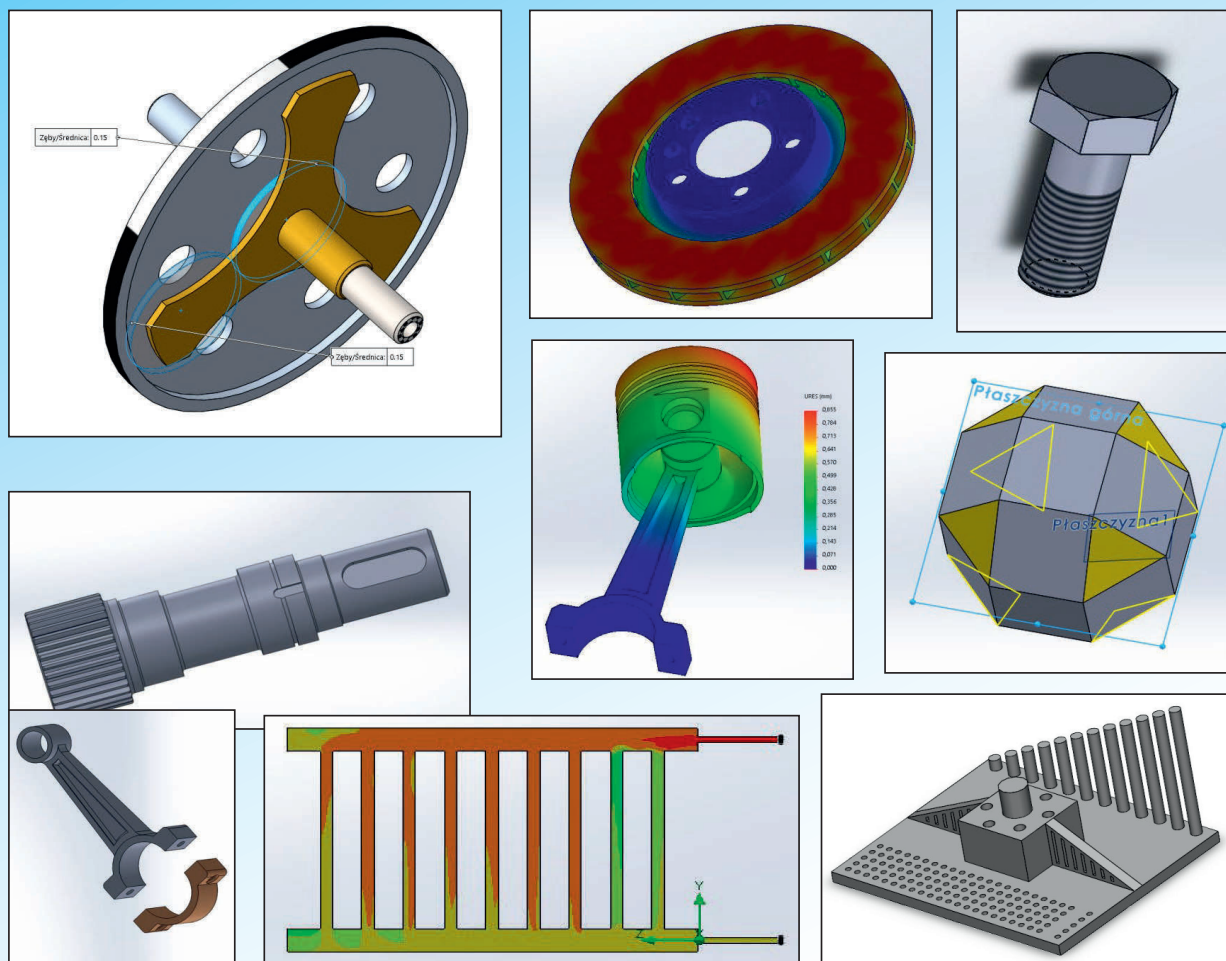


Krzysztof WACŁAWIAK
Grzegorz JUNAK
Anżelina MAREK

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE W MODELOWANIU I OBLICZENIACH INŻYNIERSKICH Z WYKORZYSTANIEM OPROGRAMOWANIA SOLIDWORKS

Część I



GLIWICE 2024

MONOGRAFIA



Krzysztof WACŁAWIAK
Grzegorz JUNAK
Anżelina MAREK

**KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE
W MODELOWANIU I OBLICZENIACH
INŻYNIERSKICH Z WYKORZYSTANIEM
OPROGRAMOWANIA SOLIDWORKS**

Część I

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
GLIWICE 2024
UIW 48600

Opiniodawcy

Dr hab. inż. Dawid CEKUS, prof. Politechniki Częstochowskiej

Dr hab. inż. Ireneusz WRÓBEL, prof. Akademii Techniczno-Humanistycznej
w Bielsku-Białej

Kolegium redakcyjne

REDAKTOR NACZELNY – Dr hab. inż. Barbara KULESZ, prof. PŚ

REDAKTOR DZIAŁU – Dr hab. inż. Agnieszka SZKLINIARZ, prof. PŚ

SEKRETARZ REDAKCJI – Mgr Monika MOSZCZYŃSKA-GŁOWACKA

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Śląskiej

Publikacja finansowana z projektu Nr 11/030/RGM24/1188

Redakcja językowa

Mgr Joanna BULSKA

Redakcja techniczna

Ewa TENEROWICZ

Opracowanie edytorskie

Joanna JENCZEWSKA-PAJKA

Projekt okładki

Tomasz LAMORSKI

ISBN 978-83-7880-904-3

© Copyright by

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej

Gliwice 2024

SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE	7
1. PODSTAWY RYSOWANIA ELEMENTU BRYŁOWEGO	9
2. TWORZENIE ZŁOŻEŃ.....	16
3. RYSUNEK WYKONAWCZY	24
4. WYKORZYSTANIE SZYKU W SZKICU ORAZ ELEMENTACH BRYŁOWYCH	34
5. ANALIZA PŁASKICH UKŁADÓW SIŁ NA PRZYKŁADZIE BELKI.....	46
6. UŻYCIEM „KALKULATORA BELKI” W PRZYKŁADOWYCH OBLICZENIACH PROJEKTOWO-SPRAWDZAJĄCYCH	58
7. BRYŁA RYSOWANA Z WYKORZYSTANIEM DODATKOWYCH PŁASZCZYZN	66
8. WIEŁOŚCIENNA KOSTKA SZKLANA JAKO PRZYKŁAD STOSOWANIA RÓŻNYCH TECHNIK MODELOWANIA.....	70
9. PRZENIKAJĄCE SIĘ BRYŁY RYSOWANE ZE SZKICU RĘCZNEGO	79
10. KONFIGURACJE – TABELY KONFIGURACJI	81
11. MODELOWANIE UKŁADÓW MECHANICZNYCH NA PRZYKŁADZIE MECHANIZMU WAHADŁA I TAKTOMETRU	90
12. MODELOWANIE MECHANIZMU KORBOWO-WODZIKOWEGO.....	97
13. ZAPIS CECH KONSTRUKCYJNYCH KOŁA ZĘBATEGO – ZĘBNIK	102
14. MODELOWANIE POŁĄCZENIA WCISKOWEGO TARCZY NA WALE.....	110
15. BUDOWA ORAZ ANALIZA RUCHU UPROSZCZONEGO MODELU MASZYNY TŁOKOWEJ.....	116
16. MODELOWANIE PRZEKŁADNI OBIEGOWEJ PLANETARNEJ	127
17. ANALIZA WIELOWARIANTOWA PROSTEGO ELEMENTU KONSTRUKCYJNEGO	135
18. ANALIZA STANU NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA ELEMENTU KONSTRUKCYJNEGO – WSPORNIK.....	143

19. ANALIZA TERMICZNA OBIEKTU ZŁOŻONEGO – TARCZA HAMULCOWA	148
20. WSTĘP DO SOLIDWORKS FLOWSIMULATION.....	154
21. OBLICZENIA CIEPLNO-PRZEPLYWOWE WYMIENNIKA CIEPŁA	157
BIBLIOGRAFIA	163
Streszczenie	164

CONTENTS

INTRODUCTION	7
1. BASIC DRAWING OF A SOLID ELEMENT	9
2. CREATE ASSEMBLY	16
3. EXECUTION DRAWING	24
4. USE OF A PATTERN IN THE SKETCH AND SOLID ELEMENTS	34
5. ANALYSIS OF A FLAT SYSTEM OF FORCE ON THE EXAMPLE OF A BEAM	46
6. USE OF THE „BEAM CALCULATOR” IN EXAMPLE DESIGN AND CHECK CALCULATIONS	58
7. A SOLID DRAWN USING ADDITIONAL PLANES	66
8. POLYHED GLASS CUBES AS AN EXAMPLE OF THE USE OF VARIOUS DRAWING TECHNIQUES	70
9. PERFECTING BOLDS DRAWN FROM A HAND SKETCH	79
10. CONFIGURATIONS – CONFIGURATION TABLES.....	81
11. MODELING OF MECHANICAL SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF A PENDULUM MECHANISM AND TACTOMETER	90
12. MODELING OF THE CRANK AND TRIM MECHANISM	97
13. RECORD OF THE CONSTRUCTION FEATURES OF THE GEAR.....	102
14. MODELING OF THE SHAFT PUSH JOINT OF THE SHIELD	110
15. CONSTRUCTION AND MOTION ANALYSIS OF A SIMPLIFIED MODEL OF A PISTON MACHINE	116
16. PLANETARY GEAR MODELING	127
17. MULTI-VARIANT ANALYSIS OF A SIMPLE STRUCTURAL ELEMENT....	135
18. STRESS AND DEFORMATION ANALYSIS OF A STRUCTURAL ELEMENT – SUPPORT.....	143
19. THERMAL ANALYSIS OF A COMPLEX OBJECT – BRAKE DISC	148
20. INTRODUCTION TO SOLIDWORKS FLOWSIMULATION.....	154

21. THERMAL-FLOW CALCULATIONS OF THE HEAT EXCHANGER.....	157
BIBLIOGRAPHY	163
Abstract	165

WPROWADZENIE

Grafika inżynierska to dużo więcej niż kontynuacja rysunku technicznego przy wykorzystaniu współczesnej techniki komputerowej. Dostępność specjalistycznego oprogramowania uczyniła łatwym wykorzystanie wiedzy z dziedziny geometrii zarówno na płaszczyźnie, jak i w przestrzeni do tworzenia modeli elementów maszyn o topologii trudnej do wyobrażenia, a co dopiero narysowania. Z jednej strony jest to doskonałe narzędzie ilustracyjne, tworzące tło do gier komputerowych i wizualizacji procesów przemysłowych, z drugiej zaś przygotowane modele brył są danymi geometrycznymi do analizy numerycznej procesów fizycznych, począwszy od analizy statycznej, przez termiczną, analizę drgań, wyboczenia, poprzez kinematykę i dynamikę ruchu mechanizmów, jak również analizę przepływu płynów. Możliwości, jakie daje nam specjalistyczne oprogramowanie CAD, pozwalają na znacznie lepsze zrozumienie budowania złożonych elementów maszyn, jak również relacji pomiędzy poszczególnymi obiektami w złożeniach. Dostajemy możliwość przeanalizowania geometrii bez konieczności posiadania obiektu rzeczywistego. Możemy ją wielokrotnie korygować i modyfikować w celu uzyskania optymalnego efektu. Niejednokrotnie byłoby to niemożliwe bez użycia powyższego oprogramowania. Nieocenione w analizie inżynierskiej staje się również przeprowadzenie różnego rodzaju symulacji metodą elementów skończonych, uwzględniających oddziaływanie czynników (obciążeń) zewnętrznych. Pozwala to na pełną analizę odzwierciedlającą zachowanie się obiektu w warunkach rzeczywistych. Musimy mieć jednak świadomość, że jest to tylko narzędzie i sukces, jaki planujemy osiągnąć, w bardzo dużej mierze zależy od naszego przygotowania i solidnej podbudowy teoretycznej obejmującej analizowane zjawiska. Nie jest bowiem możliwe przeprowadzenie poprawnych analiz bez rzetelnej znajomości zjawisk fizycznych i mechanicznych.

Niniejsza monografia wykorzystuje do rozwiązywania tego typu problemów oprogramowanie SolidWorks firmy Dassault Systems. Pakiet użyty w przygotowaniu tej monografii – wersja SolidWorks Education – zawiera wszystkie podstawowe

moduły zarówno do tworzenia geometrii płaskiej i przestrzennej, jak i narzędzia do przeprowadzenia zaawansowanych symulacji numerycznych. Pakiet pozwala na edukacyjne wykorzystanie oprogramowania. Zajęcia te odbywają się dla studentów kierunków: inżynieria materiałowa, informatyka przemysłowa, zarządzanie i inżynieria produkcji w ramach grupy przedmiotów z zakresu: komputerowej grafiki inżynierskiej, projektowania CAD/CAM, komputerowego wspomaganie w obliczeniach inżynierskich.

Monografia zawiera 21 rozdziałów. W pierwszej części omawiane są podstawy wykorzystania oprogramowania do tworzenia modeli 3D CAD części maszyn. W drugiej pokazano tworzenie dokumentacji 2D technicznej tych części, jak również wykorzystanie tworzonych modeli geometrycznych do obliczeń belek oraz analizy zjawisk fizycznych na przykładzie nagrzewania się tarczy hamulcowej, obciążenia konstrukcji wspornika, konstrukcji koła zębatego oraz tworzenia wariantowej konstrukcji śruby. W trzeciej części przedstawiono przykłady złożenia nieruchomych, przenikających się elementów oraz ruchomych, takich jak wahadło fizyczne, mechanizm korbowo-wodzikowy, przekładnia planetarna, a także trzycylindrowej maszyny tłokowej. Dodano również rozdziały dotyczące zarysu symulacji cieplno-przepływowych modułem FlowSimulation. Jako przykład wybrano wymiennik ciepła typu kaloryfer.

Autorzy składają podziękowanie studentom wymienionych specjalności za uwagi do przygotowanego materiału, a w szczególności Martynie Fleischer i Aleksandrze Kobli.

1. PODSTAWY RYSOWANIA ELEMENTU BRYŁOWEGO

Cel główny ćwiczenia: utworzenie modelu 3D.

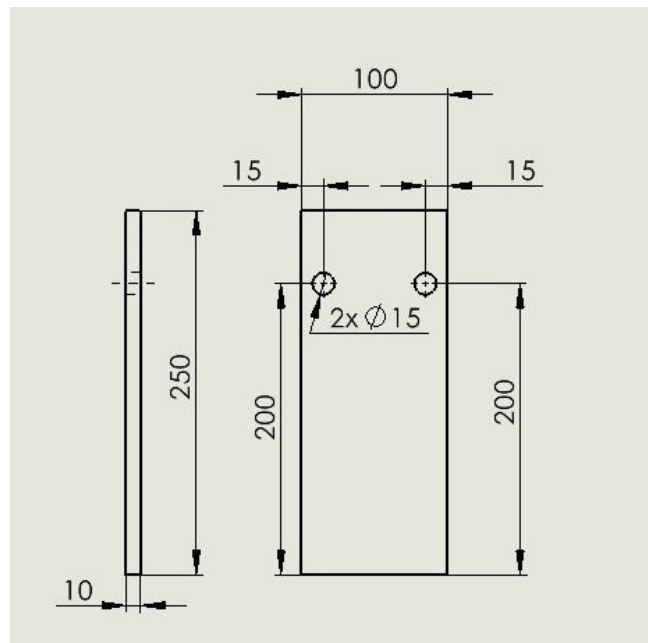
Cel pomocniczy ćwiczenia: zapoznanie się z podstawowymi narzędziami używanymi do tworzenia rysunku 2D oraz narzędziami wykorzystywanymi do tworzenia brył.

Zakres ćwiczenia:

- rysowanie prostych figur geometrycznych;
- nadawanie relacji liniom, okręgom oraz relacji pomiędzy okręgami, punktami, linią i okręgami;
- zastosowanie podstawowych narzędzi do tworzenia bryły.

Opis zadania

Zamodeluj element pokazany na rys. 1.



Rys. 1. Rysunek techniczny elementu
Fig. 1. Technical drawing of the element

Etapy tworzenia elementu

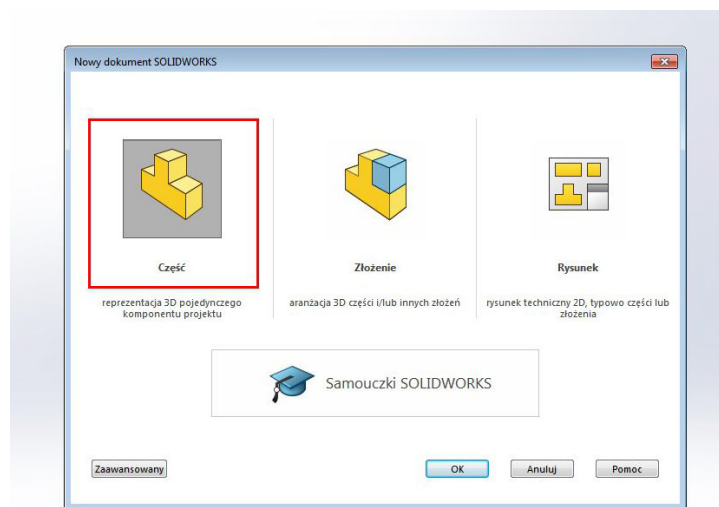
Aby zamodelować element pokazany na rys. 1, należy najpierw wykonać szkic 2D zgodnie z niżej wymienionymi podpunktami.

- **Otwarcie modułu „Część”**

Aby utworzyć model w programie SolidWorks, należy wybrać moduł „Część” (rys. 2).

- **Rysowanie szkicu 2D i jego wymiarowanie**

Pierwszym etapem tworzenia modelu 3D jest rysowanie modelu 2D, a następnie wyciągnięcie tego modelu do bryły 3D. Dlatego też najpierw należy narysować prostokąt. Aby go narysować, należy wybierać płaszczyznę, na której będzie on rysowany, a następnie należy kliknąć na narzędzie „Szkic” (rys. 3).



