

Marcin JANOSZ¹

Opiekun naukowy: Arkadiusz TRĄBKA²

PROJEKT I ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA FREZARKO- WIERTARKI MODELARSKIEJ

Streszczenie: Przedstawiono proces tworzenia modelu geometrycznego oraz analizy wytrzymałościowej projektowanej frezarko-wiertarki przeznaczonej do obróbki materiałów wykorzystywanych w modelarstwie. Do opracowania modelu geometrycznego zastosowano program Autodesk Inventor, natomiast do analizy wytrzymałościowej użyto programu Autodesk Fusion 360.

Słowa kluczowe: frezarko-wiertarka, model geometryczny, analiza wytrzymałościowa, metoda elementów skończonych

DESIGN AND STRENGTH ANALYSIS OF MILLING-DRILLING MACHINE FOR MODEL MAKING

Summary: The process of creating a geometric model and the strength analysis of the designed milling-drilling machine intended for machining materials used in model making are presented. The Autodesk Inventor program was used to develop the geometric model. The Autodesk Fusion 360 program was used for the strength analysis.

Keywords: milling-drilling machine, geometric model, strength analysis, finite element method

1. Wstęp

Frezarko-wiertarki są to obrabiarki, które łączą w sobie funkcjonalność frezarki oraz wiertarki, dzięki czemu stanowią uniwersalne maszyny do obróbki mechanicznej materiałów. Połączenie dwóch funkcjonalności pozwala na zaoszczędzenie miejsca, a zarazem stwarza możliwość wytwarzania elementów o bardzo złożonych kształtach. Z powyższych względów frezarko-wiertarki coraz częściej trafiają do przydomowych warsztatów, a w wielu przypadkach są nawet indywidualnie projektowane

¹ Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, specjalność: Komputerowe Wspomaganie Konstruowania i Wytwarzania, mj055976@student.ath.edu.pl

² dr. inż., Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, atrabka@ubb.edu.pl

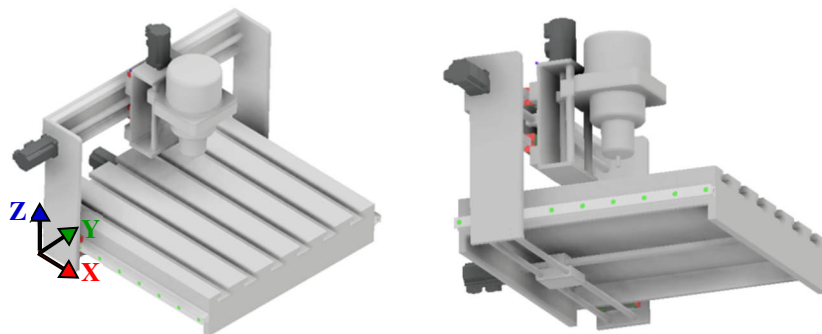
i budowane. Pracę nad projektem urządzenia zaczyna się od przeglądu dostępnych konstrukcji i porównania ich ze sobą. Na podstawie analizy istniejących obrabiarek oraz biorąc pod uwagę przyjęte na wstępie założenia projektowe, dokonuje się wyboru koncepcji urządzenia. Po dokonaniu wyboru koncepcji urządzenia można przystąpić do następnego etapu prac, czyli opracowania modelu geometrycznego. W kolejnym etapie należy opracować model obliczeniowy, zdefiniować warunki brzegowe oraz dobrać obciążenia. Po przygotowaniu modelu obliczeniowego należy przeprowadzić analizę wytrzymałościową zaprojektowanego urządzenia. Analiza ta ma za zadanie sprawdzenie wytrzymałości oraz sztywności poszczególnych elementów obrabiarki.

W niniejszej pracy przedstawiono modele geometryczny i obliczeniowy projektowanej frezarko-wiertarki przeznaczonej do obróbki materiałów wykorzystywanych w modelarstwie, a następnie sprawdzono, czy pod względem wytrzymałościowym konstrukcję można uznać za prawidłowo zaprojektowaną.

2. Opracowanie modelu geometrycznego

Prace projektowe rozpoczęto od zapoznania się z frezarko-wiertarkami produkowanymi seryjnie [7-9], jak i wytworzonymi w przydomowych warsztatach [10-12]. Biorąc pod uwagę zastosowane w nich rozwiązania techniczne oraz sformułowane na wstępie założenia projektowe, takie jak:

- możliwość frezowania i wiercenia w materiałach wykorzystywanych w modelarstwie (drewno, tworzywa sztuczne, metale nieżelazne i ich stopy),
 - jak największa funkcjonalność, a zarazem małe gabaryty urządzenia,
 - zapewnienie sztywności, stabilności oraz precyzji podczas obróbki,
- opracowano wstępną koncepcję obrabiarki, którą pokazano na rysunku 1.

