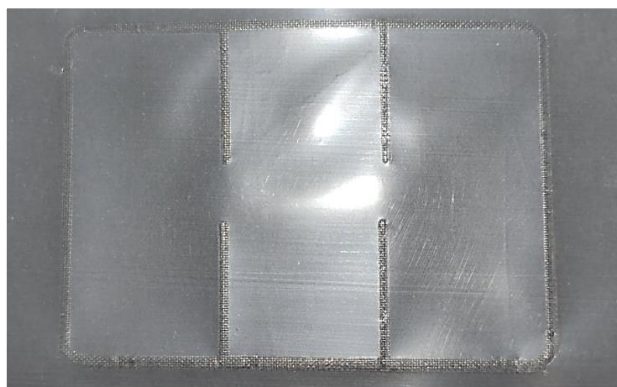
Schemat 6.5. Algorytm programu zgrzewania folii programu Repetier-Host.

Do testu zgrzewania użyto folii polietylenowej (PE) o grubości 0.1mm. Dwie warstwy folii nałożone na siebie, posiadają nakładkę w postaci arkusza PTFE o grubości 0.08mm. Całość jest zatrzaśnięta klipsami do stołu roboczego, aby materiał przywierał do stołu i nie przesunął się podczas pracy grotu. Domyślna temperatura zgrzewania folii polietylenowej powinna wynosić około 220°C. Nacisk generowany jest przez ustawienie ujemnego poziomu osi Z, który w przypadku testu został dobrany na poziomie -1.2mm. Połączenie ujemnego poziomowania z generowaniem nacisku jest możliwe ze względu na nacisk lutownicy na stół umieszczony na sprężynach. Prędkość zgrzewania ustawiono na 5 mm/s. Maszynę gotową do zgrzewania przedstawiono na rysunku 6.6.



Rysunek 6.6. Prezentacja stworzonej maszyny CNC do zgrzewania folii.

Czas trwania programu zależy od przyjętej prędkości oraz ilości warstw, którą program CAM wygenerował z wgranego modelu 3D. Zgrzewanie folii zależy tylko od pierwszej warstwy modelu, dlatego można zakończyć program po wykonaniu pierwszej warstwy. Po ostygnięciu folii, można ją usunąć spod zatrzasków i arkusza PTFE. Zgrzaną folię po wykonaniu powyższego programu pokazano na rysunku 6.7.



Rysunek 6.7. Zgrzana folia PE z przykładowego programu zgrzewania.

Wykonana folia może być wykorzystana do stworzenia foliowego siłownika liniowego, którego przykład pokazano na rysunku 6.8. Nadmiar folii wycięto, a zgrzany kontur wyposażono w ujście dla powietrza w postaci wentylu oraz element wyprowadzający pracę worka na zewnątrz układu. Elementy tego typu najprościej jest stworzyć metodą wydruku przestrzennego, gdyż mogą one w łatwy sposób zostać zmodyfikowane pod względem kształtu zgrzanej folii. W prostych aplikacjach siłowników do mocowania drukowanych elementów można użyć taśm dwustronnych lub kleju. Powietrze można doprowadzać pompką lub sprężarką powietrza, najlepiej z możliwością kontroli ciśnienia wewnątrz worka. Brak ulotności powietrza w woreczku wskazuje na szczelnie zgrzaną folię.



Rysunek 6.8. Siłownik foliowy wykonany z przykładowego programu zgrzewania.

7. Badanie parametrów zgrzewania maszyny

Jakość procesu zgrzewania w maszynie zależy od trzech czynników – temperatury, nacisku oraz prędkości zgrzewania. W oprogramowaniu z dużą dokładnością można dobrać temperaturę oraz prędkość, jednak maszyna nie posiada żadnego elementu regulującego nacisk lutownicy. Dodatkowo, stół roboczy maszyny jest nierównomierny, a poziomowanie podłoża w obu przedstawionych metodach zależy od błędu ludzkiego. Dlatego też, wartość siły nacisku zawsze będzie obciążona błędem systematycznym.