Rys. 2. Wybrany moduł
Fig. 2. Selected module

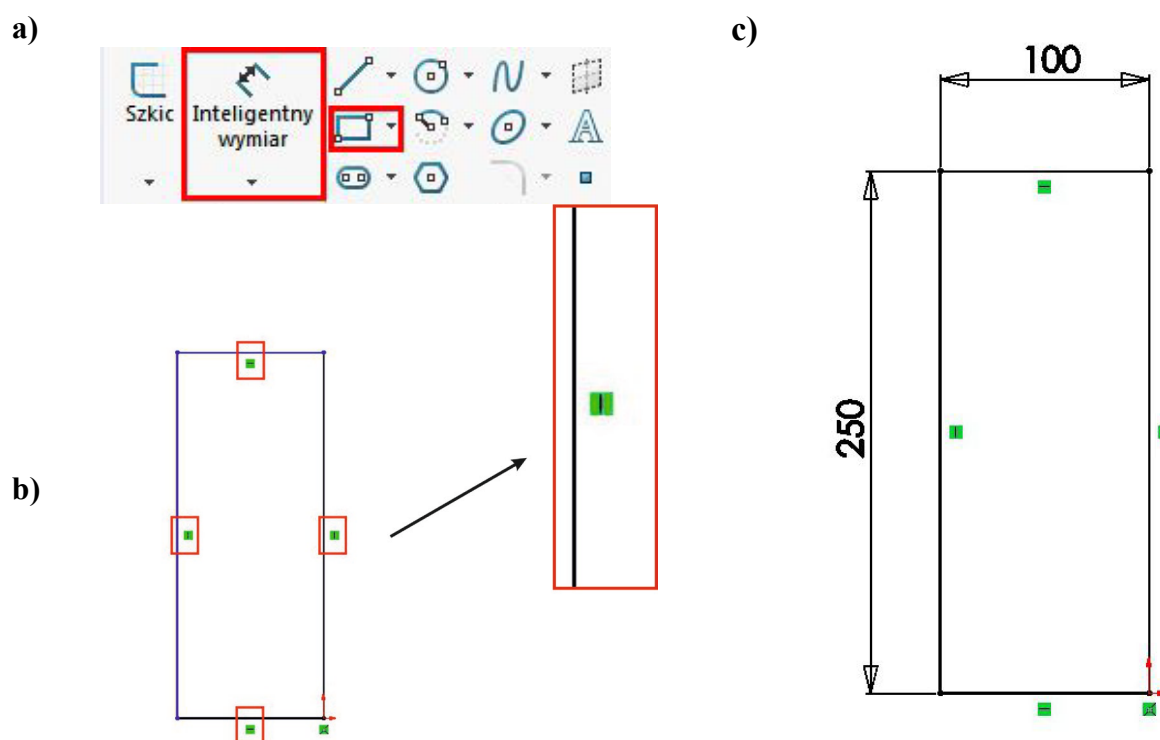


a)

b)

Rys. 3. Opcje narzędzia „Szkic”: wybór rodzaju szkicu (a) i wybór płaszczyzny (b)
Fig. 3. Sketch” tool options: select sketch type (a) and select plane (b)

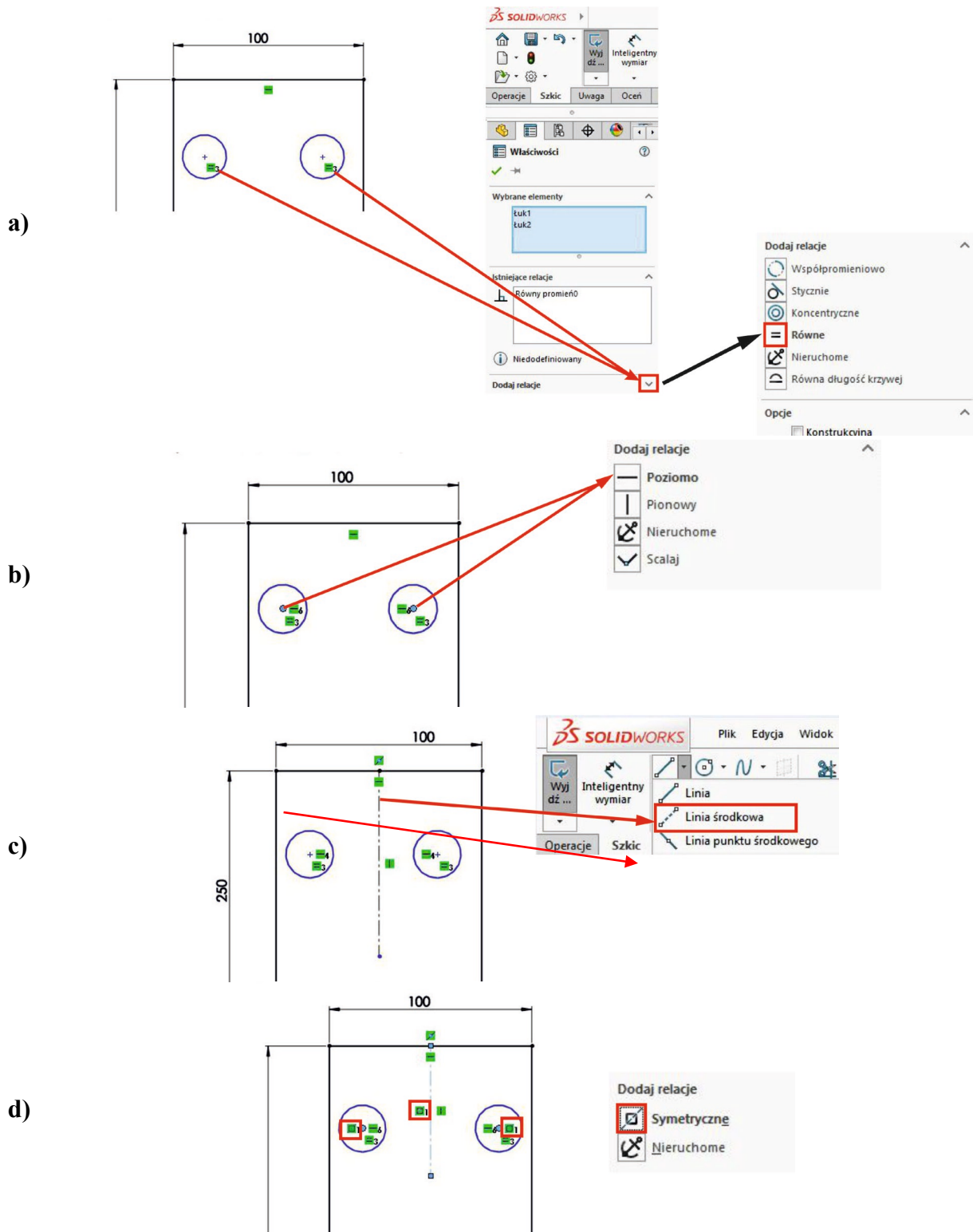
Następnie należy narysować prostokąt, korzystając z dostępnych opcji (rys. 4a). Po włączeniu opcji „Automatyczne relacje” (Narzędzia/Opcje systemu/Szkic//Relacje/Przyciąganie) program SolidWorks automatycznie nadaje relacje podczas rysowania szkicu 2D. Przykład nadawania relacji przez program pokazano na rys. 4b. Obok linii poziomych i pionowych można zauważyć ikonki nadanych relacji (symbole relacji znajdują się na zielonym polu). Aby prostokąt był w pełni zwymiarowany, należy zdefiniować długość poszczególnych odcinków oraz zablokować jeden punkt (odebranie wszystkich stopni swobody). Można również uzyskać ten sam efekt, umieszczając jeden z punktów w początku układu współrzędnych lub określając położenie punktu w układzie współrzędnych. Szkic niezdefiniowany podświetlony jest na niebiesko, szkic w pełni zdefiniowany podświetlony jest na czarno, a przedefiniowany – na pomarańczowo lub czerwono. Na szaro jest zaznaczany wymiar powielony. Następnie należy zwymiarować szkic, wybierając ikonkę Inteligentny wymiar (patrz rys. 4a).



Rys. 4. Etapy rysowania prostokąta: okno narzędziowe „Szkic” (a), prostokąt nie w pełni zdefiniowany (b), prostokąt w pełni definiowany (c)

Fig. 4. Stages of drawing a rectangle: „Sketch” tool window (a), rectangle not fully defined (b), fully defined rectangle (c)

W dalszej kolejności należy narysować okręgi, a następnie nadać im odpowiednie relacje i je zwymiarować. Na rys. 5 przedstawiono kolejne kroki wymiarowania okręgów. Na rys. 5b umieszczono możliwe relacje pomiędzy dwoma okręgami. Z dostępnych możliwości wybieramy „Równe”.

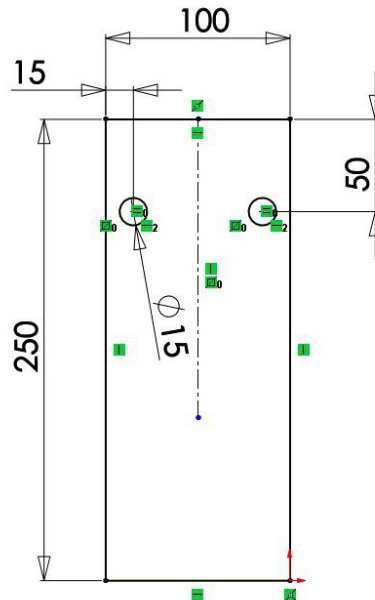


Rys. 5. Relacje pomiędzy okręgami: równa średnica (a), środki okręgów na tej samej wysokości (b), dodawanie linii środkowej (c), ustawienie symetryczne dwóch środków okręgów względem siebie (d)

Fig. 5. Relations between circles: equal diameter (a), centers of circles at the same height (b), adding a centerline (c), symmetrical setting of two circle centers relative to each other (d)

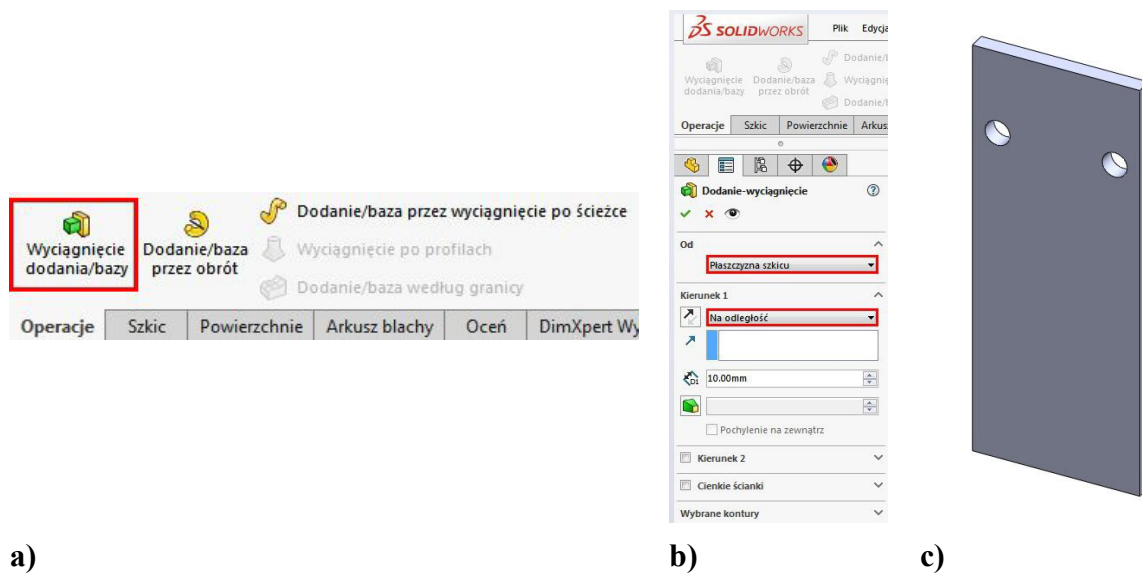
Uwaga: Aby zaznaczyć dwa lub więcej obiektów na szkicu, należy zaznaczać obiekty, przytrzymując jednocześnie przycisk „Shift” lub „Ctrl”.

Następnie należy zaznaczyć środki okręgów oraz relację „Poziomo”. W kolejnym kroku należy umieścić symetrycznie względem siebie okręgi. Aby to zrobić, należy najpierw dodać linię środkową (etapy dodawania relacji przedstawiono na rys. 5), a potem dodać brakujące wymiary (rys. 6).



Rys. 6. Wymiarowanie szkicu 2D
Fig. 6. Dimensioning a 2D sketch

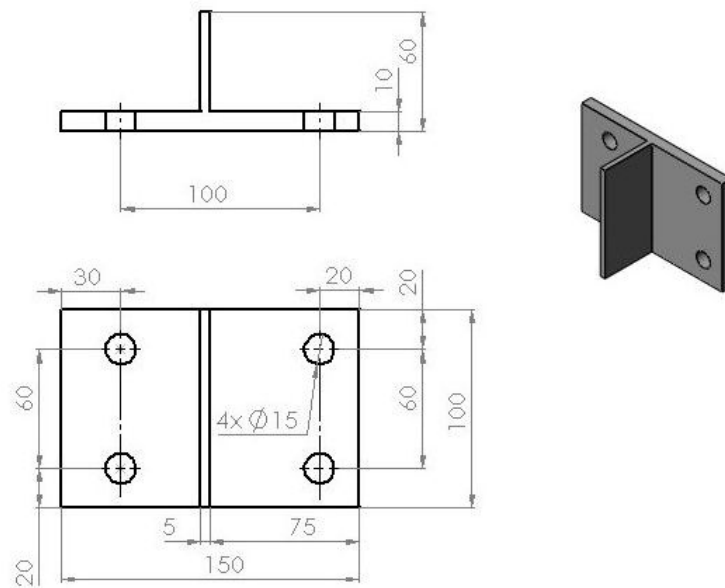
W dalszej kolejności ze szkicu 2D należy utworzyć bryłę. Bryła jest tworzona za pomocą funkcji „Wyciągnięcie dodania/bazy” z zakładki „Operacje” (rys. 7).



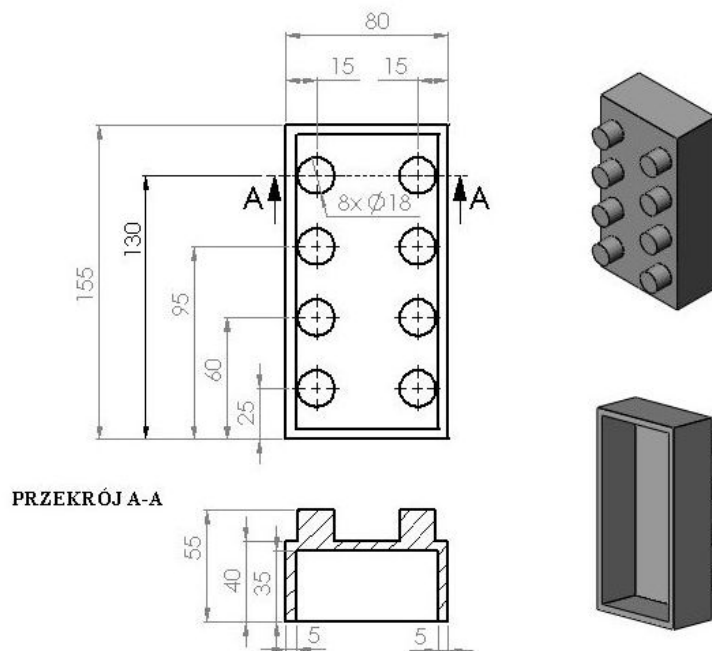
Rys. 7. Narzędzie „Wyciągnięcie dodania/bazy”: ikona (a), dostępne funkcje (b) i model 3D (c)
Fig. 7. „Extruded boss/base” tool: icon (a), available functions (b) and 3D model (c)

Zadania do wykonania

Zamodeluj elementy przedstawione na rys. 8–10.

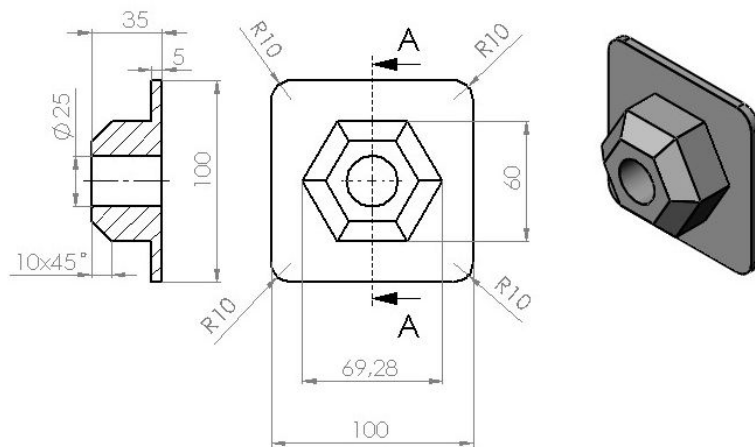


Rys. 8. Element do samodzielnego wykonania
Fig. 8. Element for self-execution



Rys. 9. Element do samodzielnego wykonania
Fig. 9. Element for self-execution

PRZEKRÓJ A-A



Rys. 10. Elementy do samodzielnego wykonania
Fig. 10. Elements for self-execution

2. TWORZENIE ZŁOŻEŃ

Cel główny ćwiczenia: utworzenie złozenia składającego się z 4 części.

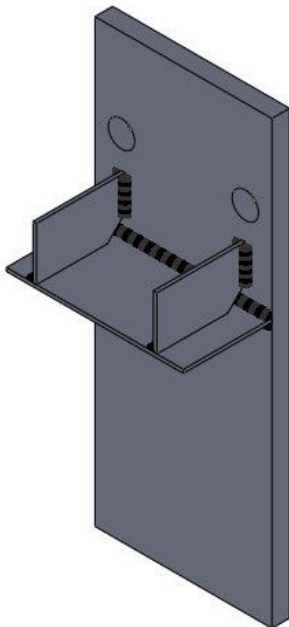
Cel pomocniczy ćwiczenia: zapoznanie się z narzędziami używanymi do tworzenia złozenia.

Zakres ćwiczenia:

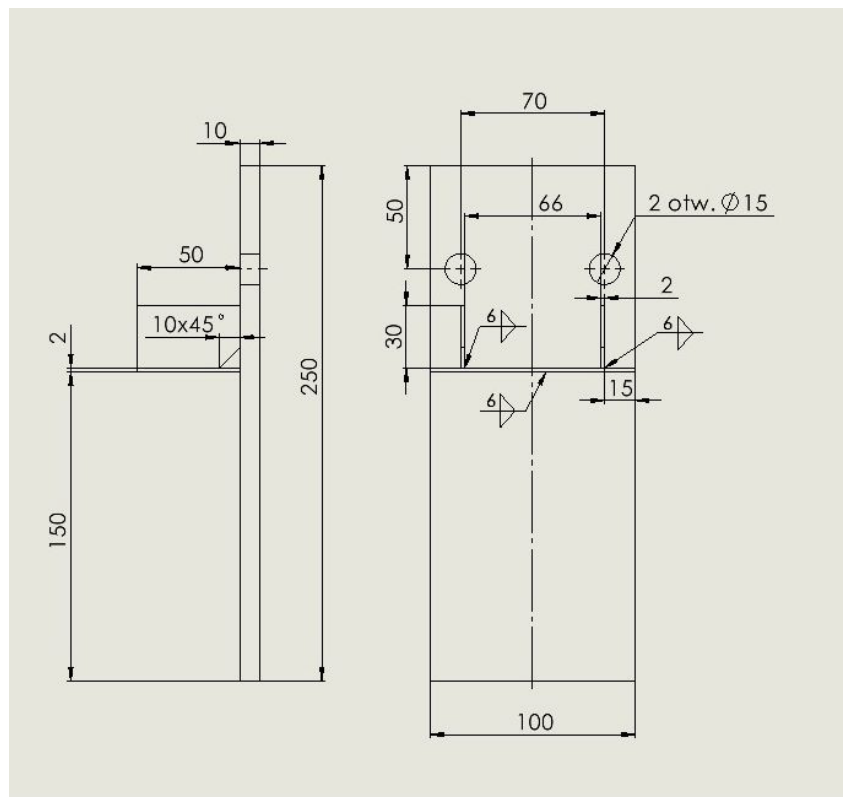
- tworzenie złożeń;
- wstawienie pojedynczych części (elementów);
- dodawanie wiązań (np. relacji typu wspólne, równoległe, symetryczne);
- zastosowanie opcji „Ścieg spoiny”;
- dodawanie adnotacji na złozeniu.