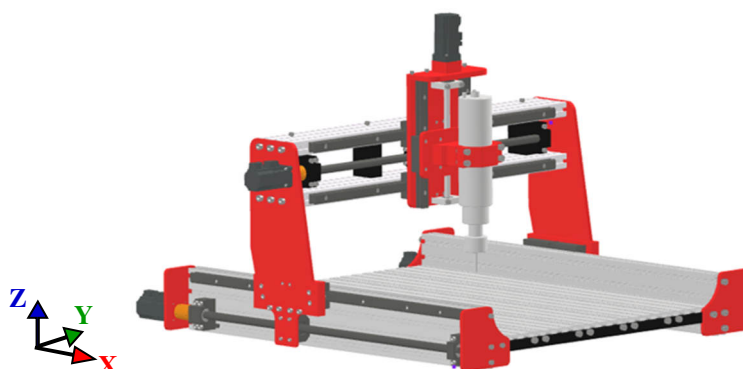


Rysunek 1. Wstępna koncepcja projektowanej frezarko-wiertarki

Podczas opracowywania wstępnej koncepcji obrabiarki przyjęto, że większość elementów konstrukcyjnych, za wyjątkiem przewodnic liniowych, zostanie wykonana ze stali, a ruch posuwisty członów w kierunkach osi X, Y, Z, będzie realizowany przy użyciu silników krokowych oraz przekładni śrubowych. Wymiary obrabiarki dobrano tak, aby obszar roboczy miał wymiary 400x350x100 mm (X, Y, Z).

Po przeanalizowaniu koncepcji wstępnej stwierdzono, że urządzenie jest zbyt ciężkie, a jego obszar roboczy stosunkowo mały. W związku z powyższym opracowano drugi

wariant koncepcyjny frezarko-wiertarki (rys. 2). W porównaniu z koncepcją wstępną został on prawie całkowicie przebudowany i wykonany głównie w oparciu o profile aluminiowe, które poprzez swój kształt zapewniają dużą sztywność przy niskiej masie. Jako elementy wykonywane ze stali pozostawiono tylko zakończenia prowadnic wzdłużnych, wsporniki prowadnicy poprzecznej, główną płytę montażową zespołu wrzeciona oraz podstawę pod wrzeciono. W efekcie wprowadzonych zmian konstrukcyjnych otrzymano urządzenie o powiększonym obszarze roboczym (550x450x160 mm), a zarazem mniejszej masie.



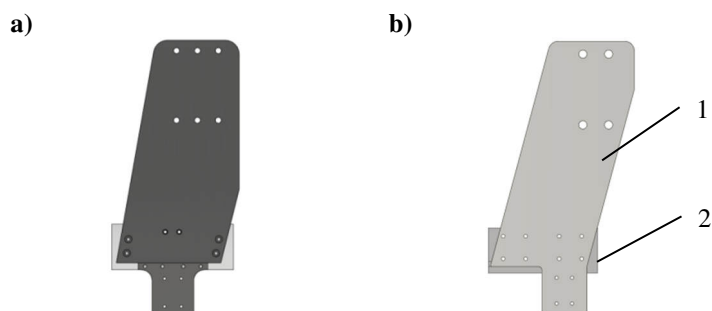
Rysunek 2. Drugi wariant koncepcyjny projektowanej obrabiarki

Tak przygotowany model drugiego wariantu koncepcyjnego projektowanej obrabiarki poddano ocenie w zakresie możliwości wykonania poszczególnych elementów konstrukcyjnych oraz możliwości realizacji składowych ruchów roboczych zgodnie z założeniami. W efekcie przeprowadzonej oceny zdecydowano się wprowadzić modyfikacje, które obejmowały:

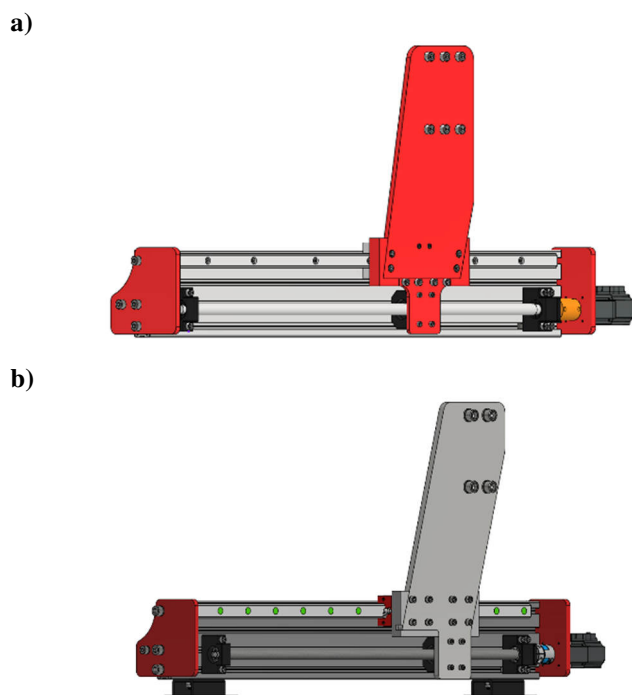
- zmiany w konstrukcji wspornika prowadnicy poprzecznej, polegające na zmniejszeniu liczby części użytych do jego wykonania (z trzech do dwóch), zmianie kształtu i wymiarów ramienia wspornika oraz bloku montażowego (rys. 3),
- zmianę materiału użytego do wykonania bloku montażowego wspornika prowadnicy poprzecznej (stop aluminium zamiast stali),
- dodanie podpór do zespołu prowadnicy wzdłużnej (rys. 4),
- zmiany w konstrukcji prowadnicy poprzecznej, polegające na zastosowaniu profili o zmienionym przekroju poprzecznym oraz zmniejszeniu z czterech do trzech liczby elementów dystansowych pomiędzy profilami z jednoczesnym zwiększeniem liczby elementów łącznych użytych do zespolenia profili (rys. 5),
- zmiany w konstrukcji zespołu wrzeciona związane z zastosowaniem innego typu wrzeciona, polegające na usunięciu obejm mocujących wrzeciono, powiększeniu wymiarów zarówno głównej płyty montażowej, jak i podstawy pod wrzeciono, a także zwiększeniu rozstawu prowadnic liniowych (rys. 6),
- uzupełnienie obrabiarki o obrotową podstawę (rys. 7), która umożliwi zmianę położenia elementu obrabianego o wybrany kąt względem blatu roboczego.

Po wprowadzeniu powyższych modyfikacji otrzymano urządzenie o wymiarach gabarytowych 916x860x639 mm i masie 65 kg, posiadające obszar roboczy o wymiarach 560x520x190 mm, w którym ruch członów zapewniają cztery silniki

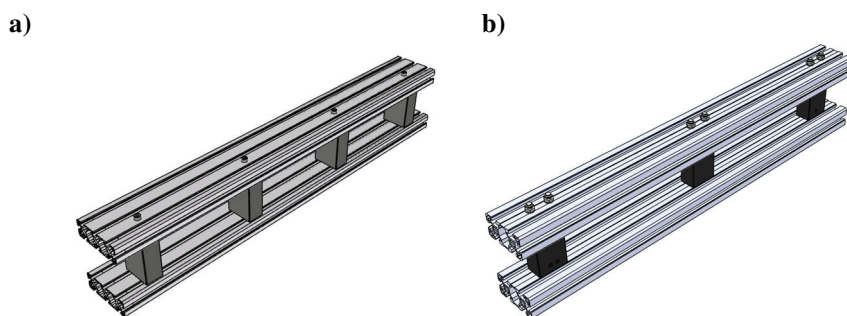
krokowe Nema 23 [13] współpracujące z przekładniami śrubowymi wykorzystującymi śruby i nakrętki kulowe typu SFU [14], natomiast obróbka materiałów wykonywana jest przy użyciu wrzeciona Vevor o mocy 2,2 kW [15]. Ruch posuwisty członów realizowany jest przy użyciu prowadnic liniowych, po których przesuwają się wózki liniowe typu HGL-CA [16].



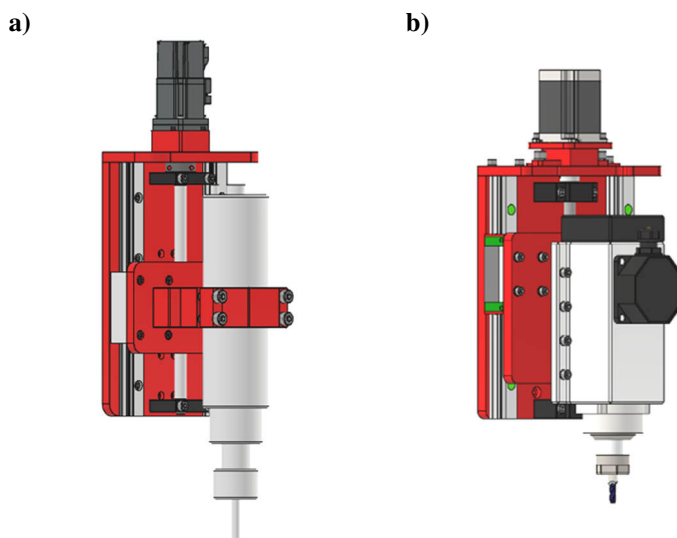
Rysunek 3. Wspornik prowadnicy poprzecznej: a) przed wprowadzeniem modyfikacji, b) po wprowadzeniu modyfikacji (1- ramię wspornika, 2 – blok montażowy)



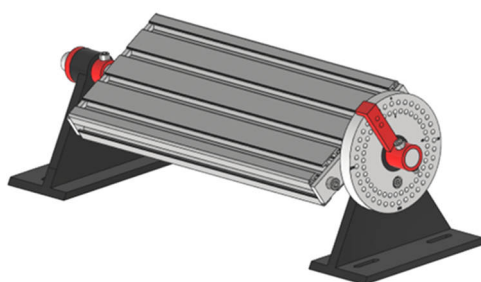
Rysunek 4. Zespół prowadnicy wzdłużnej: a) przed wprowadzeniem modyfikacji, b) po wprowadzeniu modyfikacji