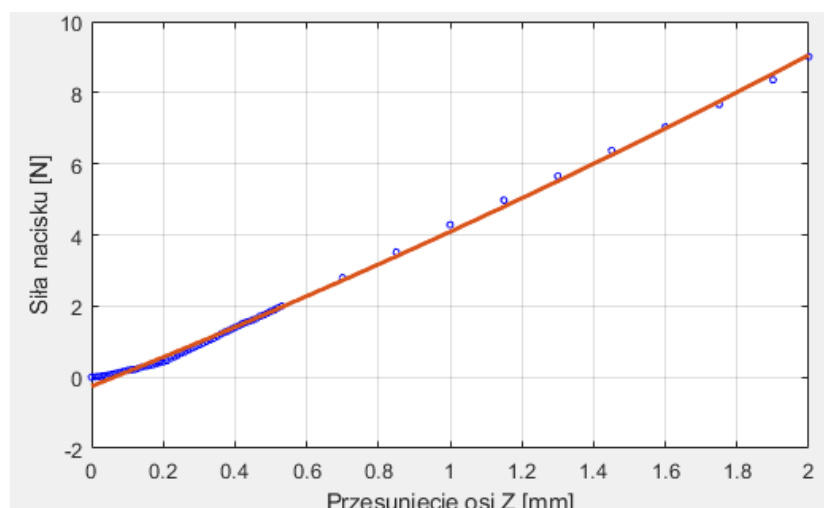
W poniższych badaniach przyjęto, że wskaźnikiem jakości zgrzania folii będzie siła, przy której zgrzany foliowy siłownik rozrywa się na przecięciach zgrzein. W przypadku braku szczelności zgrzania podczas testowania parametru, zostanie to przyjęte jako zerowa siła potrzebna na rozerwanie. Parametry zostaną przetestowane dla trzech folii termoplastycznych:

- Folia polietylenowa (PE) o grubości 0.1mm
- Folia poliamidowo-polietylenowej (PA/PE) , moletowana o grubości 0.09mm
- Folia polichlorku winylu (PVC) o grubości 0.15mm.

Pomiar siły rozrywania folii dokonywany był siłomierzem, zaczepionym o jeden z zgrzanych arkuszy folii. Na drugim arkuszu generowano siłę tak, aby rozrywać folię wzdłuż zgrzanego kształtu.

7.1. Wpływ nacisku na zgrzewanie

Nacisk lutownicy na materiał można oszacować zbierając dane o nacisku punktowym przy opuszczaniu pionowej osi ruchu Z. Stół roboczy umieszczony jest na sprężynach, dlatego też istnieje możliwość połączenia opuszczania osi do pewnej wartości z generowaniem nacisku, bez uszkodzenia maszyny. Do tego celu użyto zewnętrznego czujnika, a pomiary wykorzystano do aproksymacji funkcji wielomianowej nacisku względem jednostek przesunięcia osi. Zastosowanie takiego przybliżenia pozwala na oszacowanie siły nacisku wypoziomowanego stołu roboczego, bez ponownego użycia zewnętrznego czujnika. Punktem wyjściowym pomiarów przyjęto, że zgrzewana folia znajduje się tuż pod grotem lutownicy. Wykres 7.1 przedstawia zebrane punkty pomiarowe wraz z aproksymowanym równaniem.



Wykres 7.1. Zebrane punkty pomiarowe (kolor niebieski) wraz z aproksymacją wielomianem drugiego stopnia.

Aproksymowany wielomian wyraża się wzorem:

$$y(x) = 0.31x^2 + 4.03x - 0.25$$

Równanie pozwala na znalezienie porządknej siły nacisku, wymuszając program na konkretnym poziomie stołu roboczego. Tą zależność można wykorzystać przy zgrzewaniu dowolnej folii termoplastycznej, dopóki elementy konstrukcyjne maszyny pozostaną takie same. Folie do testu siły nacisku zgrzewano w następujących parametrach:

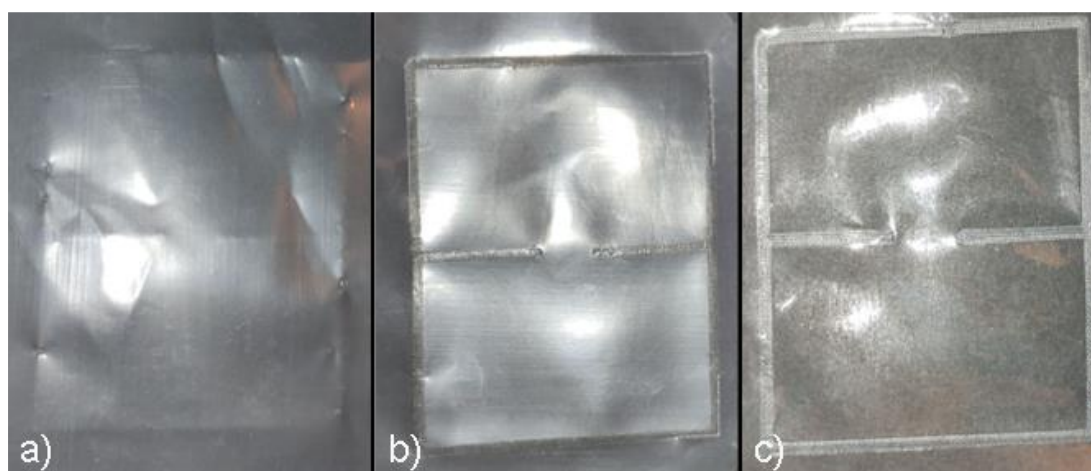
- folia PE, temperatura 210°C, prędkość 5 mm/s,
- folia PA/PE, temperatura 220°C, prędkość 5 mm/s,
- folia PVC, temperatura 270°C, prędkość 5 mm/s.

Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 7.2.

Odległość Z [mm]	Oszacowana siła nacisku [N]	Folia PE	Folia PA/PE	Folia PVC
		Siła rozrywu [N]		
0	0.00	0	0	0
-0.2	0.56	0	0	0
-0.4	1.41	1.13	3.58	3.87
-0.6	2.28	2.99	8.29	4.95
-0.8	3.17	2.89	10.35	9.52
-1	4.09	3.24	11.87	9.71
-1.2	5.03	3.58	9.07	10.15
-1.4	6.00	3.24	7.90	8.34
-1.6	6.99	3.04	7.50	6.08
-1.8	8.01	2.16	5.30	5.94
-2	9.06	2.60	5.10	5.74

Tabela 7.2. Wyniki badań wpływu siły nacisku na wytrzymałość badanych folii.

Pomiary wskazały optymalny zakres opuszczenia osi Z, który wyszedł podobnie dla trzech badanych folii. Największą wytrzymałość zgrzein otrzymuje się dla nacisku rzędu od 4 N do 5 N, co jest równoważne przesunięciu osi Z od 1mm do 1.2mm. Mały nacisk powoduje, że uplastycznione folie nie wnikają w siebie dostatecznie głęboko, tworząc słabe wiązania (rys. 7.3 a)). Zbyt duży nacisk jest powodem wypaczania i słabszych połączeń między zgrzeiną, a resztą folii (rys 7.3 b)). Docelowy kształt zgrzewania powinien być gładki, bez nadmiernie ostrych krawędzi (rys. 7.3 c)). Zgrzewanie grubszych folii, czy też innego tworzywa termoplastycznego może wymagać innego zakresu nacisku do uzyskania zadowalających efektów.



Rysunek 7.3. a) Zgrzana folia PE przy słabym nacisku; b) Zgrzana folia PVC przy zbyt dużym nacisku; c) Zgrzana folia PE przy odpowiednim nacisku.