Opis zadania

Wykonaj złozenie składające się z 4 części (rys. 11).



a)



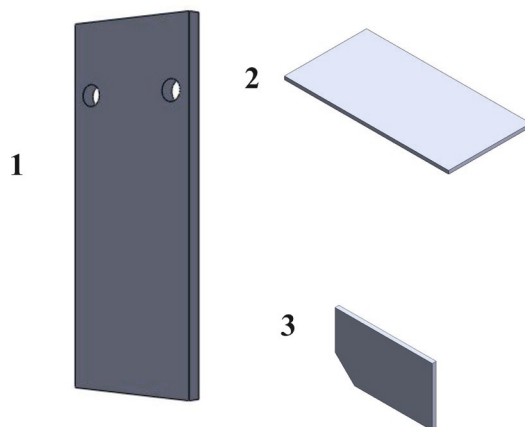
b)

Rys. 11. Złozenie
Fig. 11. Assembly

Etapy tworzenia złozenia

- **Wykonanie elementów w module „Część”**

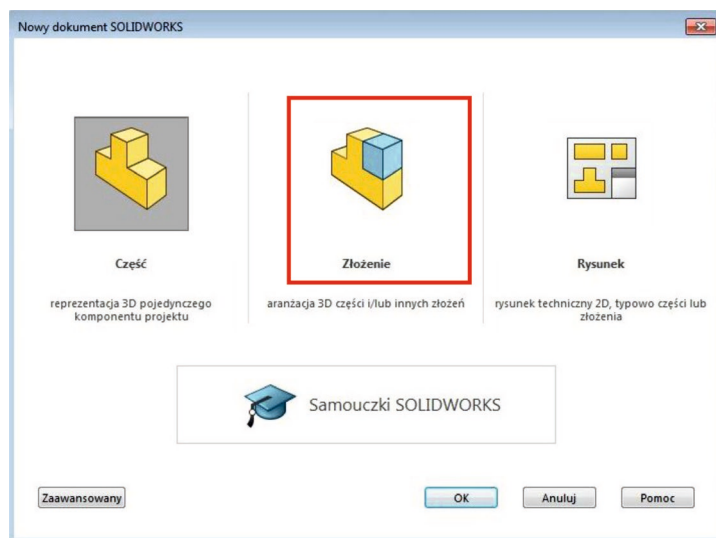
Każdy z elementów należy wykonać osobno w module „Część” (rys. 12), a następnie połączyć je ze sobą, wykorzystując w tym celu moduł „Złozenie”.



Rys. 12. Pojedyncze elementy tworzące złozenie
Fig. 12. Individual elements making up an assembly

- **Utworzenie złozenia**

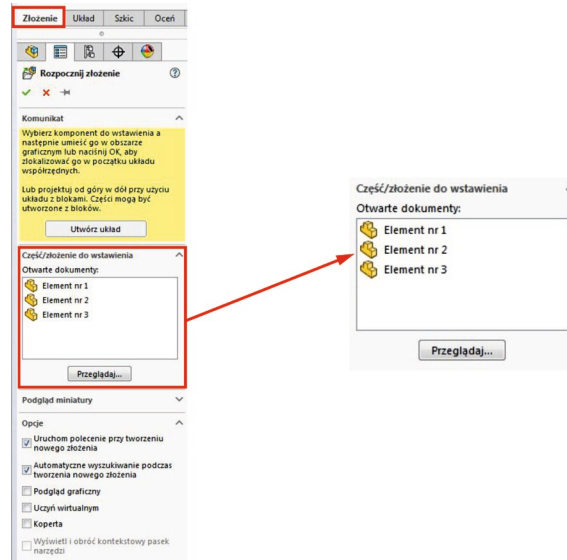
Aby utworzyć nowe złozenie, należy wybrać moduł „Złozenie” (rys. 13).



Rys. 13. Wybrany moduł
Fig. 13. Selected module

- **Dodawanie części**

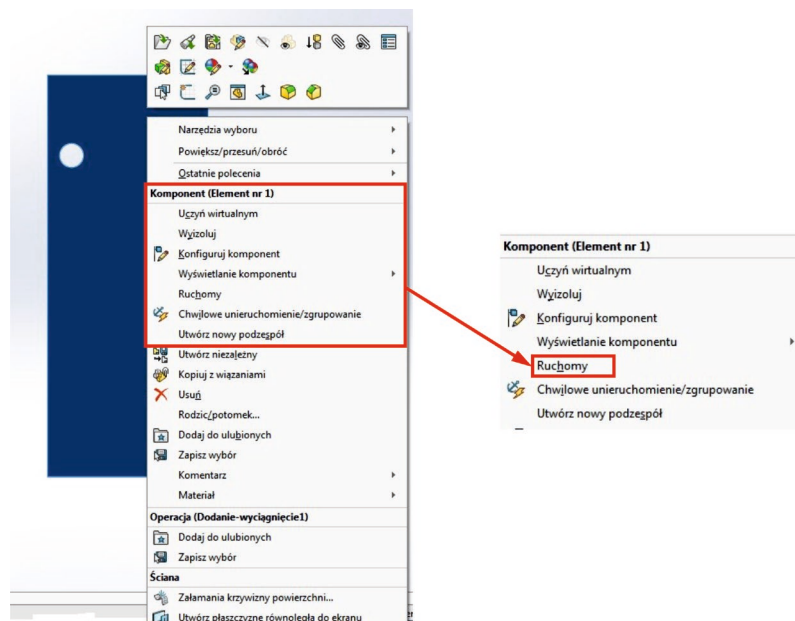
Aby dodać część w module „Złozenie”, należy wybrać z zakładki „Złozenie” opcję „Wstaw komponenty” lub po otwarciu modułu można w tym celu wykorzystać opcję wstawiania części dostępną podczas otwierania modułu (rys. 14).



Rys. 14. Dodawanie pierwszej części w złożeniu, gdy mamy otwarte pliki pojedynczych części złożenia (Element nr 1, Element nr 2 i Element nr 3)

Fig. 14. Adding the first part in an assembly when we have files of single assembly parts open (Element nr 1, Element nr 2 i Element nr 3)

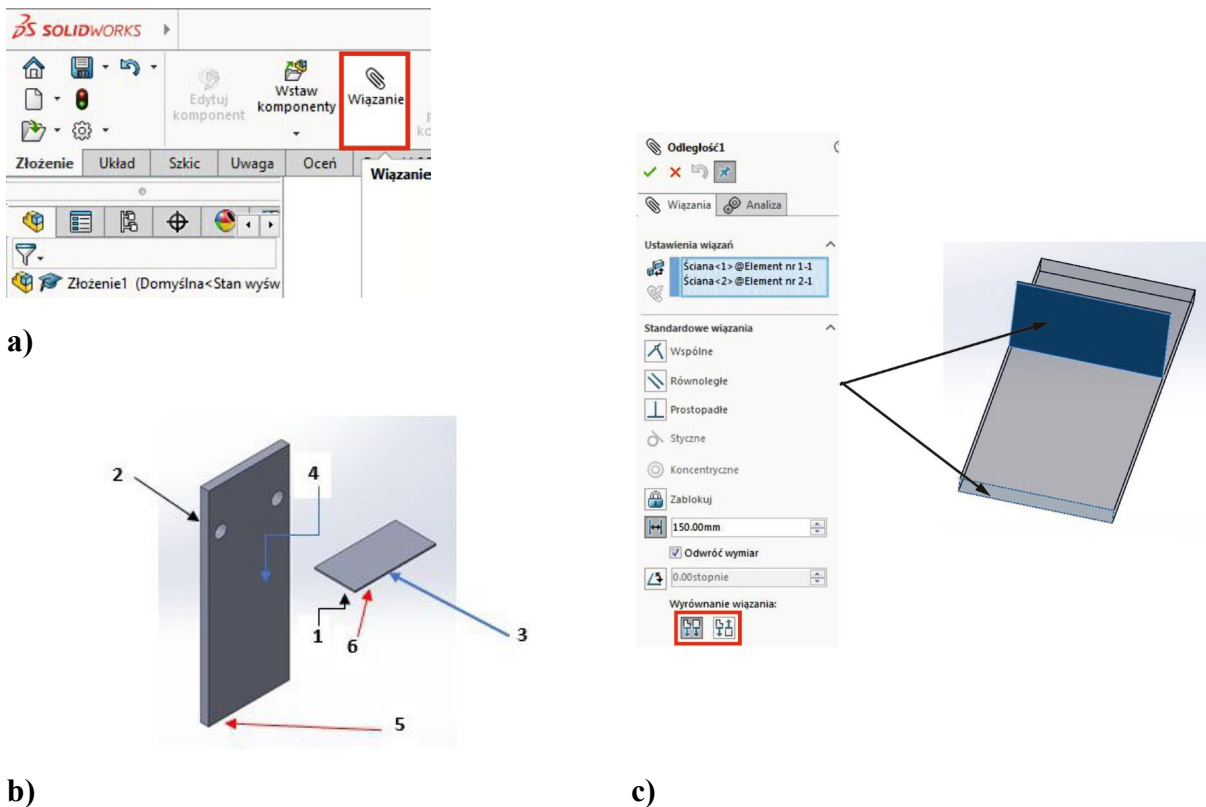
Aby umieścić „Element nr 1” w założeniu, należy podświetlić element, a następnie kliknąć w miejsce, w którym chcemy go umieścić. Pierwszy element jest zawsze zablokowany (nie ma możliwości jego przemieszczania; wynika to z ustawień programu). Można zmienić dowolny element nieruchomy na ruchomy, klikając prawym przyciskiem myszki na obiekt i wybierając opcję „Ruchomy” (rys. 15).



Rys. 15. Odblokowanie możliwości przemieszczania się pierwszej części umieszczonej w złożeniu

Fig. 15. Float the movement of the first part placed in the assembly

Następnie należy dodać kolejne części złożenia, wybierając opcję „Wstaw komponenty” z zakładki „Złożenie” (rys. 14). Po wstawieniu części „Element nr 2” (rys. 12) należy zdefiniować relacje pomiędzy elementem nr 1 a elementem nr 2 (rys. 16b), korzystając z opcji „Wiązanie” (rys. 16a). Program SolidWorks automatycznie proponuje relację, pomiędzy częściami. W tabeli 1 zamieszczono relacje, które nadano między kolejnymi powierzchniami. Powierzchnie, między którymi ustawiono relacje, zostały ponumerowane. Na rys. 16c przedstawiono opcje wybrane podczas dodawania 3 relacji (tabela 1).



Rys. 16. Dodawanie wiązań: narzędzie „Wiązania” (a), powierzchnie, między którymi nadano relacje (b) oraz dodawanie relacji nr 3 – tab. 1 (c)

Fig. 16. Adding mates: „Mates” tool (a), surfaces between which mates were given (b) and adding mate no. 3 – tab. 1 (c)


Uwaga: Aby wpisać odległość między powierzchniami, najpierw należy włączyć  przycisk.

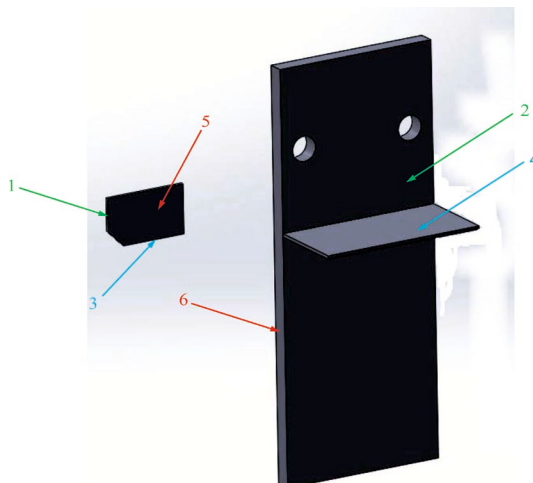
Tabela 1

Relacje w utworzonym złożeniu

Lp.	Wybrane powierzchnie	Relacja
1	1 (bok) i 2 (bok)	Wspólne
2	3 (tył) i 4 (przód)	Wspólne
3	5 (dół) i 6 (dół)	Równoległe (odległość 150 mm)

Uwaga: Jeśli jeden z elementów znajduje się po niewłaściwej stronie, należy użyć opcji zmieniającej zwrot. Na rys. 16 opcja ta została zaznaczona na czerwono. Zmieniamy w ten sposób zwrot wektorów normalnych do ścian, które definiują to wiązanie.

Następnie należy dodać element 3 oraz wiązania między poszczególnymi powierzchniami przedstawionymi na rys. 17. Relacje pomiędzy tymi powierzchniami zostały opisane w tabeli 2.



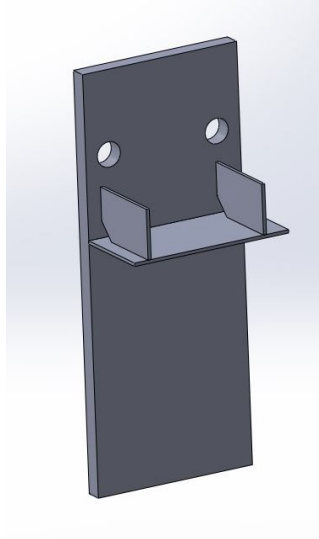
Rys. 17. Powierzchnie, między którymi nadano relacje
Fig. 17. The surfaces between which mates were given

Tabela 2

Relacje w utworzonym złożeniu

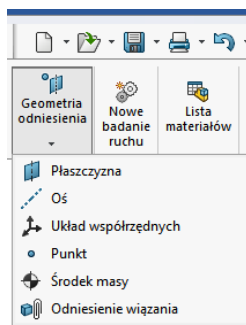
Lp.	Wybrane powierzchnie	Relacja
1	1 (bok) i 2 (przód)	Wspólne
2	3 (dół) i 4 (górze)	Wspólne
3	5 (przód) i 6 (bok)	Równoległe (odległość 20 mm)

Następnie należy dodać po raz drugi element nr 3 (rys. 18). W dalszej kolejności należy nadać takie same relacje jak w przypadku zębra 1 (rys. 16).

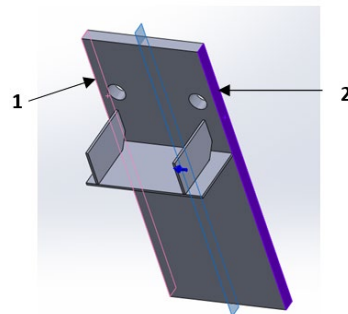


Rys. 18. Złożenie składające się z 4 części
Fig. 18. Assembly consisting of 4 parts

W dalszej kolejności należy ustawić żebra symetrycznie względem siebie. Aby zastosować ten rodzaj relacji, najpierw należy dodać „Płaszczyznę symetrii” z opcji „Geometria odniesienia” (rys. 19a). Po kliknięciu kolejno (bez wpisywania danych w okienku po lewej stronie) na ściany **1** i **2** automatycznie zostanie dodana płaszczyzna symetrii (rys. 19b).



a)



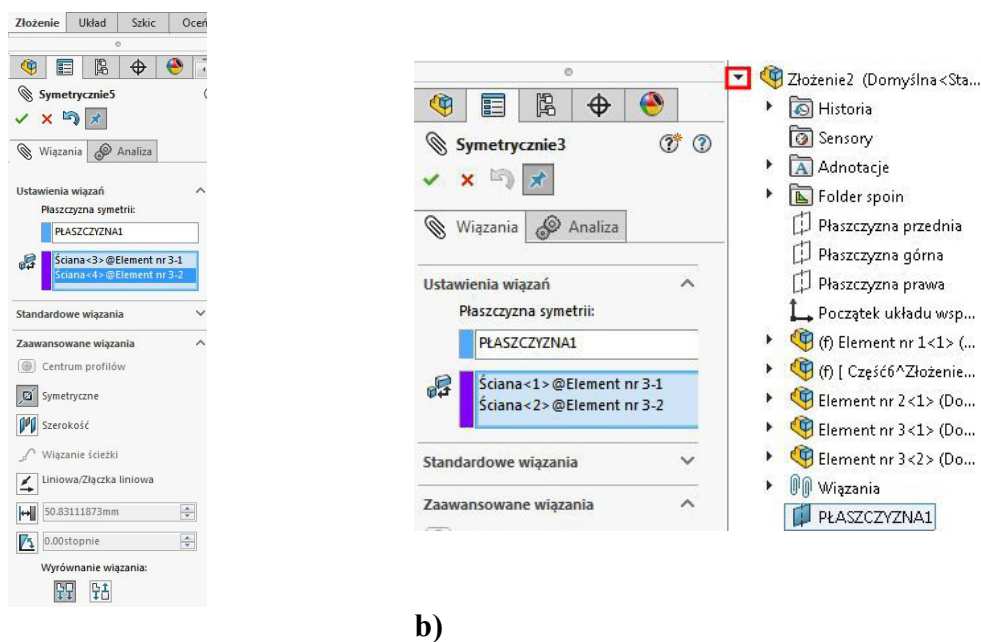
b)

Rys. 19. Opcje „Geometrii odniesienia” (a) oraz powierzchnie, które należy zaznaczyć, aby otrzymać płaszczyznę symetrii (b)

Fig. 19. „Reference geometry” options (a) oraz surfaces that should be selected to get the plane of symmetry (b)

Następnie należy dodać wiązanie „Symetryczne” z „Zaawansowanych wiązań”, zaznaczając po jednej powierzchni z każdego żebra (rys. 20a).

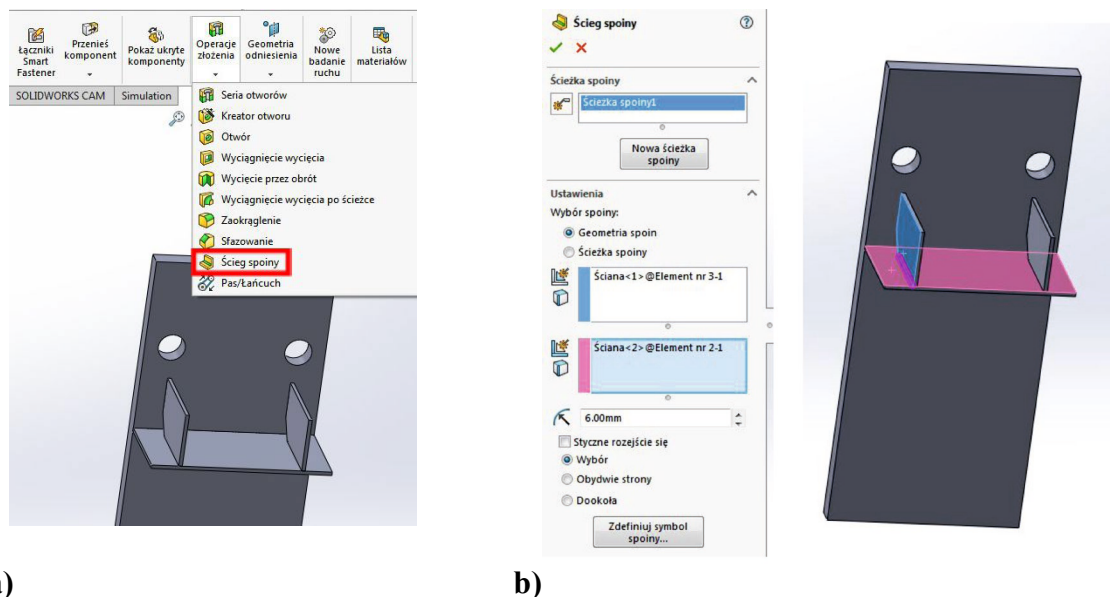
Uwaga: Jeśli nie ma możliwości wybrania bezpośrednio płaszczyzny symetrii, należy ją wybrać, rozwijając drzewko jak na rys. 20b.