Rysunek 5. Prowadnica poprzeczna: a) przed wprowadzeniem modyfikacji, b) po wprowadzeniu modyfikacji

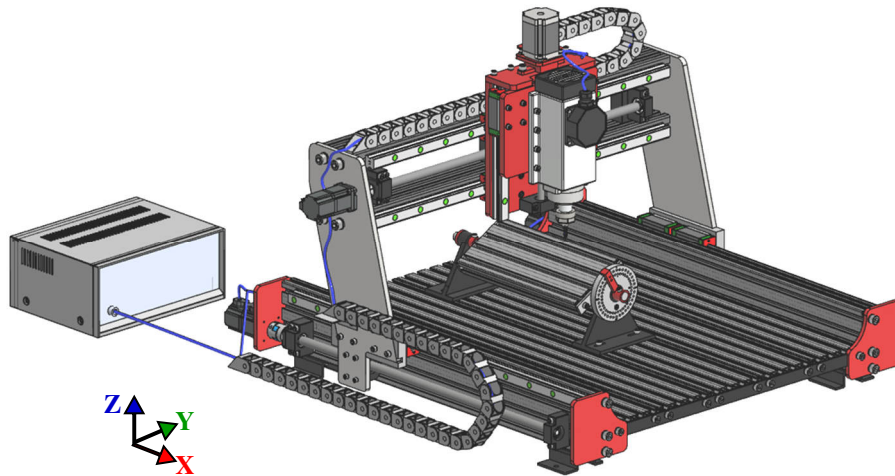


Rysunek 6. Zespół wrzeciona: a) przed wprowadzeniem modyfikacji, b) po wprowadzeniu modyfikacji



Rysunek 7. Obrotowa podstawa elementu obrabianego

Model geometryczny zaprojektowanej frezarko-wiertarki modelarskiej, wykonany przy użyciu programu Autodesk Inventor [1], przedstawiono na rysunku 8.



Rysunek 8. Model geometryczny zaprojektowanej frezarko-wiertarki modelarskiej

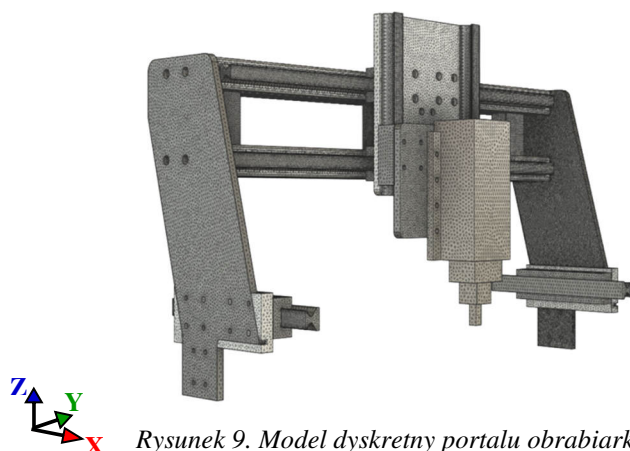
3. Model obliczeniowy

Na potrzeby analizy wytrzymałościowej opracowano model obliczeniowy, w którym zastosowano liczne uproszczenia względem modelu geometrycznego. Uproszczenia sprowadziły się po pierwsze do usunięcia zbędnych elementów, takich jak osłony, silniki, łożyskowania, śruby pociągowe i korytka na kable. Opracowując model obliczeniowy dokonano także uproszczeń kształtu prowadnic liniowych oraz wózków, a w pozostałych elementach usunięto zaokrąglenia, fazowania, rowki oraz niektóre otwory.

W kolejnym etapie budowy modelu obliczeniowego dokonano dyskretyzacji struktury na elementy skończone [2, 3]. Dyskretyzację przeprowadzono w programie Autodesk Fusion 360, stosując elementy 3D w odniesieniu do brył oraz elementy 2D w odniesieniu do połączeń śrubowych. Tak przygotowany model obliczeniowy uzupełniono o więzy wprowadzone w miejscu styku łap podporowych z podłożem oraz obciążenie zadane na powierzchni czołowej narzędzia skrawającego. Ponieważ na podstawie analiz numerycznych stwierdzono, że zarówno naprężenia, jak i deformacje występujące w obszarze blatu roboczego są wielokrotnie mniejsze niż w pozostałych elementach urządzenia, zdecydowano się skoncentrować na analizie najbardziej wyężonych elementów, wchodzących w skład tzw. portalu obrabiarki.