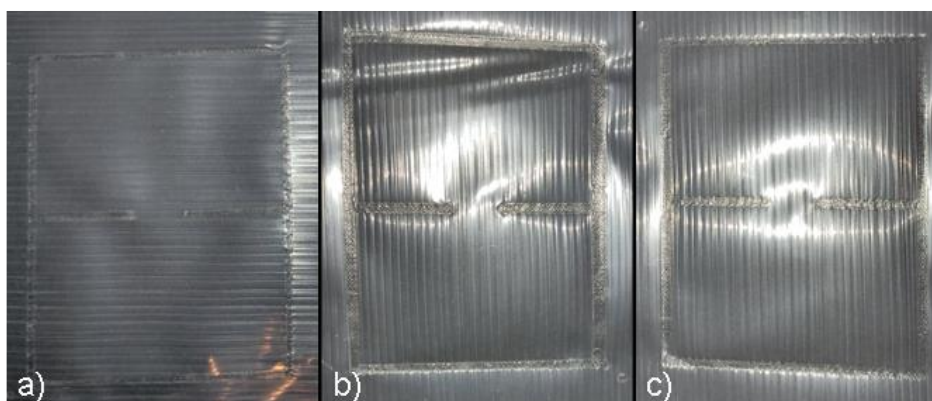
7.2. Wpływ temperatury na zgrzewanie

Temperatura jest równoważnym czynnikiem w procesie zgrzewania jak siła nacisku. Bez odpowiedniej temperatury, zgrzewane części folii nie przejdą do stanu uplastycznienia, tworząc słabe wiązania. Maszyna wyposażona jest w regulator temperatury, dlatego też nie ma potrzeby użycia zewnętrznego czujnika do zebrania pomiarów. W badaniach wpływu temperatury dla wybranych materiałów, przyjęto stały nacisk równy 5 N (1.2mm) oraz prędkość zgrzewania równą 5 mm/s. Wyniki badań wpływu temperatury na wytrzymałość przedstawiono w tabeli 7.4.

	Folia PE	Folia PA/PE	Folia PVC
Temperatura grotu [°C]	Siła rozrywu [N]		
160	0.00	2.11	0.00
170	1.13	3.38	0.00
180	1.81	3.24	0.00
190	3.43	4.95	0.64
200	3.68	6.28	0.93
210	3.73	6.77	1.96
220	3.38	13.19	2.80
230	2.60	10.94	5.64
240	2.35	8.19	5.89
250	2.40	6.38	6.57
260	2.21	5.94	7.11
270	2.31	5.00	10.69
280	2.26	4.61	10.55
290	2.11	4.17	6.03
300	1.91	4.12	7.75

Tabela 7.4. Wyniki badań wpływu temperatury na wytrzymałość badanych folii.

Warte zauważenia jest to, że optymalne temperatury zgrzewania folii są o wiele wyższe, niż powszechnie uznawane temperatury topnienia materiałów, z których są zrobione. Temperatura topnienia polietylenu, z którego wykonano folie PE wynosi w granicach 125-135°C. W przypadku powyższych badań, optymalna temperatura wyniosła 190-230°C. Można to tłumaczyć tym, że element zgrzewający jest cały czas w ruchu, dlatego wymagane jest dostarczenie wymaganej ilości energii cieplnej w krótszym czasie. Mała temperatura jest powodem słabych i mało wyraźnych zgrzein (rys. 7.5 a)). Zbyt wysoka jest efektem grubych i płaskich linii, jak też większych zgrubień, które negatywnie wpływają na ich wytrzymałość (rys. 7.5 b)). Optymalna temperatura daje gładki kształt bez efektu wypalenia (rys. 7.5 c)).



Rysunek 7.5. a) Zgrzana folia PA/PE przy małej temperaturze; b) Zgrzana folia PA/PE przy zbyt dużej temperaturze; c) Zgrzana folia PA/PE przy odpowiedniej temperaturze.

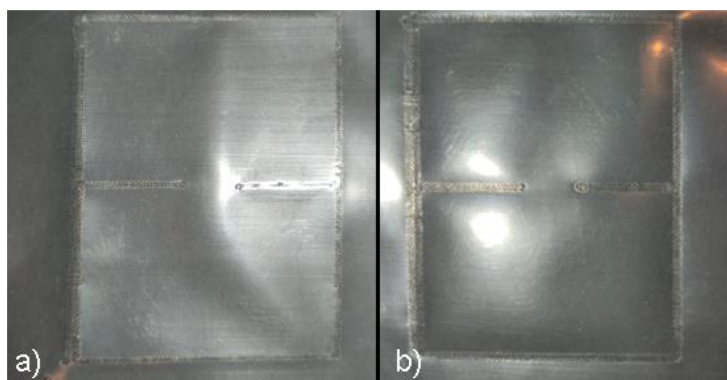
7.3. Wpływ prędkości grotu na zgrzewanie

Prędkość poruszania się elementu zgrzewającego jest ściśle związana z procesem zgrzewania. Od niej zależy ilość energii cieplnej dostarczonej do zgrzewanych elementów oraz czas trwania nacisku, pod którym pozostają uplastycznione tworzywa. Dobranie odpowiedniej prędkości pozwoli na pogodzenie jakościowego zgrzewania z czasem potrzebnym na złączenie tworzyw. Wpływ prędkości zostanie zbadany dla wyznaczonych optymalnych parametrów zgrzewania badanych folii. Wyniki badań wpływu prędkości na wytrzymałość pokazano w tabeli 7.6.