Rys. 20. Opcje dostępne w „Zaawansowanych wiązaniach”
 Fig. 20. Options available in the „Advanced Mates”

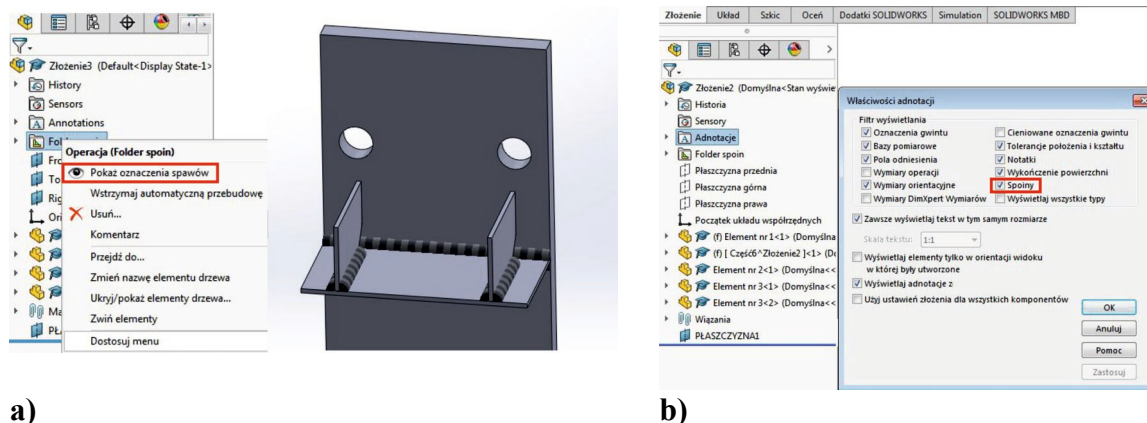
- **Dodawanie operacji połączenia spawanego**

Aby dodać informację o tym, że dwie części są ze sobą zespawane, należy z Opcji „Operacje złożenia” wybrać „Ścieg spoiny”, a następnie zaznaczyć powierzchnie, między którymi mają być spoiny (rys. 21). Chcąc dodać kolejną spoinę, należy kliknąć na ikonkę „Nowa ścieżka spoiny”.




Rys. 21. Etapy dodawania spawów
 Fig. 21. Stages of adding welds

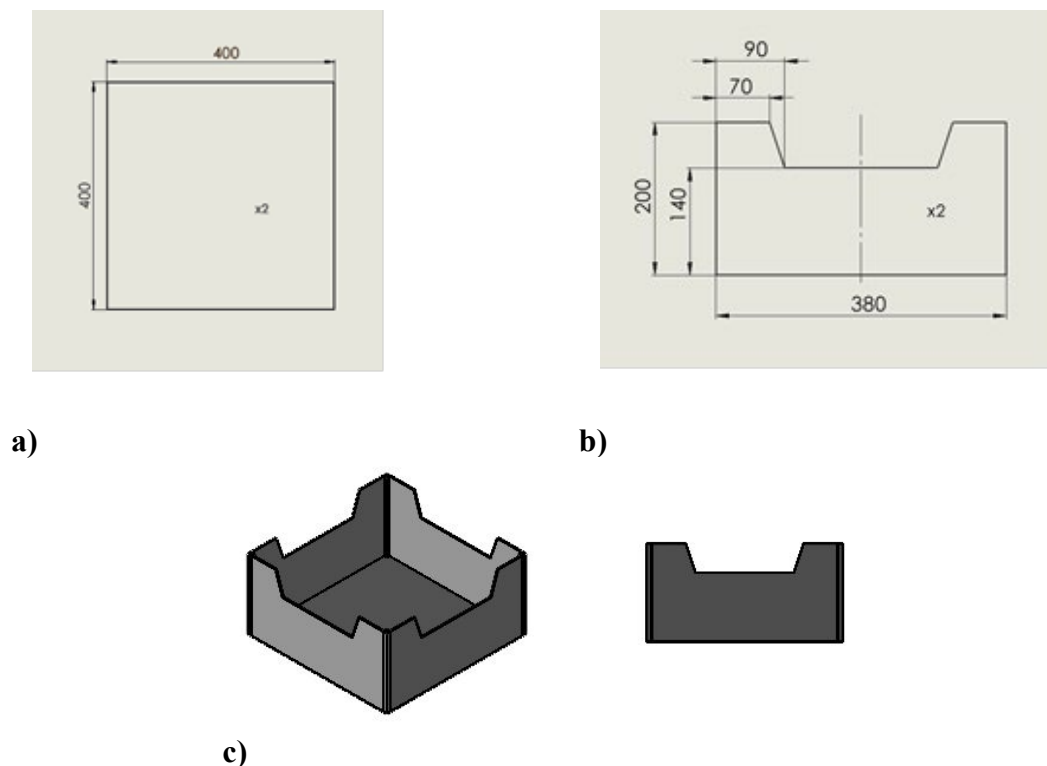
Jeśli chcemy, aby spoiny były zobrazowane, należy kliknąć na „**Folder spoin**”, a następnie na „Pokaż oznaczenia spawów” (rys. 22a). Z kolei jeśli chcemy, aby w złozeniu były widoczne oznaczenia spoin, należy z „Adnotacji” wybrać „Spoiny” (rys. 22b).



Rys. 22. Spoiny na złozeniu: widoczne spoiny (a) i widoczne oznaczenia spoin (b)
Fig. 22. Welds in the assembly: visible welds (a) and visible weld markings (b)

Zadania do wykonania

Utwórz skrzynkę składającą się z 4 prętów o wymiarach 10 x 10 mm i długości 200 mm oraz elementów, których wymiary przedstawiono na rys. 23. Wszystkie elementy są łączone ze sobą za pomocą spawania (spoina a4 ).



Rys. 23. Elementy składowe złozenia: płyta (a) i bok (b) oraz skrzynka (c)
Fig. 23. Components of the assembly: plate (a) and side (b) and a box (c)

3. RYSUNEK WYKONAWCZY

Cel główny ćwiczenia: wykonanie dokumentacji wybranego elementu.

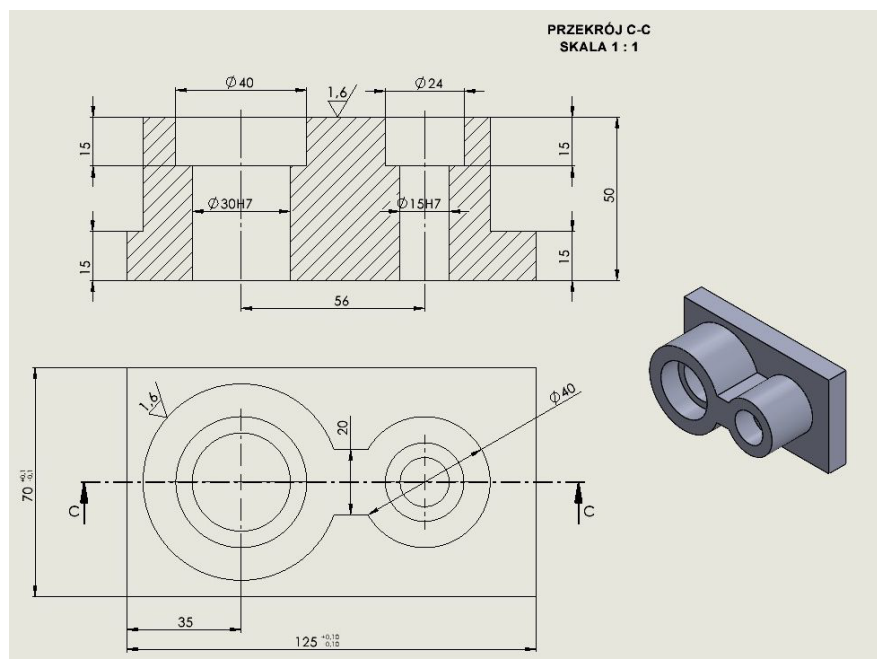
Cel pomocniczy ćwiczenia: zapoznanie się z etapami tworzenia dokumentacji technicznej oraz sposobem nanoszenia dodatkowych informacji na rysunku wykonawczym [2–3].

Zakres ćwiczenia:

- wybór arkusza;
- dodawanie rzutów;
- rzutowanie sposobem amerykańskim i europejskim;
- tworzenie przekrojów;
- dodawanie adnotacji oraz osi symetrii.

Opis zadania

Wykonaj dokumentację elementu przedstawionego na rys. 24.



Rys. 24. Dokumentacja elementu do utworzenia
Fig. 24. Documentation of the item to be created

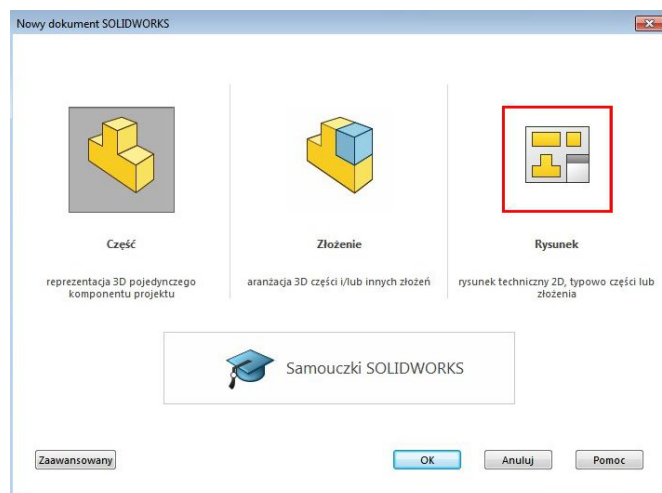
Etapy tworzenia rysunku wykonawczego

- Wykonanie modelu w programie SolidWorks z wykorzystaniem modułu „Część”

Uwaga: Rysunek wykonawczy można wykonać tylko dla modelu zapisanego.

- Utworzenie nowego rysunku

Należy wybrać „Rysunek” z dostępnych modułów (rys. 25).

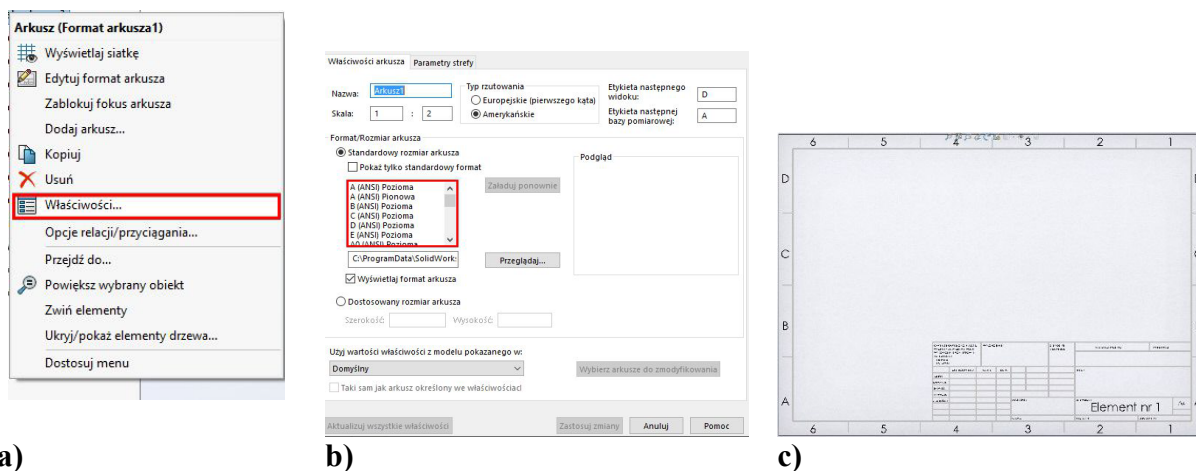


Rys. 25. Dostępne moduły w programie SolidWorks

Fig. 25. Available modules in the SolidWorks program

- Wybranie odpowiedniego arkusza

Należy wybrać odpowiedni rozmiar arkusza z dostępnych w bazie (rys. 26). W tym celu należy najpierw wybrać opcję „Sheet1” z drzewka znajdującego się po lewej stronie pulpitu. Następnie wybrać „Właściwości”. Podczas zaznaczenia „pokaż tylko podstawowe formaty” do wyboru dostępnych będzie tylko 5 formatów. Z kolei podczas zaznaczenia „wyświetl format arkusza” dostępny będzie arkusz z naniesionym obramowaniem i tabliczką, która będzie edytowalna (rys. 26c).



a)

b)


c)

Rys. 26. Formatowanie arkusza: opcje (a), dostępne formaty (b) oraz arkusz z tabliczką (c)

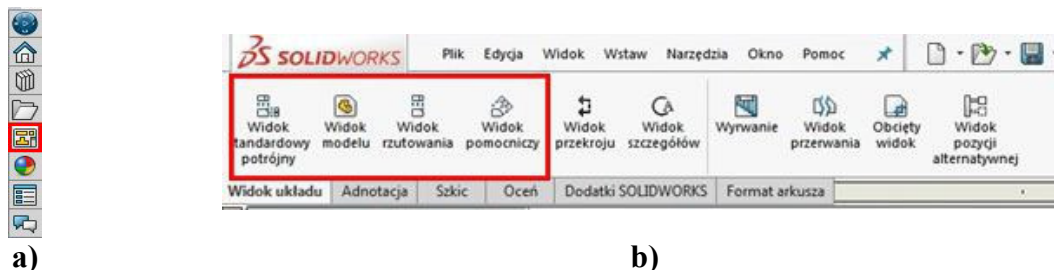
Fig. 26. Sheet formatting: options (a), available formats (b) and a sheet with a title block (c)

Następnie należy wybrać z dostępnych formatów „A4 (ANSI) Pozioma” oraz odznaczyć „Wyświetlaj format arkusza” jak na rys. 26b.

- **Dodawanie rzutów do rysunku**

Do rysunku można dodawać rzuty na dwa sposoby. Pierwszy polega na dodaniu rzutów przy wykorzystaniu palety widoków z prawej strony – ikona  (rys. 27a), a drugi na wykorzystaniu jednego z 4 narzędzi zaznaczonych na rys. 27b.

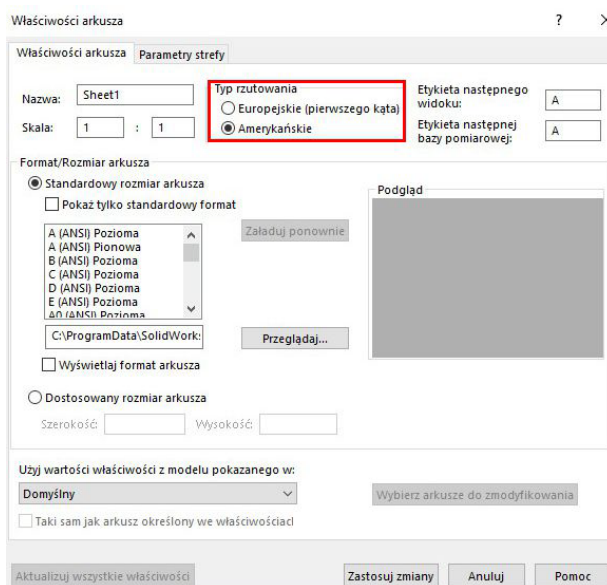
Uwaga: Przy otwarciu modułu „Rysunek” bezpośrednio po wykonaniu modelu dostępna jest automatycznie możliwość rzutowania.



Rys. 27. Narzędzia, za pomocą których dodajemy potrzebne widoki
Fig. 27. Tools with which we add the necessary views

- **Zmiana sposobu rzutowania**

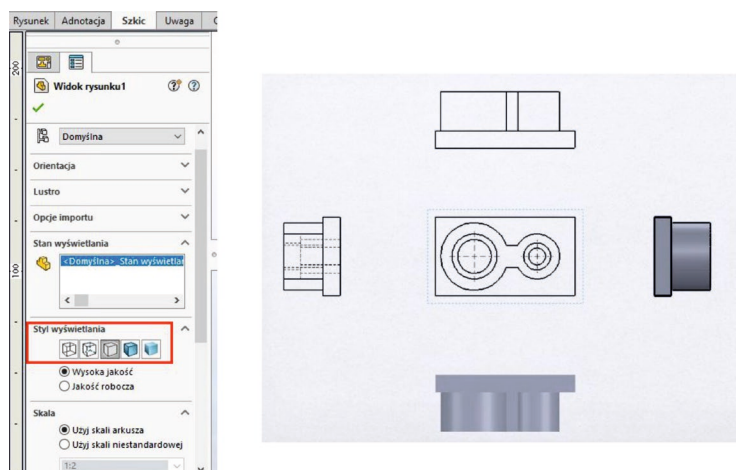
W programie SolidWorks jako domyślne ustawione jest rzutowanie amerykańskie. Dlatego chcąc wykonać rzutowanie sposobem europejskim, należy zmienić sposób rzutowania w ustawieniach. W tym celu należy wybrać z drzewka znajdującego się po lewej stronie „Arkusz”, klikając prawym przyciskiem myszy opcję „Właściwości”, a następnie zmienić sposób rzutowania (rys. 28) i potwierdzić zmiany, naciskając przycisk „Zastosuj zmiany”.



Rys. 28. Zmiana sposobu rzutowania
Fig. 28. Changing the projection method

- **Ograniczenie liczby rzutów i zmiana sposobu wyświetlenia**

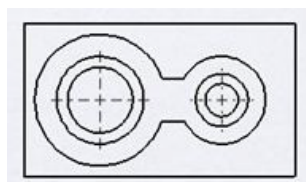
W programie dostępnych jest kilka sposobów wyświetlania widoków. Wybrany sposób wyświetlania może być w dowolnym czasie modyfikowany. Przykłady zmian sposobów wyświetlania przedstawiono na rys. 29. Każdy z widoków pokazanych na rys. 29 ma inny sposób wyświetlania.



Rys. 29. Różne sposoby wyświetlania widoków

Fig. 29. Different ways of displaying views

Rozpoczynając rzutowanie, należy wskazać, który z dostępnych widoków będzie rzutem głównym (rys. 30).