W tym celu wyodrębniono z całości modelu elementy składowe portalu obrabiarki (zespół prowadnicy poprzecznej ze wspornikami oraz zespołem wrzeciona), a następnie przeprowadzono ich dyskretyzację stosując większe zagęszczenie podziału na elementy skończone niż w modelu całego urządzenia. W efekcie otrzymano model złożony z 0,92 mln elementów skończonych i niemal 1,6 mln węzłów (rys. 9).

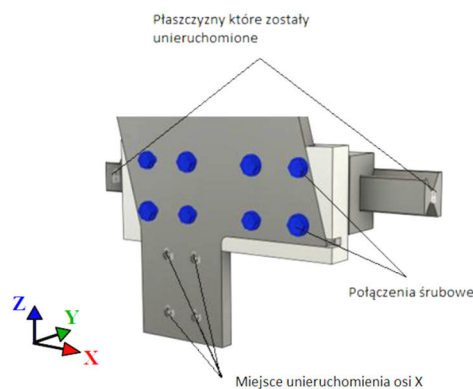
Tak przygotowanemu modelowi dyskretnemu portalu obrabiarki przyporządkowano następnie warunki brzegowe oraz obciążenia.



Rysunek 9. Model dyskretny portalu obrabiarki

3.1. Dobór warunków brzegowych

Warunki brzegowe dobrano w taki sposób, aby odwzorować w modelu obliczeniowym rzeczywiste ograniczenia swobody przemieszczania się elementów składowych portalu obrabiarki. Prowadnice liniowe zostały podparte na końcowych płaszczyznach. Odebrano im możliwość przemieszczeń w kierunkach osi X, Y i Z, natomiast pozostawiono możliwość rotacji. Z kolei wspornikom prowadnicy poprzecznej odebrano możliwość przemieszczeń w kierunku osi X poprzez wprowadzenie więzów w otworach na śruby mocujące obudowę nakrętki kulowej (rys. 10).

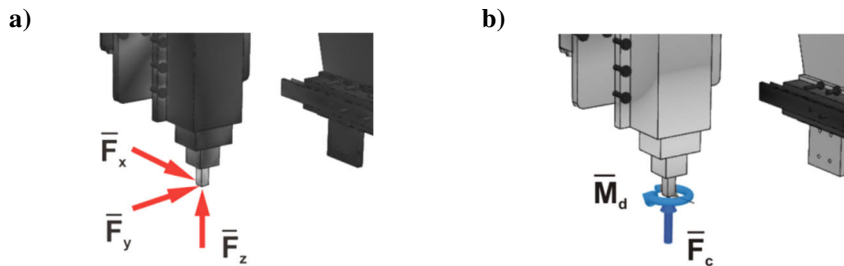


Rysunek 10. Więzy przyporządkowane prowadnicy liniowej oraz wspornikowi prowadnicy poprzecznej

3.2. Dobór obciążeń

Obciążenia występujące podczas frezowania [4] oraz kierunki i zwroty odpowiadających tym obciążeniom wektorów sił przyjęto na podstawie wyników badań (dotyczących frezowania materiału Inconel 718 frezem palcowym o dwóch ostrzach ceramicznych), zamieszczonych w pracy [5]. Z wykresów z badań odczytano wartości składowych siły skrawania przy frezowaniu: $F_x = 160$ N, $F_y = 330$ N,

$F_z = 95 \text{ N}$. Siły te powiększono następnie o współczynnik bezpieczeństwa $k = 1,4$, który ma zapewnić, że urządzenie przy nagłym wzroście obciążenia dalej będzie mogło pracować. Ostatecznie zatem analizy wytrzymałościowe dla frezowania przeprowadzono dla siły skrawania o składowych: $F_x = 225 \text{ N}$, $F_y = 465 \text{ N}$, $F_z = 130 \text{ N}$ (rys. 11a).



Rysunek 11. Sposób zadania obciążeń: a) dla frezowania, b) dla wiercenia

Obciążenia występujące podczas wiercenia wyznaczono na podstawie zależności obliczeniowych zamieszczonych w pracy [6].

Całkowitą siłę skrawania wyznaczono z zależności (1), przy uwzględnieniu zależności (2):

$$F_C = \frac{D}{2} \cdot f_z \cdot \left[\frac{k_c}{h^{m_c}} \right] \cdot f_b \cdot Z \quad (1)$$

$$h = f_z \cdot \ln \left(\frac{\sigma}{2} \right) \quad (2)$$

gdzie: D - średnica wiertła (mm), f_z - posuw na ząb (mm/ząb), k_c - opór właściwy skrawania (N/mm^2), h - grubość warstwy skrawanej (mm), m_c - wykładnik, f_b - współczynnik technologiczny, Z - liczba ostrzy, σ - kąt wierzchołkowy ostrza ($^\circ$).