	Folia PE	Folia PA/PE	Folia PVC
Prędkość grotu [mm/s]	Siła rozrywu [N]		
5	3.73	13.19	10.69
10	2.26	11.04	8.04
15	2.11	10.10	7.41
20	1.32	4.17	2.84
25	1.42	3.97	1.96
30	0.93	3.73	0.74
35	0.00	3.38	0.20
40	0.00	2.75	0.00

Tabela 7.6. Wyniki badań wpływu prędkości zgrzewania na wytrzymałość folii.

Można zauważyć malejącą tendencję wytrzymałości zgrzein wraz ze wzrostem prędkości dla badanych materiałów. Energia cieplna potrzebna do uplastycznienia materiałów pobierana jest z rozgrzanego elementu, dlatego też proces jej przekazywania wymaga pewnego minimalnego czasu. Wysoka prędkość grotu jest powodem częściowego zgrzewania folii i słabych linii zgrzein (rys. 7.7 a)). Optymalnie dobrana prędkość generuje mocniejsze wiązania tworząc wyraźniejsze linie wzdłuż zgrzewanego kształtu. (rys. 7.7 b))



Rysunek 7.7. a) Zgrzana folia PA/PE przy zbyt dużej prędkości; b) Zgrzana folia PA/PE przy odpowiedniej prędkości.

Podsumowanie

Stworzona maszyna CNC spełniła założenia niniejszej pracy dyplomowej, pozwalając na sukcesywne zgrzewanie foliowych siłowników woreczkowych, składających się na foliowe roboty miękkie. Elementy wykonawcze stworzone ze zgrzewanych folii są ciekawym rozwiązaniem na produkcje tanich systemów robotycznych. Sama budowa siłowników foliowych nie jest skomplikowana, a tworzenie nie wymaga specjalistycznego sprzętu i pozwala na ich masowe prototypowanie oraz produkcję. Foliowe siłowniki ogranicza mała wytrzymałość spowodowana materiałami i technikami ich wytwarzania, dlatego też do tej pory znajdują one zastosowanie w wąskim zakresie działań.

Proces budowy maszyny CNC przedstawiony w pracy pokazuje, że w dzisiejszych czasach maszyny tego typu są możliwe do stworzenia z użyciem łatwo dostępnych narzędzi. Szeroka gama programów do projektowania CAD oraz programów wspierających wytwarzanie CAM ułatwia projektowanie docelowego produktu oraz automatyzację procesu produkcyjnego. Idea otwartego programowania i produkcji maszyn sprawiła, że powstało wiele ogólnodostępnych projektów maszyn wspierających szeroką gamę platform mikrokomputerowych i związanych z nimi peryferii. Projektant tworząc maszynę może korzystać z gotowych rozwiązań, finalnie modyfikując je według własnych potrzeb.

Proces zgrzewania uzyskany w maszynie jest obarczony pewną losowością. Jakość zgrzania nie jest w pełni powtarzalna ze względu na zastosowaną technikę zgrzewania i elementy użyte w konstrukcji maszyny. Przeprowadzone badania wskazują na optymalne zakresy parametrów, w których uzyskuje się najlepszą jakość zgrzania badanych folii. Zostawia to możliwość na dodatkowe modyfikacje maszyny, na przykład użycie lepszej jakościowo lutownicy, czy też wymiana nierównomiernego stołu roboczego. Mimo wszystko efekty zgrzewania są zadowalające, a maszyna będzie służyć produkcji foliowych robotów miękkich