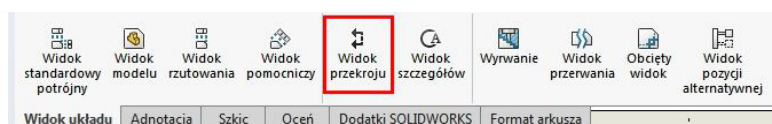


Rys. 30. Rzut główny

Fig. 30. Main projection

- **Dodanie przekroju**

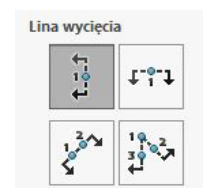
Aby dodać przekrój do rysunku, należy wybrać z paska narzędzi „Widok układu” polecenie „Widok przekroju” (rys. 31a), a następnie należy wybrać miejsce, w którym będzie tworzony przekrój, i zaznaczyć odpowiednią linię wycięcia (rys. 31b).



a)

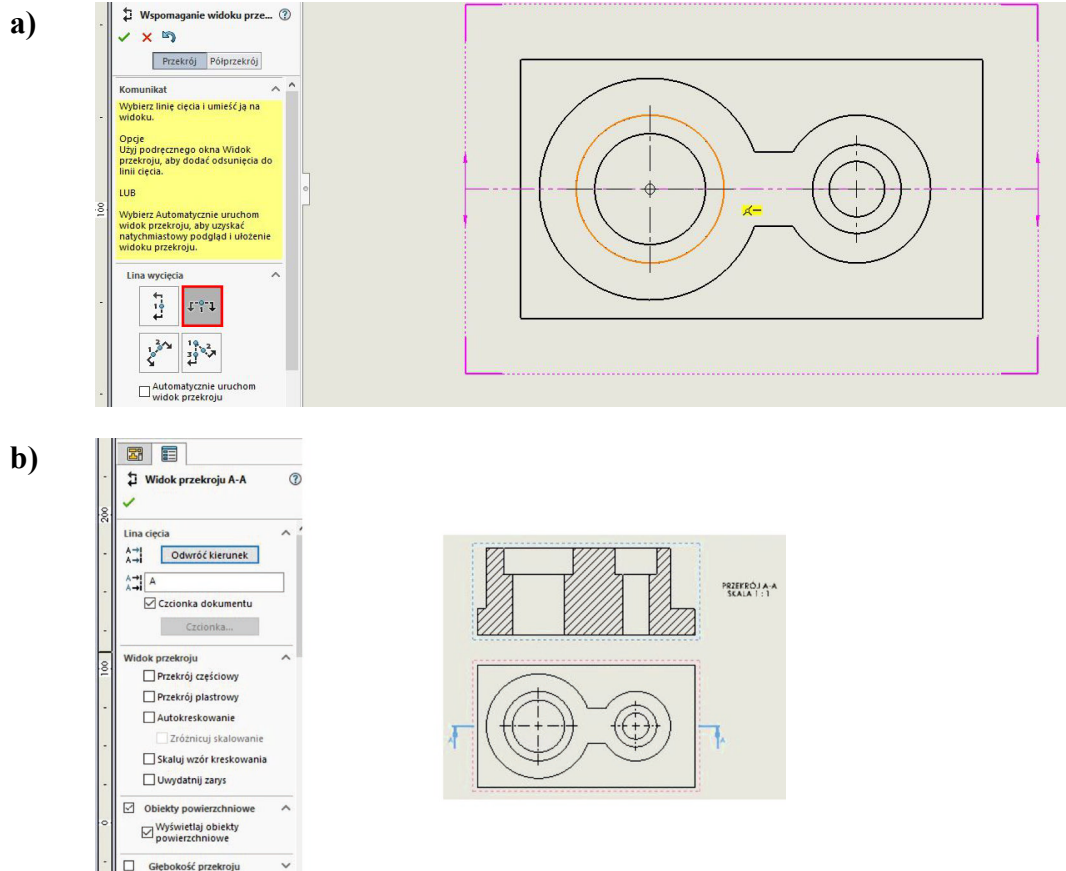
Rys. 31. Narzędzia służące do wykonania dowolnego przekroju

Fig. 31. Tools for making any cross-section



b)

Etapy tworzenia przekroju A-A zamieszczono na rys. 32.

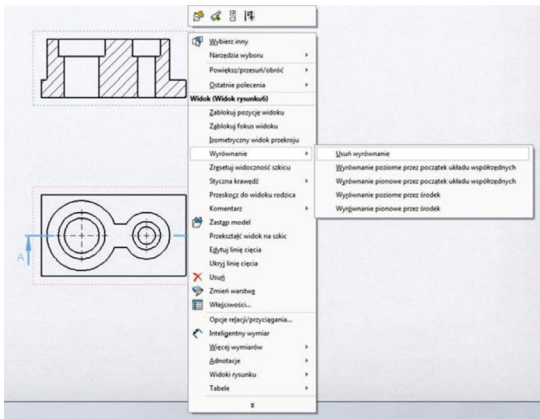


Rys. 32. Etapy wykonania przekroju: wybór płaszczyzny cięcia (a) i właściwości przekroju (b)
Fig. 32. Stages of making a section: selection of the cutting plane (a) and section properties (b)

Napis „Przekrój A-A Skala 1:1” można przesunąć w dowolne miejsce arkusza, a także go formatować, klikając 2 razy lewym przyciskiem myszki.

- **Dodanie rzutu aksonometrycznego**

Korzystając z narzędzi przedstawionych w punkcie 4, można dodać dodatkowy rzut, a następnie go formatować. Aby można było go przesunąć w dowolne miejsce arkusza, należy po jego dodaniu kliknąć na niego prawym klawiszem myszki, wybierając „Usuń wyrównanie” (rys. 33).



Usuń wyrównanie

Wyrównanie poziome przez początek układu współrzędnych

Wyrównanie pionowe przez początek układu współrzędnych

Wyrównanie poziome przez środek

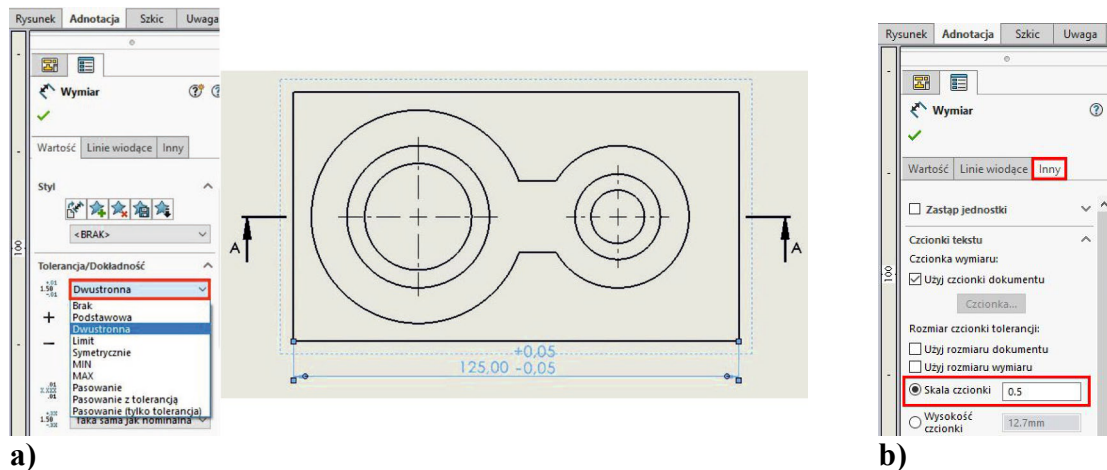
Wyrównanie pionowe przez środek

Rys. 33. Usunięcie wyrównania
Fig. 33. Removal of alignment

• Wymiarowanie rysunku

Wymiary liniowe

Rysunek można zwymiarować, korzystając z narzędzi znajdujących się w zakładce „Adnotacje”, wybierając przykładowo „Inteligentny wymiar” i za jego pomocą wymiarować element, kolejno klikając na linie, między którymi chcemy podać odległość. Aby podać oprócz wymiaru odchyłki, należy skorzystać z opcji umieszczonych po lewej stronie interfejsu (rys. 34). Opcje są aktywne po kliknięciu na wymiar. Aby zmniejszyć rozmiar czcionki, którą zapisany jest wymiar odchyłki, należy zmienić skalę (rys. 34b).

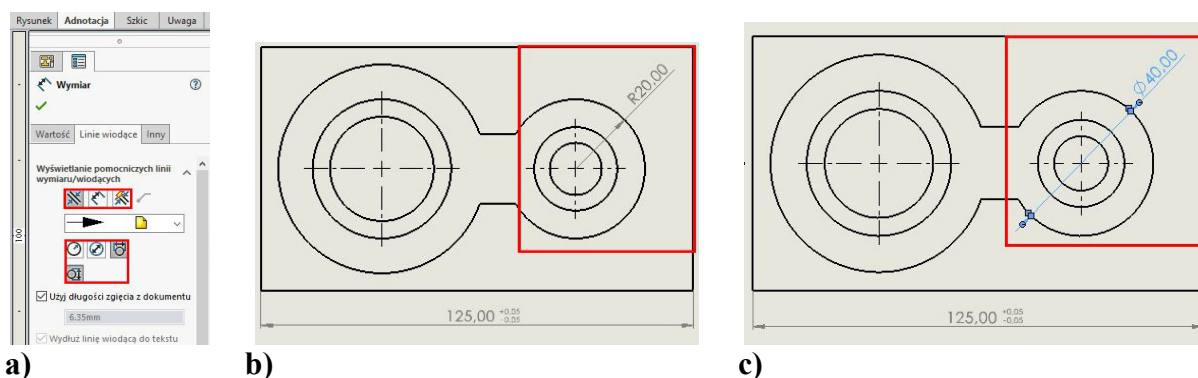


Rys. 34. Dodawanie odchyłek na rysunku
Fig. 34. Adding deviations in the drawing

Uwaga: Można również wymiarować, korzystając z opcji „Elementy modelu”. Narzędzie to importuje wymiary i służy do automatycznego wymiarowania.

Wymiarowanie okręgów

Korzystając z opcji dostępnych podczas wymiarowania, z lewej strony ekranu, można zmienić sposób wymiarowania (rys. 35).



Rys. 35. Wymiarowanie okręgów: dostępne opcje (a), wymiarowanie okręgu przed zmianą (b), wymiarowanie okręgu po zmianie (c)

Fig. 35. Circle dimensioning: available options (a), dimensioning the circle before changing (b), dimensioning the circle after changing (c)

Dodawanie linii środkowej

W przypadku elementów symetrycznych na rysunku należy dodać „Linie środkową” (rys. 36). Można ją dodać, klikając na dwie linie, między którymi powinna się znajdować.

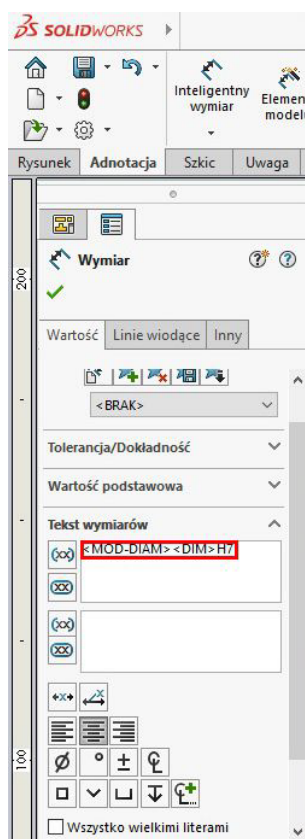


Rys. 36. Linia środkowa

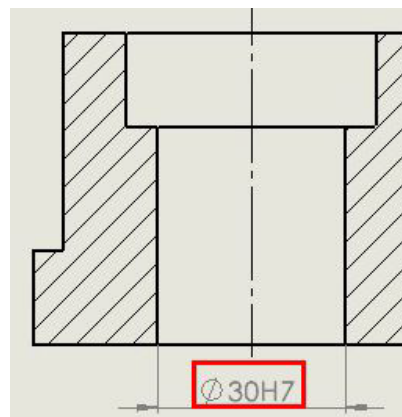
Fig. 36. The center line

Dodawanie tolerancji

Aby dodać tolerancję wymiaru, należy po kliknięciu na wymiar w okienku „tekst wymiarów” wpisać oznaczenie tolerancji (rys. 37).



a)



b)

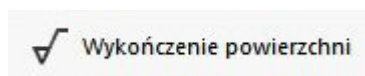
Rys. 37. Dodawanie tolerancji: aktywne okienko (a), naniesione pasowanie (b)

Fig. 37. Adding tolerance: active box (a), plotted tolerance (b)

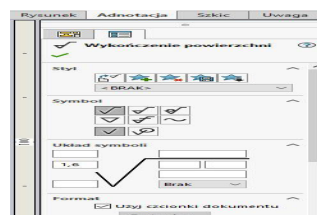
- **Dodawanie oznaczenia chropowatości powierzchni na rysunku**

Aby opisać sposób wykończenia powierzchni, należy wybrać z dostępnych opcji w zakładce „Adnotacje” „Wykończenie powierzchni” (rys. 38a), a następnie odpowiednio sformatować symbol oznaczenia chropowatości powierzchni (rys. 38b) i kliknąć na rysunku na linię, na której ma się znajdować dana ikonka (rys. 38c).

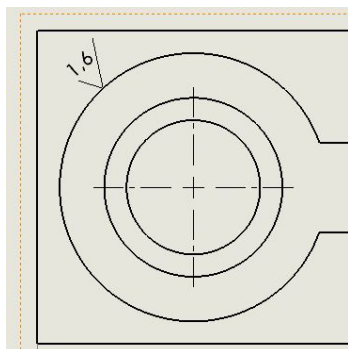
a)



c)



b)

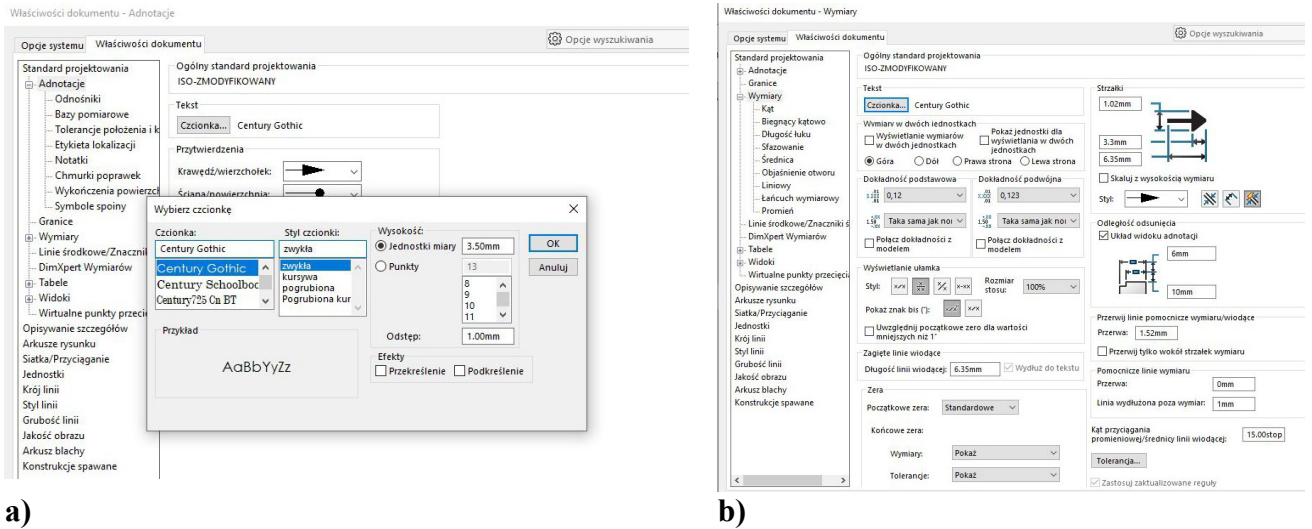


Rys. 38. Dodawanie informacji o chropowatości powierzchni

Fig. 38. Adding surface roughness information

• Ustawienia dokumentu

Za pomocą „Opcji” dostępnych w funkcji „Narzędzia” z paska narzędzi można zmieniać formatowanie opisu rysunku. Przykładowo można zmienić czcionkę (rys. 39a), usunąć przerwę pomiędzy krawędzią przedmiotu a pomocniczą linią wymiarową (rys. 39b) czy też zmienić ustawienia przekroju (rys. 39c).



a)

b)

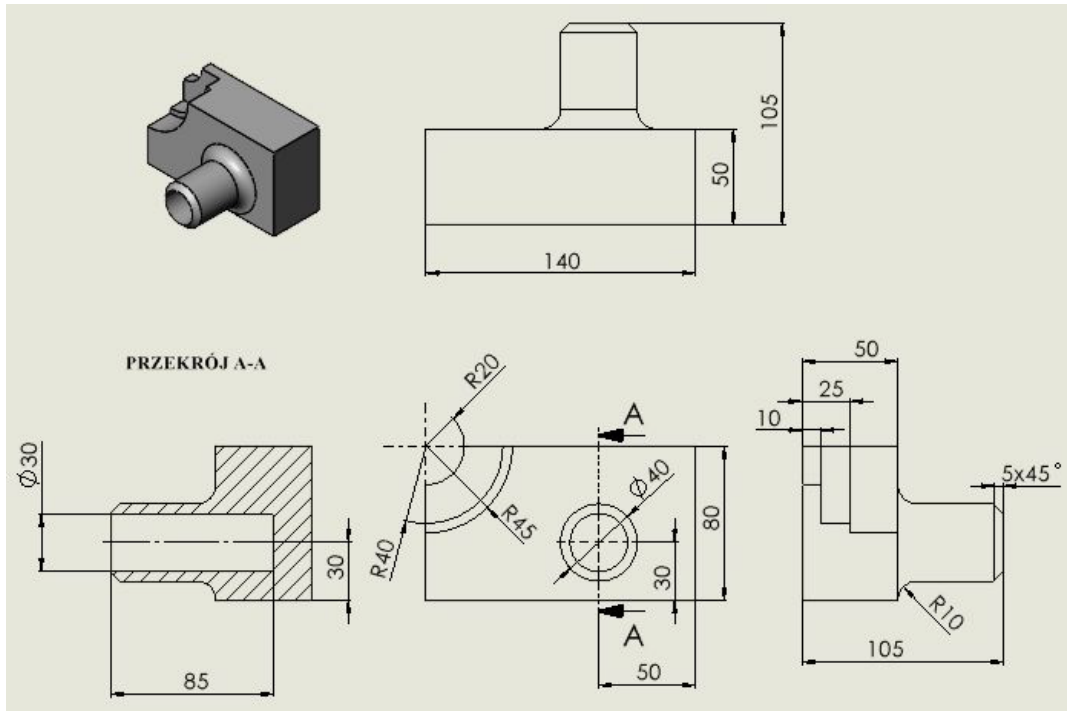
Rys. 39. Właściwości dokumentu: wybór czcionki (a), usunięcie przerwy (b)

Fig. 39. Document properties: font selection (a), deleting a gap (b)

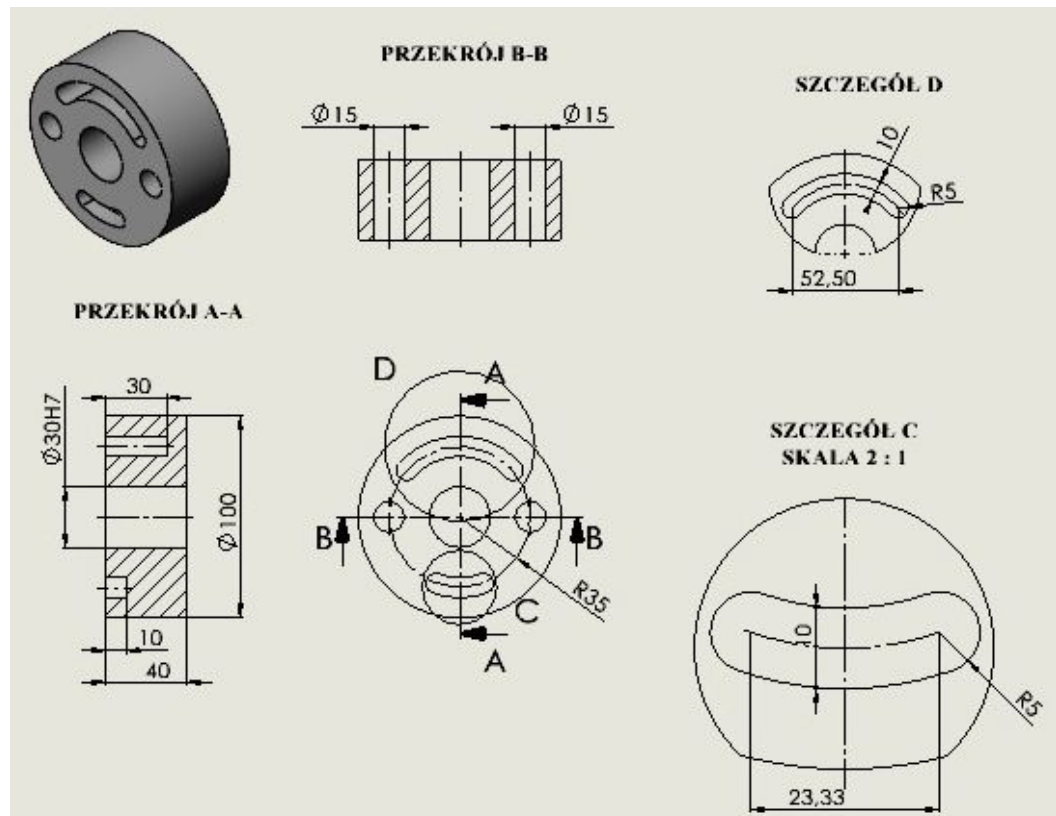
Zadania do wykonania

Sporządź rysunki jak na rys. 40.

a)



b)

Rys. 40. Rysunki do wykonania
Fig. 40. Drawings to be made

4. WYKORZYSTANIE SZYKU W SZKICU ORAZ ELEMENTACH BRYŁOWYCH

Cel główny ćwiczenia: nabycie umiejętności wykorzystania szyków liniowych i kołowych w modelowaniu 3D.