Moment obrotowy obliczono na podstawie zależności (3):

$$M_d = \frac{F_C \cdot D}{2000 \cdot Z} \quad (3)$$

Przyjmując jako materiał obrabiany aluminium ADC12 oraz parametry wiercenia o wartościach: $D = 6,2 \text{ mm}$, $f_z = 0,05 \text{ mm/ząb}$, $k_c = 700 \text{ N/mm}^2$, $\sigma = 130^\circ$, $m_c = 0,25$, $f_b = 1$, $Z = 2$, na podstawie (1) obliczono całkowitą siłę skrawania $F_C = 481,24 \text{ N}$, a na podstawie (3) moment obrotowy $M_d = 0,75 \text{ Nm}$.

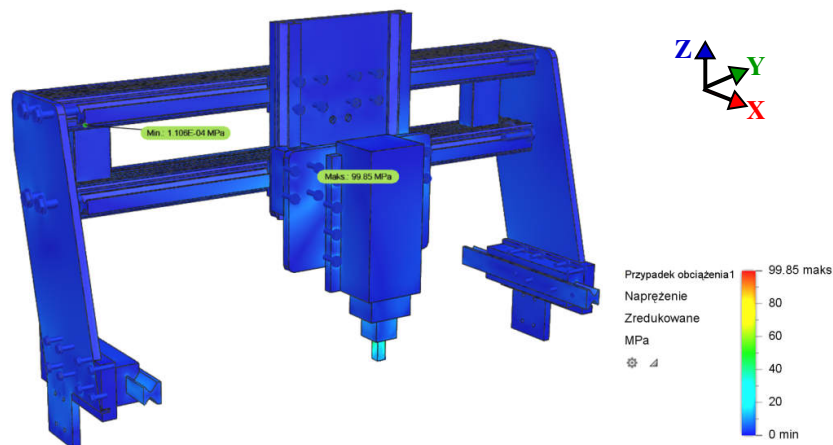
Analogicznie jak w przypadku frezowania, także obciążenia dla wiercenia powiększono o współczynnik bezpieczeństwa $k = 1,4$. Ostatecznie zatem, analizy wytrzymałościowe dla wiercenia przeprowadzono dla obciążeń o wartościach: $F_C = 674 \text{ N}$ oraz $M_d = 1 \text{ Nm}$ (rys. 11b).

4. Analiza wytrzymałościowa portalu obrabiarki

Analizę wytrzymałościową przeprowadzono przy użyciu programu Autodesk Fusion 360. W pierwszej kolejności przeprowadzono analizę dla frezowania, a następnie dla wiercenia.

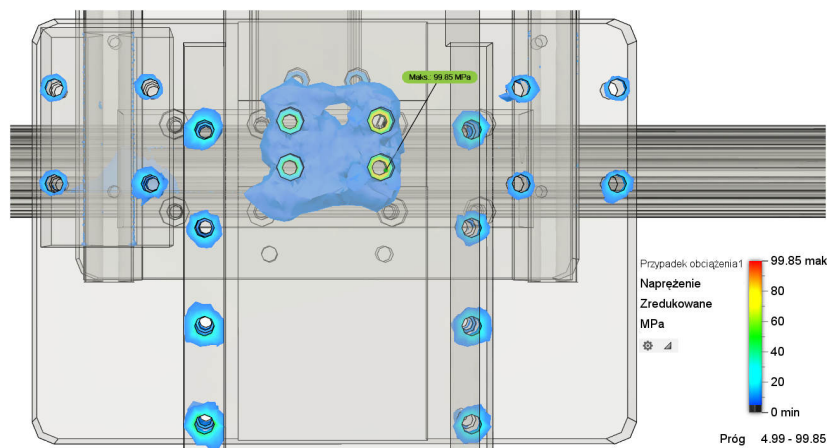
4.1. Frezowanie

Jako pierwsze wykonano obliczenia naprężeń zredukowanych. Wyniki obliczeń pokazano na rysunkach 12 i 13.



Rysunek 12. Rozkład naprężeń zredukowanych podczas frezowania

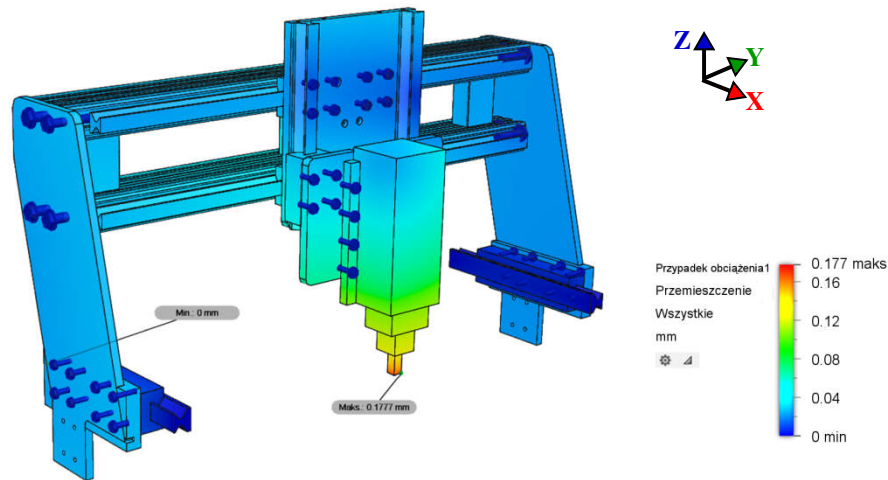
Stwierdzono, że największe naprężenia zredukowane występują w miejscu połączenia śrubowego obudowy nakrętki kulowej z podstawą wrzeciona i wynoszą 99,85 MPa (rys. 13). Naprężenia te są znacznie mniejsze niż granica plastyczności stali s275 ($R_e = 275$ MPa), użytej do wykonania podstawy wrzeciona, w której powyższe naprężenia wystąpiły.