Streszczenie

Praca przedstawia proces konstrukcji prostej maszyny CNC, stworzonej w celu zgrzewania folii termoplastycznej na potrzeby wykonywania foliowych robotów miękkich. Podstawą tworzonej maszyny jest przekształcona drukarka 3D z możliwością podłączenia dowolnej lutownicy kolbowej zgrzewającej folie. Oprócz samej budowy maszyny, w pracy poruszono tematykę foliowych siłowników woreczkowych zwanych „*Pouch Motors*”, które są fundamentami foliowych robotów miękkich. Dokonano przeglądu powszechnie stosowanych technologii zgrzewania folii wraz z przykładami maszyn stosujących te technologie. Przedstawiono podstawowe etapy tworzenia produktów maszyn CNC oraz technologie drukarek 3D w świetle maszyn CNC. Praca zawiera zwięzły opis elementów zbudowanej maszyny, proces modyfikacji drukarki 3D oraz konfiguracje użytego oprogramowania. Z użyciem zbudowanej maszyny, pokazano przykładowy proces produkcji foliowego siłownika woreczkowego wraz z wpływem podstawowych parametrów zgrzewania różnych folii termoplastycznych. Pracę zakończono wnioskami z tworzenia maszyny CNC oraz podsumowano wpływ parametrów zgrzewania tworzyw termoplastycznych.

Abstract

This paper presents the construction process of a simple CNC machine created to weld thermoplastic foil for the purpose of making plastic-foil-based soft robots. The designed machine is a modified 3D printer with the possibility of connecting any foil welding soldering iron. In addition to the construction of the device itself, the thesis touches on "Pouch Motors," which are the foundations of foil soft robots. Standard film sealing technologies are reviewed, along with examples of machines using these technologies. The primary product development steps of CNC machines and 3D printer technologies in light of CNC machines are presented. The paper includes a brief description of the built machine's components, the modification process of the 3D printer, and the configuration of the software used. An example process for manufacturing a film pouch actuator using the built machine is shown, along with the effect of basic sealing parameters of different thermoplastic films. The paper ends with conclusions on creating the CNC machine and summarizes the impact of the welding parameters of thermoplastics.

Bibliografia

- [1] R.Niiyama, D.Rus, S.Kim – “*Pouch Motors: Printable/inflatable soft actuators for robotics*”, Hong Kong, China, 2014
- [2] R.Niiyama, X.Sun, C.Sung, B.An, D.Rus, S.Kim – “*Pouch motors: Printable soft actuators integrated with computational design*”, Mary Ann Liebert, 2015
- [3] N.Oh, Y.J.Park, S.Lee, H.Lee, H.Rodrigue – “*Design of Paired Pouch Motors for Robotic Applications*”, Październik 2018
- [4] “Proces zgrzewania”, <http://www.tworzywa.pwr.wroc.pl/pl/dydaktyka/zgrzewanie-0> [Dostęp: Styczeń 2021]
- [5] D.Stavrov, H.E.N.Bersee – “*Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*”, Tom 36, Wydanie 1, Styczeń 2005, Strony 39-54
- [6] H.P.C.Daniels – “*Ultrasonics*”, Tom 3, Wydanie 4, Październik 1965, Strony 190-196
- [7] M.Troughton – “*Handbook of Plastics Joining (Second Edition)*”, Rozdział 2, Strony 15-35, 2009
- [8] “Maszyny CNC”, https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_control [Dostęp: Styczeń 2021]
- [9] “O technologii CNC”, <https://www.automatyka.pl/artykuly/czym-dokladnie-jest-cnc--148488-6> [Dostęp: Styczeń 2021]
- [10] CR Alavala – “*CAD/CAM: concepts and applications*”, 2008
- [11] “Oprogramowanie sprzętowe”, <https://en.wikipedia.org/wiki/Firmware> [Dostęp: Styczeń 2021]
- [12] I.Gibson D.Rosen B.Stucker M.Khorasani – “*Additive Manufacturing Technologies*”, Springer-Verlag New York Inc., 2014
- [13] “Technologia FDM”, https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication [Dostęp: Styczeń 2021]
- [14] Krisztián Kun – “*Reconstruction and development of a 3D printer using FDM technology*”, ICMEM, Slovakia, 2016
- [15] T.Peng – “*Analysis of Energy Utilization in 3D Printing Processes*”, Grudzień 2016
- [16] PAS da Rocha, RDS e Silva, MEL e Tostes – “*Prototype CNC machine design*”, Listopad 2010
- [17] “Budowa drukarki RepRapPro Huxley”, https://reprap.org/wiki/RepRapPro_Huxley [Dostęp: Styczeń 2021]

Dodatek A. Płyta CD z oprogramowaniem i pracą w formie komputerowej