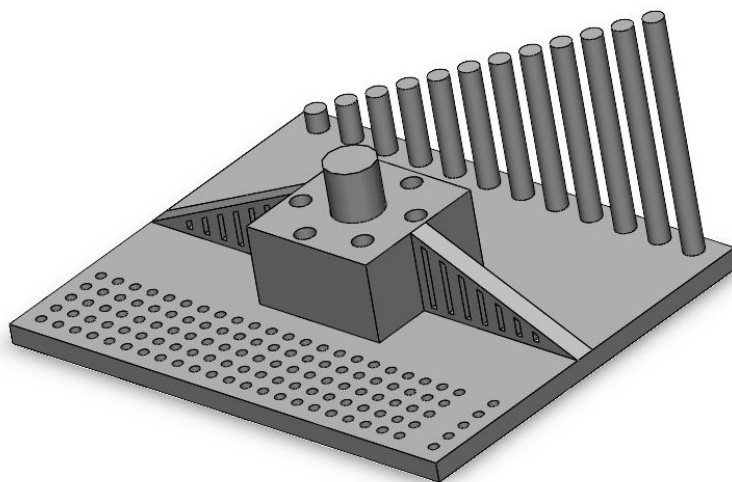
Cel pomocniczy ćwiczenia: zapoznanie się z różnymi rodzajami szyków.

Zakres ćwiczenia:

- wykorzystanie szyku liniowego i kołowego w rysunku 2D,
- wykorzystanie szyku liniowego i kołowego w modelowaniu 3D,
- nabycie umiejętności pomijania elementów w szyku liniowym,
- nabycie umiejętności wykorzystania szyku liniowego do tworzenia elementów, które różnią się od siebie odległością oraz wymiarami.

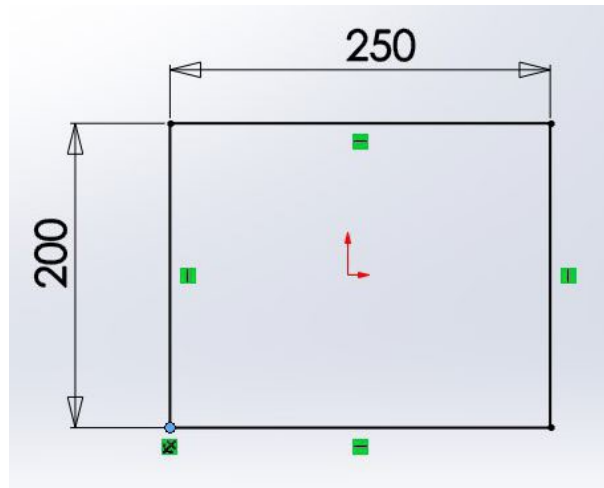
Opis zadania:

Wykonaj model 3D przedstawiony na rys. 41.




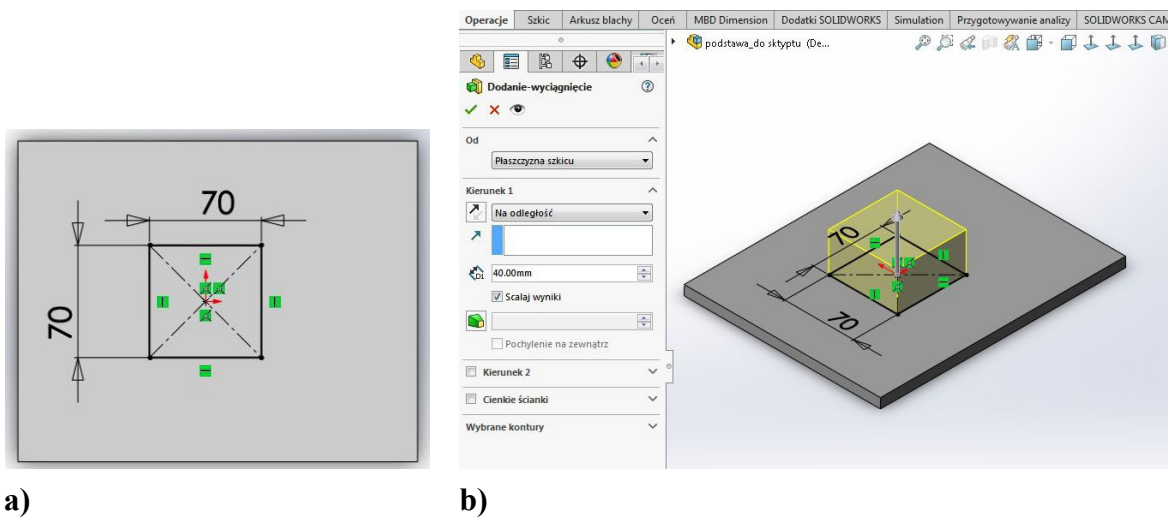
Rys. 41. Rysunek 3D
Fig. 41. 3D drawing

Aby zamodelować element znajdujący się na rys. 41, najpierw należy narysować szkic na płaszczyźnie (rys. 42).

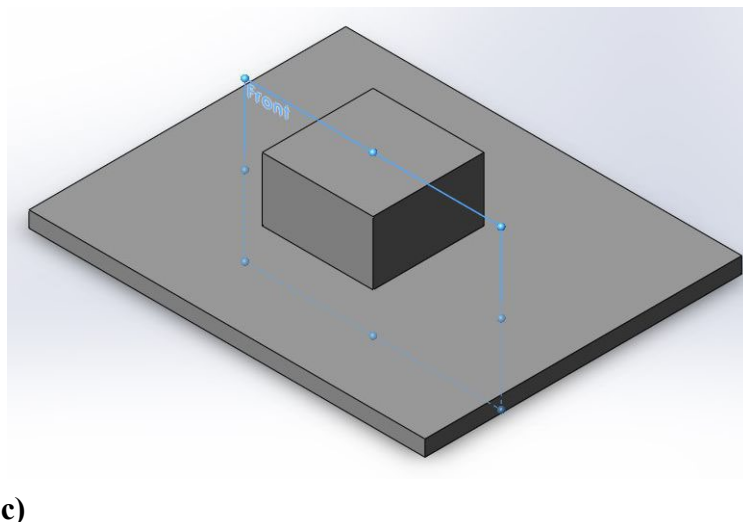


Rys. 42. Szkic podstawy elementu
Fig. 42. Sketch of the element base

Następnie, korzystając z opcji „Wyciągnięcie dodania/bazy”, należy wyciągnąć szkic na wysokość 10 mm. W dalszej kolejności należy narysować kwadrat, korzystając z opcji  „Prostokąt ze środka”, a następnie wyciągnąć go na wysokość 40 mm zgodnie ze sposobem pokazanym na rys. 43.



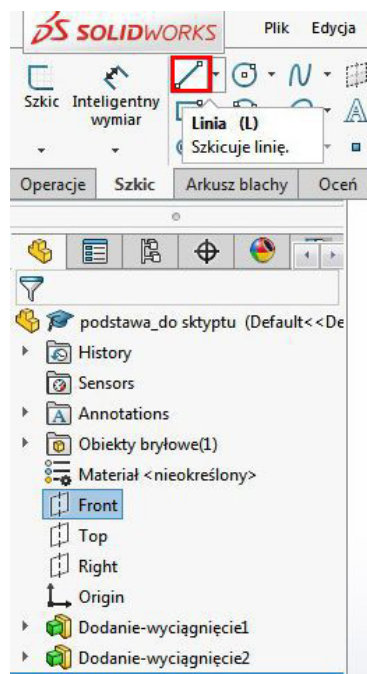
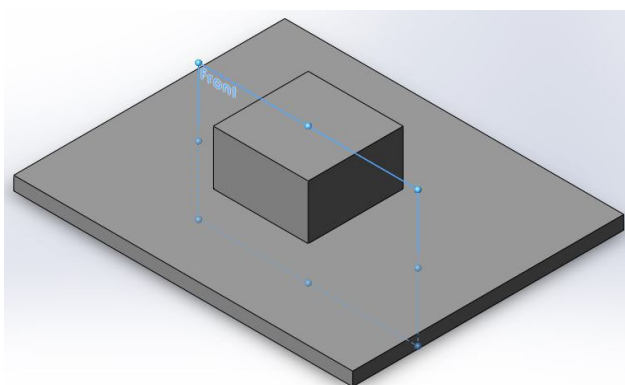
Rys. 43. Etapy powstawania elementu
Fig. 43. Stages of creating an element



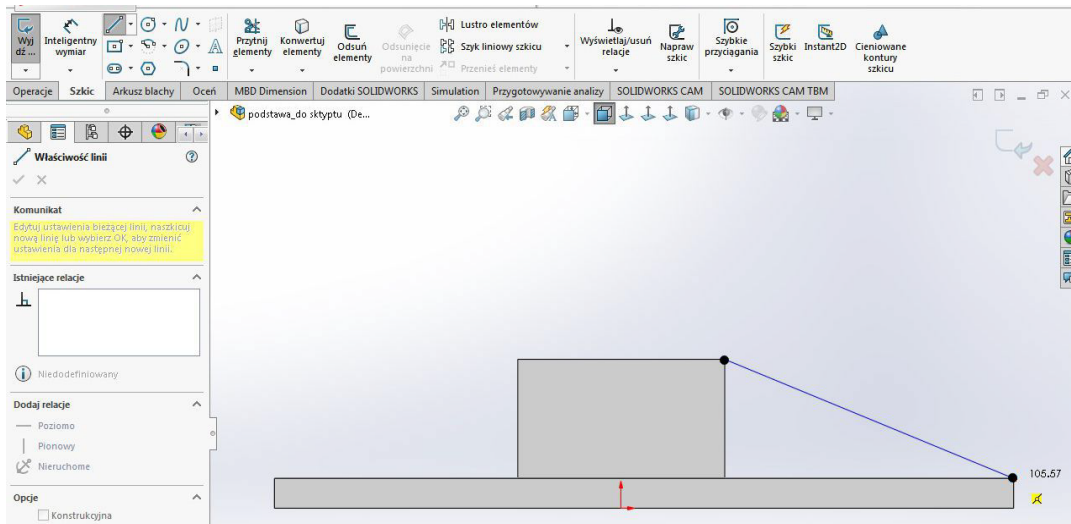
Rys. 43.cd. Etapy powstawania elementu
Fig. 43. cont. Stages of creating an element

Następnie należy dodać do elementu żebra zgodnie z etapami pokazanymi na rys. 44.

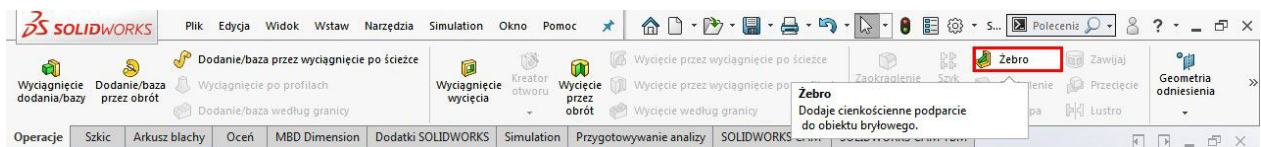
Uwaga: Jeśli żebro będzie utworzone na płaszczyźnie, która nie jest płaszczyzną główną, należy przed zastosowaniem narzędzia „Żebro” dodać płaszczyznę dodatkową („Płaszczyzna” z narzędzia „Geometria odniesienia”).



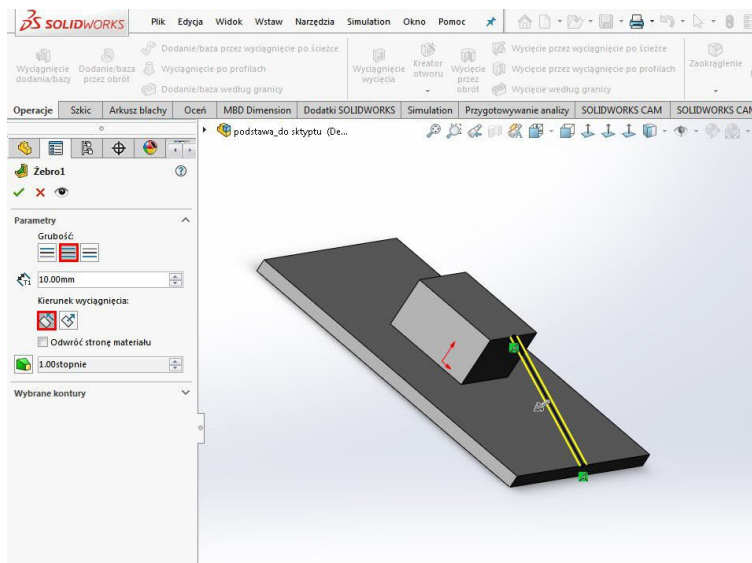
Rys. 44. Etapy powstawania żeber: wybór płaszczyzny (a), wybór linii z zakładki „Szkic” (b)
Fig. 44. Stages of creating ribs: selecting a plane (a), selecting a line from the „Sketch” tab (b)



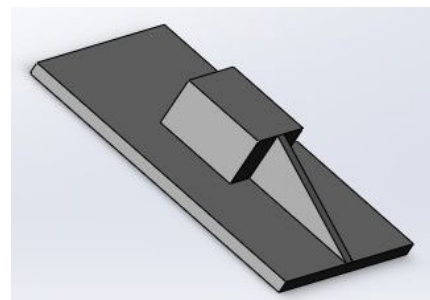
c)



d)



e)

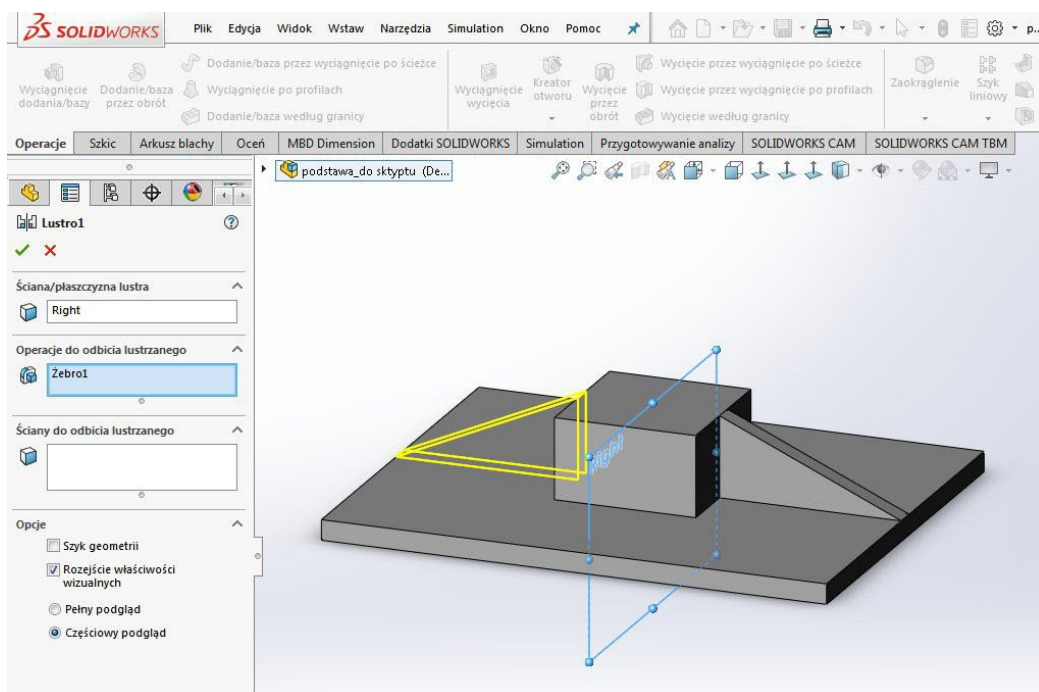


f)

Rys. 44. cd. Etapy powstawania żeber: naniesienie linii oznaczającej zarys żebra (c), wybór narzędzia „Zebro” (d), opcje narzędzia „Zebro” – przyjęta szerokość żebra – 10 mm (e), widok modelu po dodaniu żebra (f)

Fig. 44. cont. Stages of creating ribs: drawing a line marking the contour of a rib (c), selecting the „Rib” tool (d), options of the „Rib” tool – assumed rib width – 10 mm (e), model view after adding the rib (f)

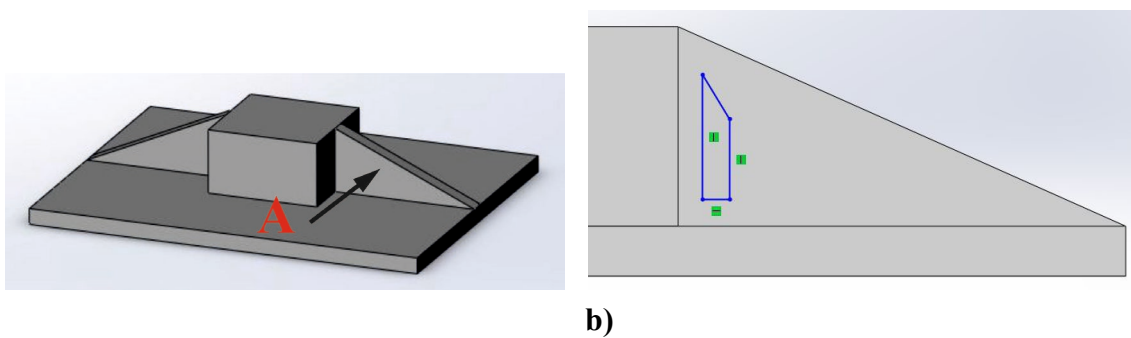
Aby dodać drugie żebro, należy użyć opcji **Lustro** z zakładki **Operacje** (rys. 45).