Rysunek 13. Widok największych naprężeń zredukowanych podczas frezowania (w zakresie 4,99-99,85 MPa)

Po obliczeniach naprężeń zredukowanych przeprowadzono analizę sztywności konstrukcji. Stwierdzono, że największe przemieszczenie wypadkowe występuje w miejscu przyłożenia obciążenia do frezu, który nie stanowi elementu

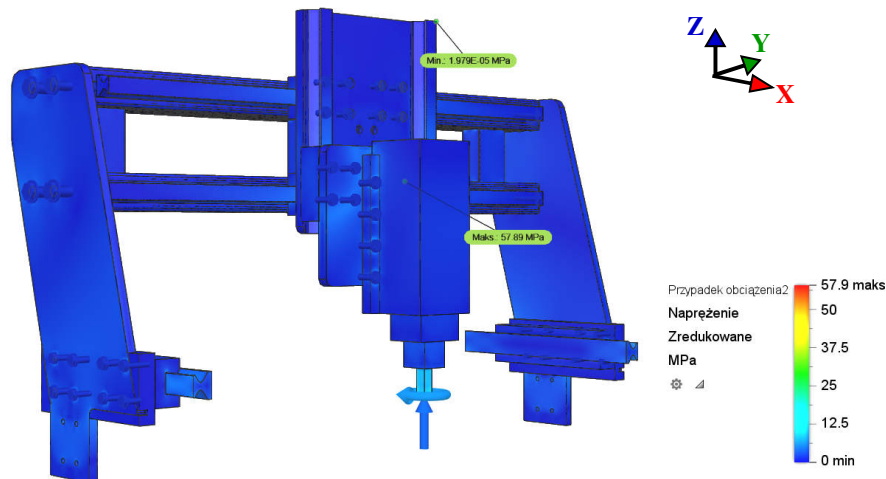
konstrukcyjnego zaprojektowanej obrabiarki (rys. 14). W elementach konstrukcyjnych obrabiarki przemieszczenia wypadkowe nie przekraczają 0,07 mm.



Rysunek 14. Przemieszczenia wypadkowe podczas frezowania

4.2. Wiercenie

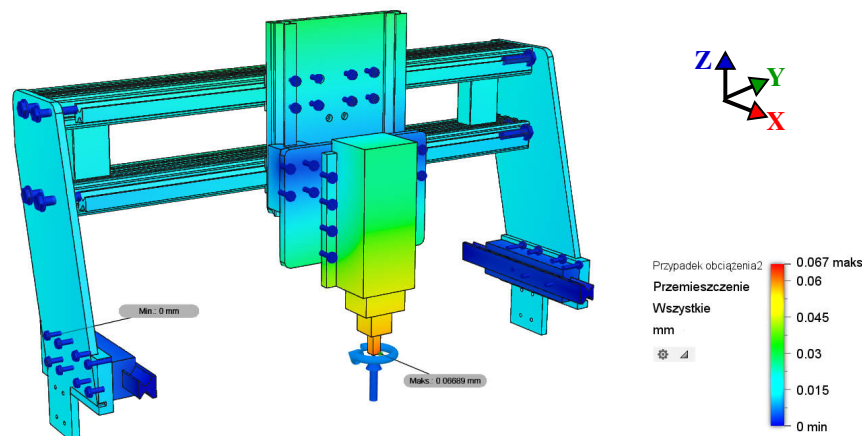
Wyniki analizy wytrzymałościowej dla wiercenia przedstawiono na rysunkach 15 i 16.



Rysunek 15. Rozkład naprężeń zredukowanych podczas wiercenia

Stwierdzono, że tak jak podczas frezowania, podczas wiercenia największe naprężenia zredukowane występują w miejscu połączenia śrubowego obudowy nakrętki kulowej z podstawą wrzeciona i wynoszą 57,89 MPa (rys. 15). Naprężenia

te są znacznie mniejsze niż granica plastyczności stali s275 ($R_e = 275$ MPa), użytej do wykonania podstawy wrzeciona, w której powyższe naprężenia wystąpiły. Podczas wiercenia, podobnie jak w przypadku frezowania, największe przemieszczenia wypadkowe występują w miejscu przyłożenia obciążenia do narzędzia (rys. 16). W elementach konstrukcyjnych obrabiarki przemieszczenia wypadkowe nie przekraczają 0,035 mm.



Rysunek 16. Przemieszczenia wypadkowe podczas wiercenia

5. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono samodzielnie zaprojektowaną frezarko-wiertarkę. Omówiono proces tworzenia modelu geometrycznego i obliczeniowego obrabiarki, a także przedstawiono wyniki analiz numerycznych mających na celu sprawdzenie, czy pod względem wytrzymałościowym urządzenie można uznać za prawidłowo zaprojektowane. W wynikach analiz zwrócono szczególną uwagę na obszary o największych naprężeniach, ponieważ mogą one stanowić potencjalne miejsca awarii. W przypadku przedstawionej w niniejszej pracy obrabiarki największe naprężenia stwierdzono w miejscu połączenia śrubowego obudowy nakrętki kulowej z podstawą wrzeciona. Największe odnotowane w tym miejscu naprężenia zredukowane wynoszą niespełna 100 MPa i są znacznie mniejsze niż granica plastyczności stali s275 ($R_e = 275$ MPa), użytej do wykonania podstawy wrzeciona, w której powyższe naprężenia wystąpiły.

Oprócz kwestii wytrzymałościowych, w tego typu urządzeniach jak zaprojektowana obrabiarka, niezwykle istotna jest precyzja realizowanej nią obróbki. Zgodnie z przyjętymi założeniami przedstawiona w niniejszej pracy obrabiarka ma służyć do obróbki materiałów stosowanych w modelarstwie, takich jak drewno, tworzywa sztuczne lub metale nieżelazne i ich stopy. Oznacza to, że siły działające podczas jej pracy będą znacznie mniejsze niż podczas obróbki twardych materiałów, takich jak Inconel 718 dla którego przeprowadzono analizy wytrzymałościowe. W konsekwencji mniejsze będą także deformacje elementów konstrukcyjnych obrabiarki, co oznacza, że powinna ona zapewnić wystarczającą w pracach modelarskich precyzję obróbki.

Podsumowując proces tworzenia modelu geometrycznego i przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że zaprojektowane urządzenie spełnia przyjęte na wstępie założenia projektowe.

LITERATURA

1. JASKULSKI A.: Autodesk Inventor 2020PL/2020: Podstawy metodyki i projektowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019.
2. ŚRÓDKA W.: Trzy lekcje metody elementów skończonych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
3. OSIŃSKI J.: Obliczenia wytrzymałościowe elementów maszyn z zastosowaniem metody elementów skończonych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
4. JEMIELNIAK K.: Obróbka skrawaniem. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
5. JEMIELNIAK K.: Obróbka skrawaniem – siły skrawania: <https://www.slide-share.net/KrzysztofJemielniak/obrobka-skrawaniem-06-sily-skrawania>, 25.02.2023.
6. GARANT - Poradnik obróbki skrawaniem - wiercenie: http://www.darmowe-ebooki.com/programowanie-cnc/03_wiercenie.pdf, 30.04.2023.
7. Serwis internetowy CORMAK – maszyny do obróbki drewna i metalu: <https://www.cormak.pl/pl/frezarko-wiertarki/389-frezarka-hk25l-vario.html>, 16.05.2022.
8. Serwis internetowy TOMBIT Automatyka – maszyny przemysłowe: <https://automatyka-tombit.pl/produkt/frezarka-cnc-hy-6040-2-2kw-5d/>, 16.05.2022.
9. Aukcja internetowa - frezarka CNC 3500W: <https://allegro.pl/oferta/frezarka-cnc-500-400-200-13226911130>, 17.05.2022.
10. Frezarko-wiertarka wykonana w przydomowym warsztacie: <https://hackaday.com/2019/10/15/a-diy-bench-sized-milling-machine/>, 16.05.2022.
11. Frezarko-wiertarka wykonana w przydomowym warsztacie: <https://www.instructables.com/Mini-Milling-Machine-DIY-Super-Robust-and-Precise/>, 17.05.2022.
12. Frezarko-wiertarka wykonana w przydomowym warsztacie: https://www.youtube.com/watch?v=bKREUByofzE&ab_channel=IvanMiranda, 15.05.2022.
13. Serwis internetowy SystemCNC - Silnik krokowy Nema 23: <https://systemcnc.pl/silniki-krokowe/34-sv-silnik-krokowy-nema-23-175oz.html>, 31.10.2022.
14. Serwis internetowy Embia - Śruby i nakrętki SFU: <https://www.ebmia.pl/13086-sruby-i-nakretki-sfu>, 31.10.2022.
15. Serwis internetowy Vevor - Wrzeczono frezarskie VEVOR CNC: https://www.vevor.pl/silnik-wrzeczona-c_10130/, 31.10.2022.
16. Serwis internetowy Embia - Wózki i prowadnice liniowe HGL: <https://www.ebmia.pl/9003-wozki-hgl>, 31.10.2022.