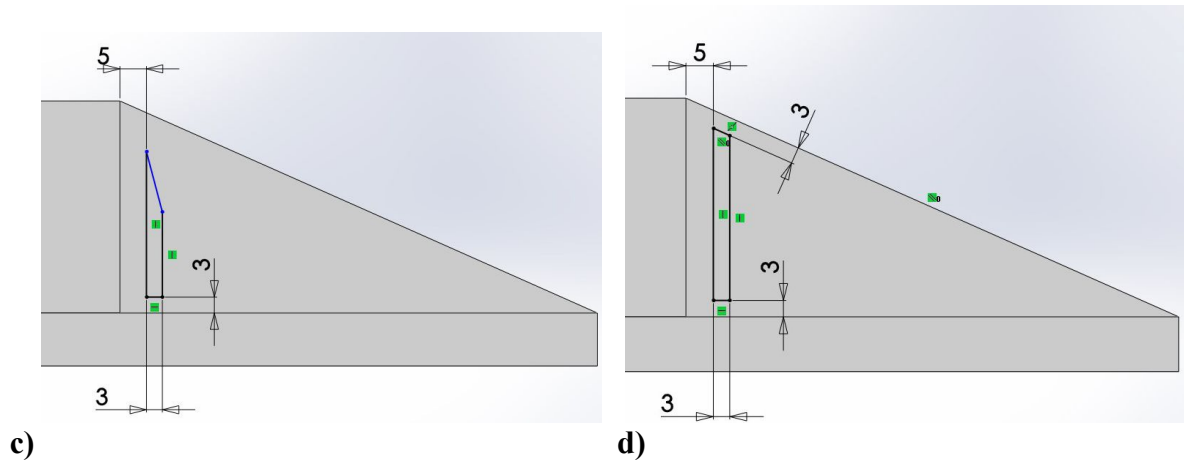
Rys. 45. Utworzenie żebra za pomocą opcji **Lustro** z zakładki **Operacje**

Fig. 45. Creating a brace with the use of the **Mirror** option from the **Operations** tab

Następnie należy utworzyć szkic na ścianie zaznaczonej jako **A** na rys. 46a zgodnie z rys. 46b–d.

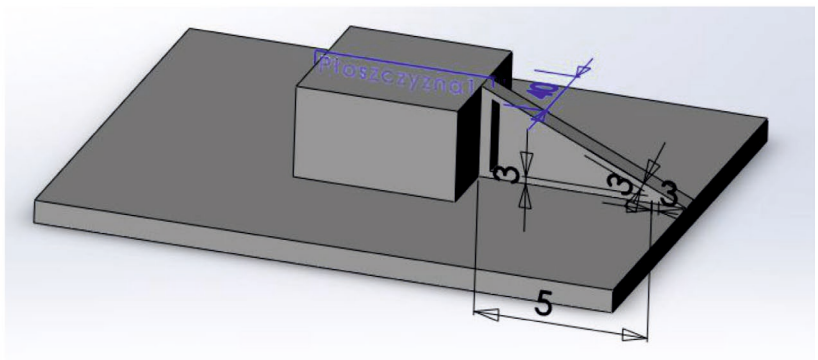
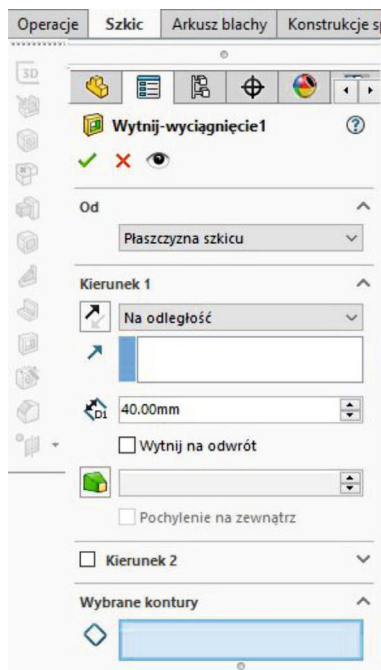


Rys. 46. Etapy rysowania elementu do wycięcia w bryle
Fig. 46. Stages of drawing an element to be cut in a solid



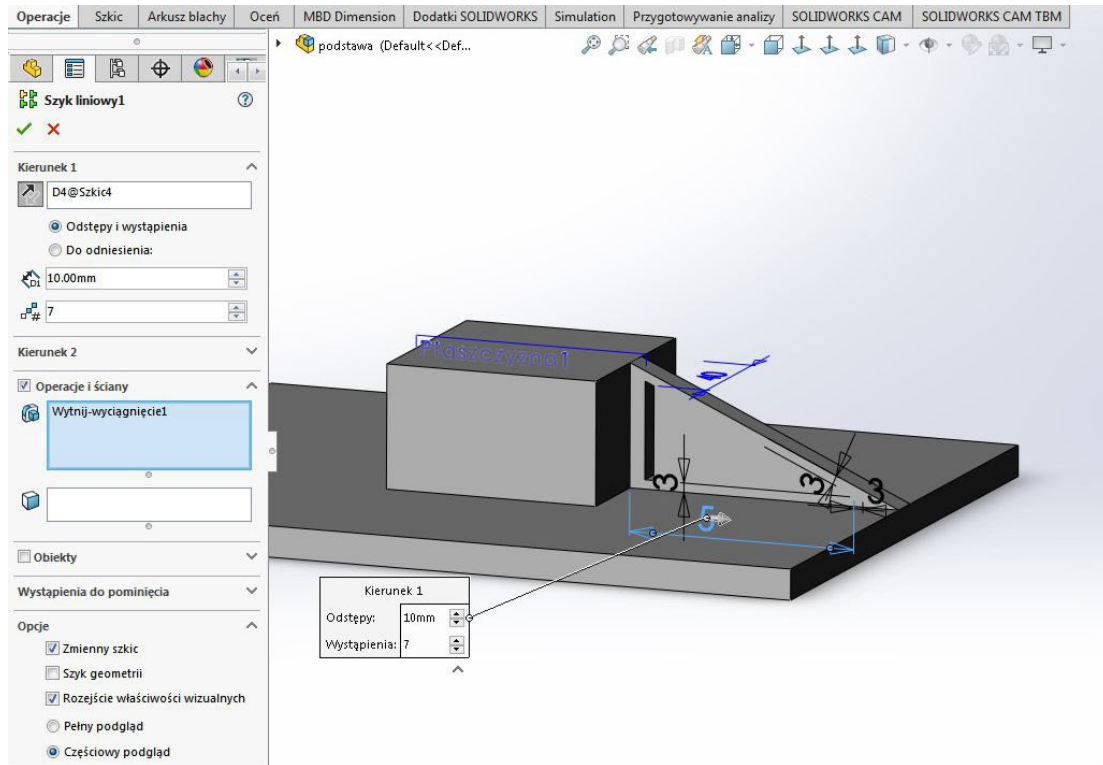
Rys. 46. cd. Etapy rysowania elementu do wycięcia w bryle
 Fig. 46. cont. Stages of drawing an element to be cut in a solid

W dalszej kolejności należy wybrać opcję „Wyciągnięcie wycięcia” z zakładki „Operacje” zgodnie z rys. 47.



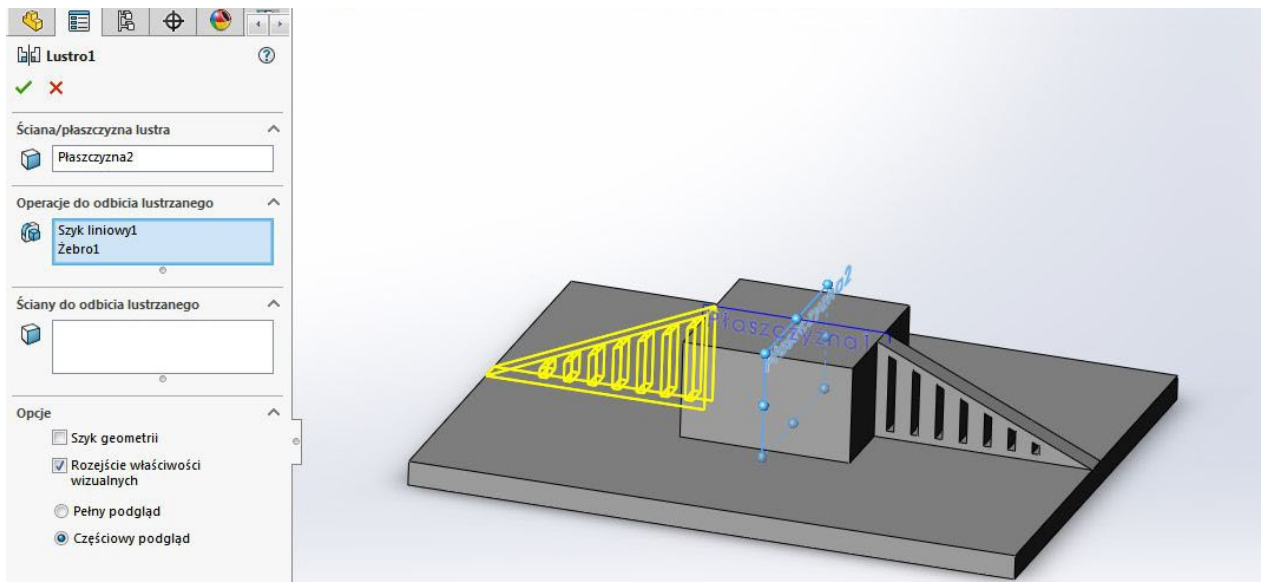
Rys. 47. Wycięcie kształtu w żebrze
 Fig. 47. Cutting a shape in a rib

Następnym etapem tworzenia modelu przedstawionego na rys. 41 jest wykorzystanie opcji „Szyk liniowy” z zakładki „Operacje”, jak pokazano na rys. 48.



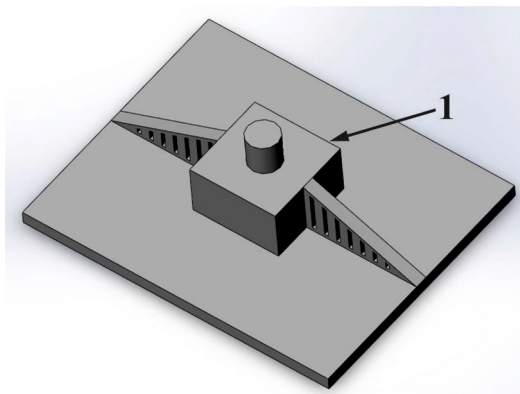
Rys. 48. Wykorzystanie Szyku liniowego
Fig. 48. Using the Linear Pattern

Następnie należy zastosować opcję „Lustro” (rys. 49).



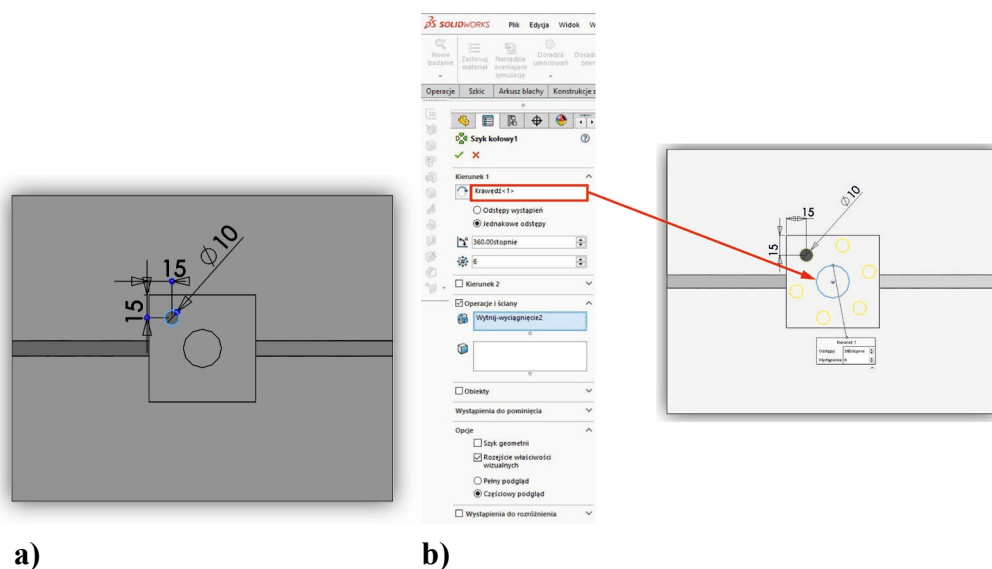
Rys. 49. Wykorzystanie opcji Lustro w tworzeniu wycięć w drugim żebrze
Fig. 49. Using the Mirror operation to make cuts in the second rib

W dalszej kolejności należy modelować element jak na rys. 50, przyjmując za średnicę okręgu 25 mm, a następnie, korzystając z opcji „Wyciągnięcie dodania/bazy” z zakładki „Operacje”, modelować element o wysokości 25 mm.



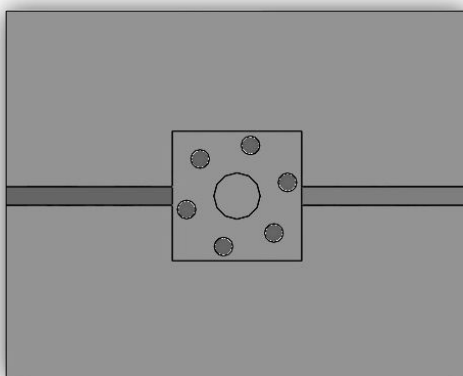
Rys. 50. Model z dodatkowym elementem
Fig. 50. Model with an additional element

W dalszej kolejności należy dodać otwory w elemencie oznaczonym na rys. 50 jako „1” zgodnie z rys. 51, a następnie wyciąć otwór, wykorzystując opcję „Wyciągnięcie wycięcia” z zakładki „Operacje”. Wybrać opcję wytnij „przez wszystko” przy oznaczaniu kierunku. Następnie należy wybrać z zakładki „Operacje” „Szyk kołowy” (rys. 51b).



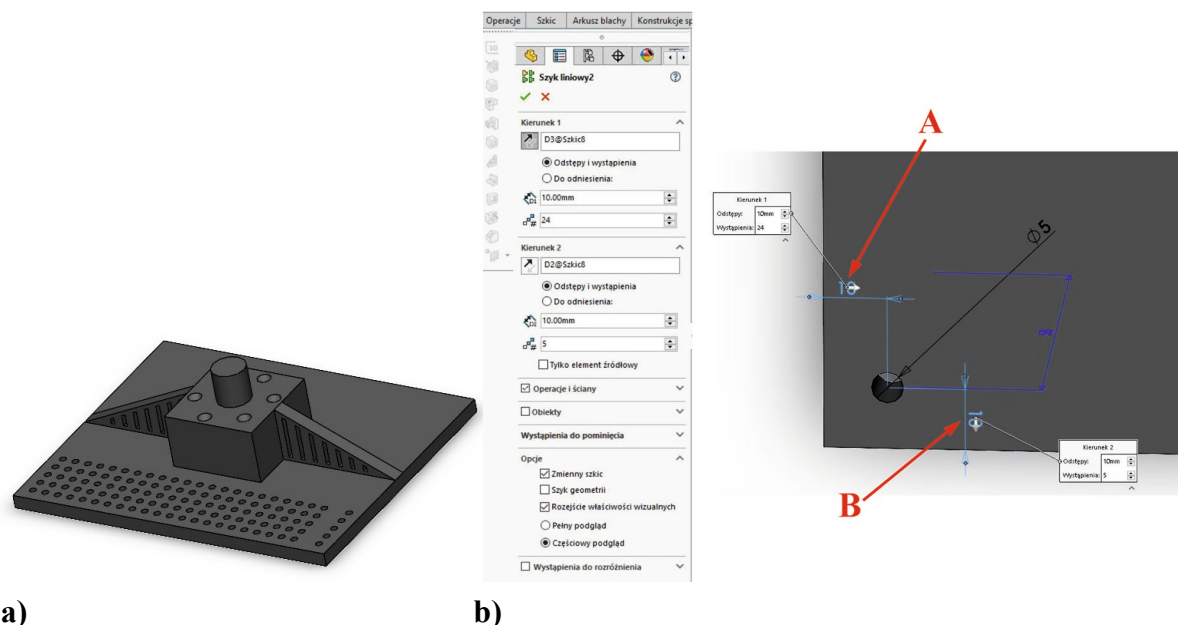
Rys. 51. Etapy dodawania otworów: rysunek i zwymiarowanie okręgu (a), „Szyk kołowy” (b)
Fig. 51. Stages of adding holes: drawing and dimensioning a circle (a), „Circular pattern” (b)

W dalszej kolejności należy wyciąć otwór zgodnie z rys. 52.



Rys. 52. Wycięcie otworu w podstawie
Fig. 52. Cutting a hole in the base

Później należy wyciąć otwory jak na rys. 53a, korzystając z dostępnych opcji z zakładki „Operacje”. Aby otrzymać rozmieszczenie otworów jak na rys. 53a, należy – wybierając „kierunek 1” – kliknąć na wymiar oznaczony jako „A” na rys. 53b oraz kliknąć na wymiar oznaczony jako „B”, wybierając „kierunek 2” (rys. 53b). Aby pominąć jedną z kolumn, należy dodać numer kolumny (A) i wiersza (B) punktów, które należy pominąć, do rubryki „wystąpienia do pominięcia”, klikając na te okręgi (rys. 53c).

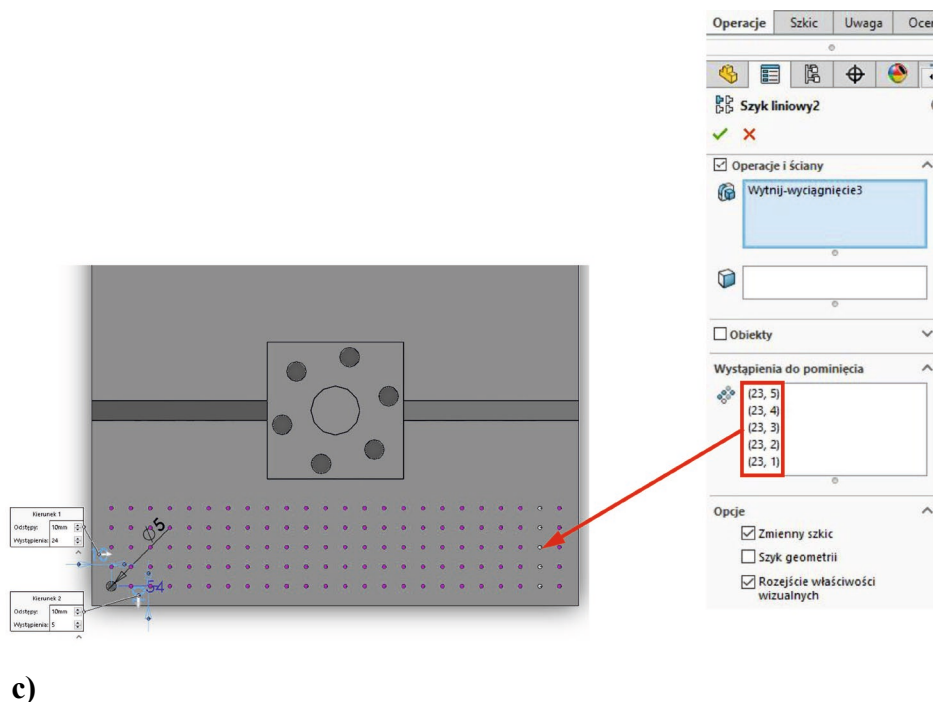


a)

b)

Rys. 53. Opcja „Szyk liniowy”: efekt wykorzystania dodatkowych funkcji „Szyku liniowego” (a), wybór kierunków opcji „Szyk liniowy” (b)

Fig. 53. „Linear pattern” option: the effect of using additional functions „Linear pattern” (a), selecting the directions of the „Line sketch” option (b)

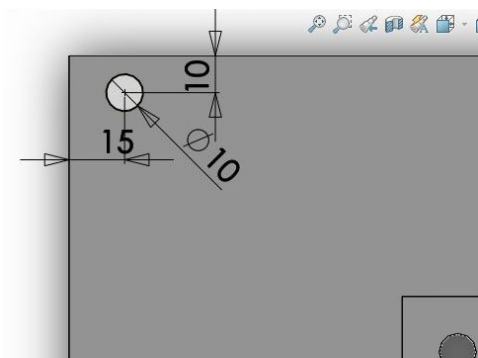


c)

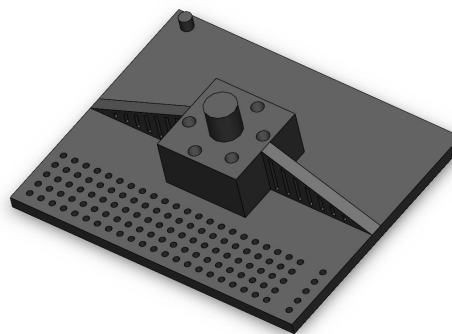
Rys. 53. cd. Opcja „Szyk liniowy”: usuwanie wybranych elementów z szyku (c)

Fig. 53. cont. „Linear pattern” option: removing selected elements (c)

Aby dodać do modelu różniące się wysokością kolumny, należy najpierw dodać pierwszy element jak na rys. 54, a następnie wyciągnąć go, korzystając z opcji „Wyciągnięcie dodania/bazy” z zakładki „Operacje” na wysokość 10 mm.



a)

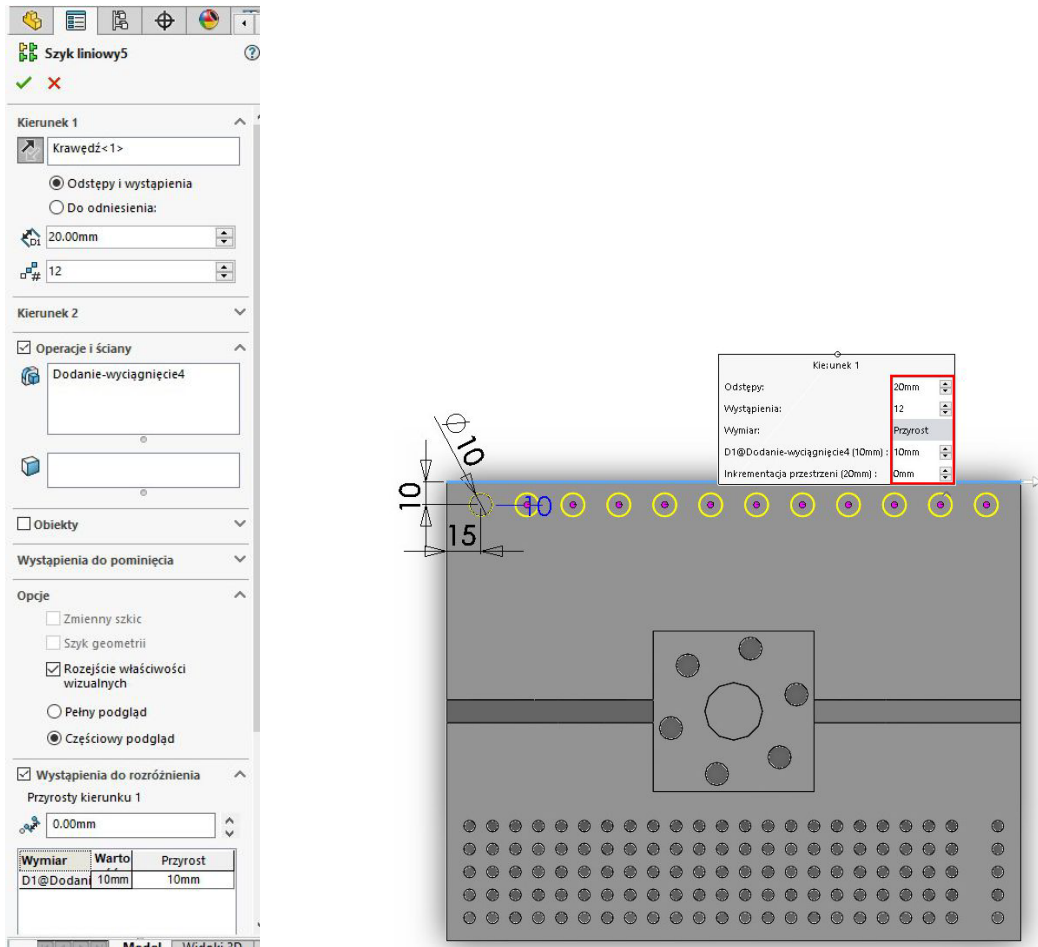


b)

Rys. 54. Dodanie elementu do podstawy: Szkic (a), widok po wykonaniu operacji „Wyciągnięcie dodania/bazy” (b)

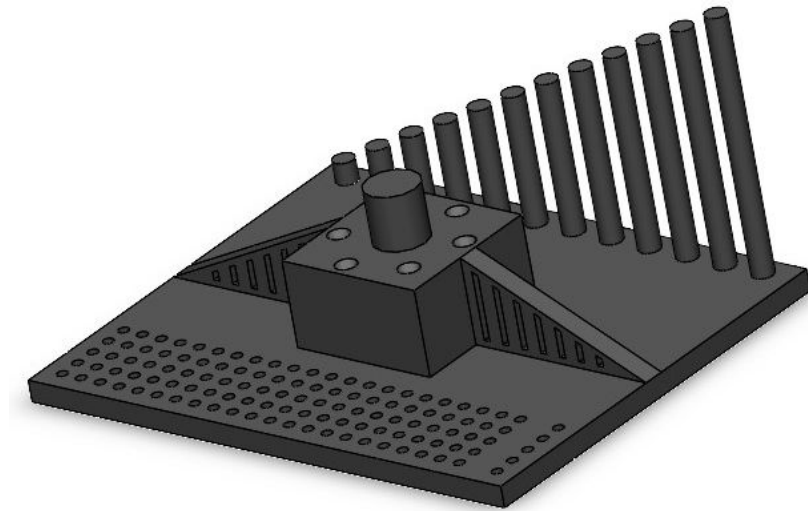
Fig. 54. Adding an element to the base: Sketch (a), view after the operation „Extruded Boss/Base” (b)

W dalszej kolejności należy użyć polecenia „Szyk liniowy”, aby otrzymać elementy różniące się od siebie wysokością jak na rys. 55.



a)

b)



c)

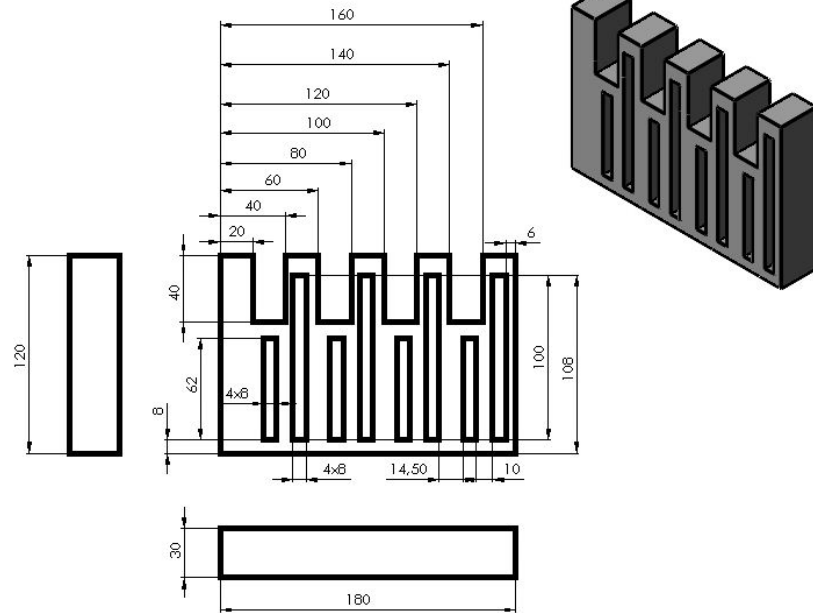
Rys. 55. Wykorzystanie szyku liniowego: opcje narzędzia (a), model (b) i widok zamodelowanego elementu (c)

Fig. 55. Using the linear pattern: tool options (a), model (b) and modeled element view (c)

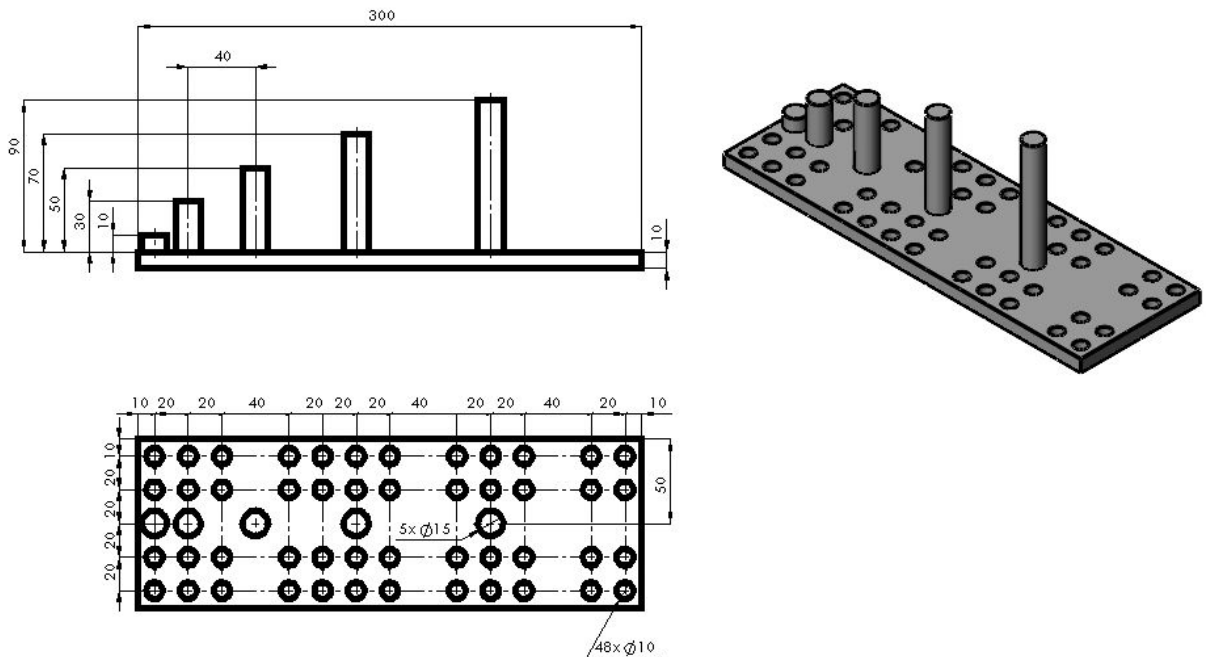
Zadania do wykonania

Na rys. 56 przedstawiono modele do wykonania z wykorzystaniem operacji „Szyk liniowy”.

a)



b)



Rys. 56. Modele do wykonania

Fig. 56. Models to be made

5. ANALIZA PŁASKICH UKŁADÓW SIŁ NA PRZYKŁADZIE BELKI

Cel główny ćwiczenia: sporządzenie wykresów wielkości wewnętrznych (sił tnących i momentów gnących) oraz odczytanie wartości reakcji.

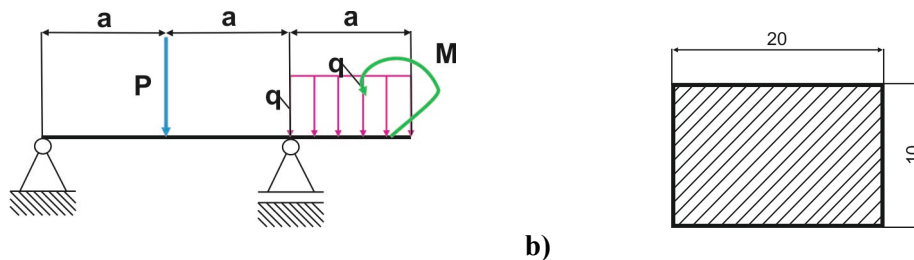
Cel pomocniczy ćwiczenia: zapoznanie się ze sposobem nanoszenia różnych warunków brzegowych i typów obciążeń.

Zakres ćwiczenia:

- rysowanie belki;
- obsługa interfejsu *Symulacje*;
- dodawanie warunków brzegowych i obciążeń;
- odczytanie wartości reakcji;
- sporządzanie wykresów;
- edycja legendy i wyników.

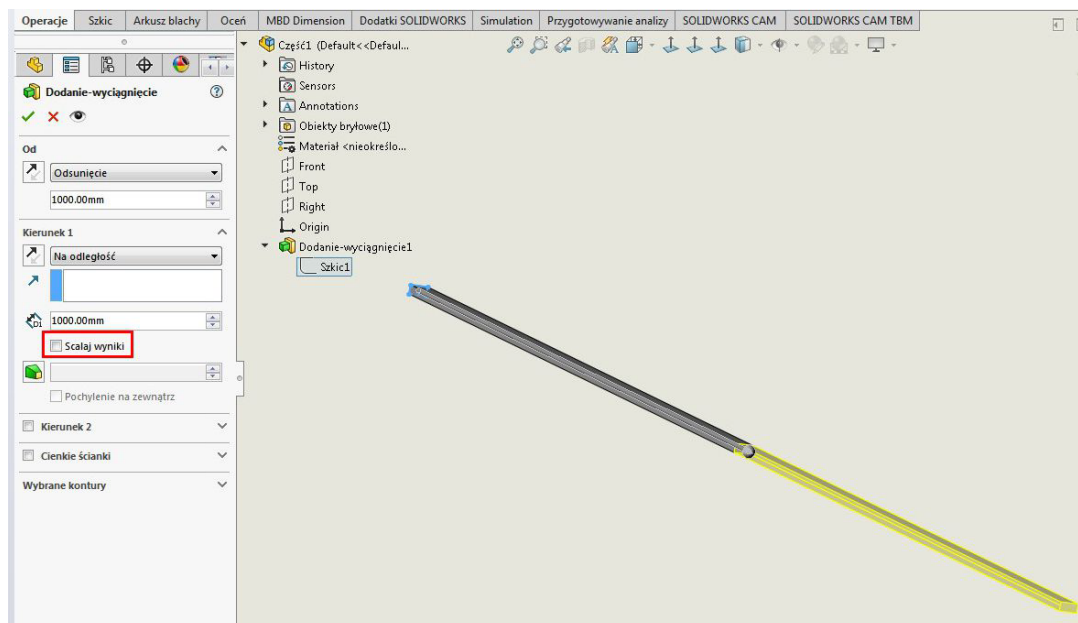
Opis zadania

Sporządź wykresy wielkości wewnętrznych belki pokazanej na rys. 57, wiedząc, że $a = 1\text{ m}$, $q = 10\text{ kN/m}$, $P = 5\text{ kN}$ i $M = 1\text{ kNm}$.



a) Rys. 57. Belka z naniesionymi obciążeniami (a) oraz przekrój belki (b)
b) Fig. 57. Beam with loads (a) and beam cross-section (b)

Aby wyznaczyć wielkości wewnętrzne w belce, należy najpierw modelować belkę z trzema przedziałami o długości $a = 1000\text{ mm}$ każdy. Przykład narzędzi zastosowanych do rysowania belki przedstawiono na rys. 58. Aby otrzymać belkę z 3 przedziałami, nie należy używać opcji programu „Scalaj wyniki”. W miejscach, w których łączone są ze sobą poszczególne segmenty belki, będzie możliwość dodawania warunków brzegowych oraz siły i momentu skupionego.



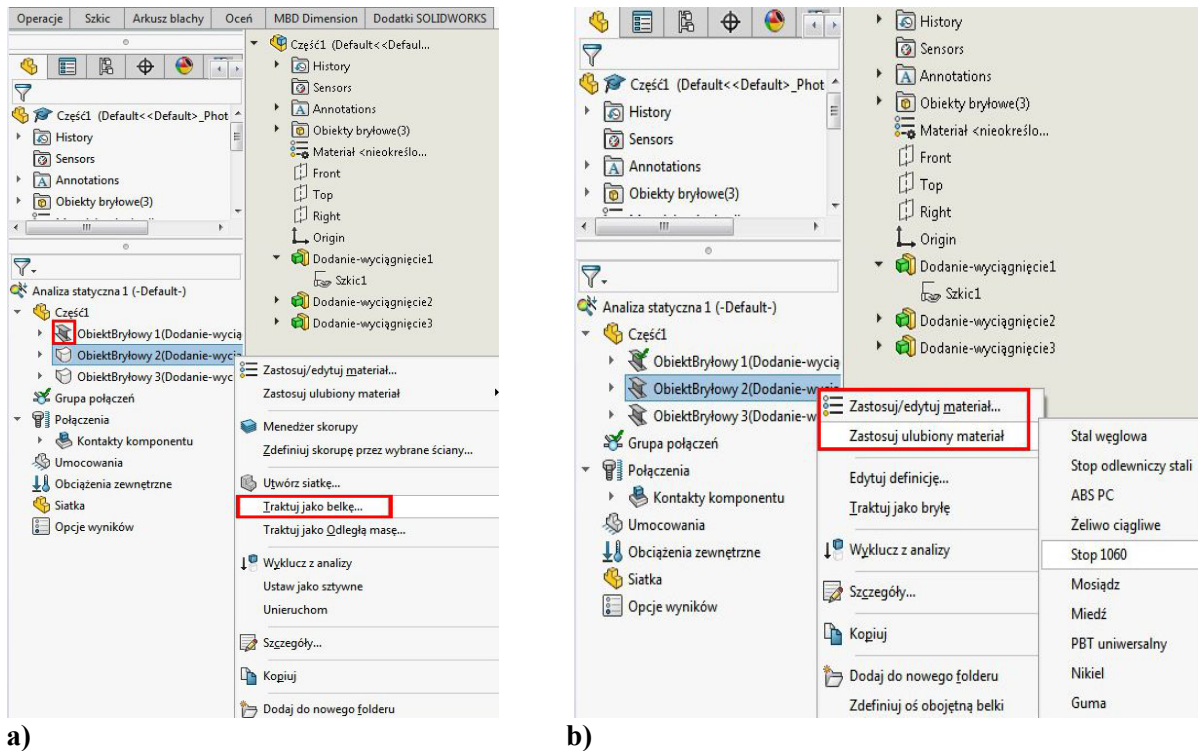
Rys. 58. Utworzenie 2. przedziału belki
Fig. 58. Creation of the 2nd beam compartment

Następnie należy wybrać z zakładki „Symulacja” narzędzie „Nowe badanie”, a później „Analizę statyczną” (rys. 59).



Rys. 59. Wybór rodzaju analizy: rozpoczęcie nowego badania (a), wybór rodzaju analizy (b)
Fig. 59. Choosing the type of analysis: starting a new study (a), selecting the type of analysis (b)

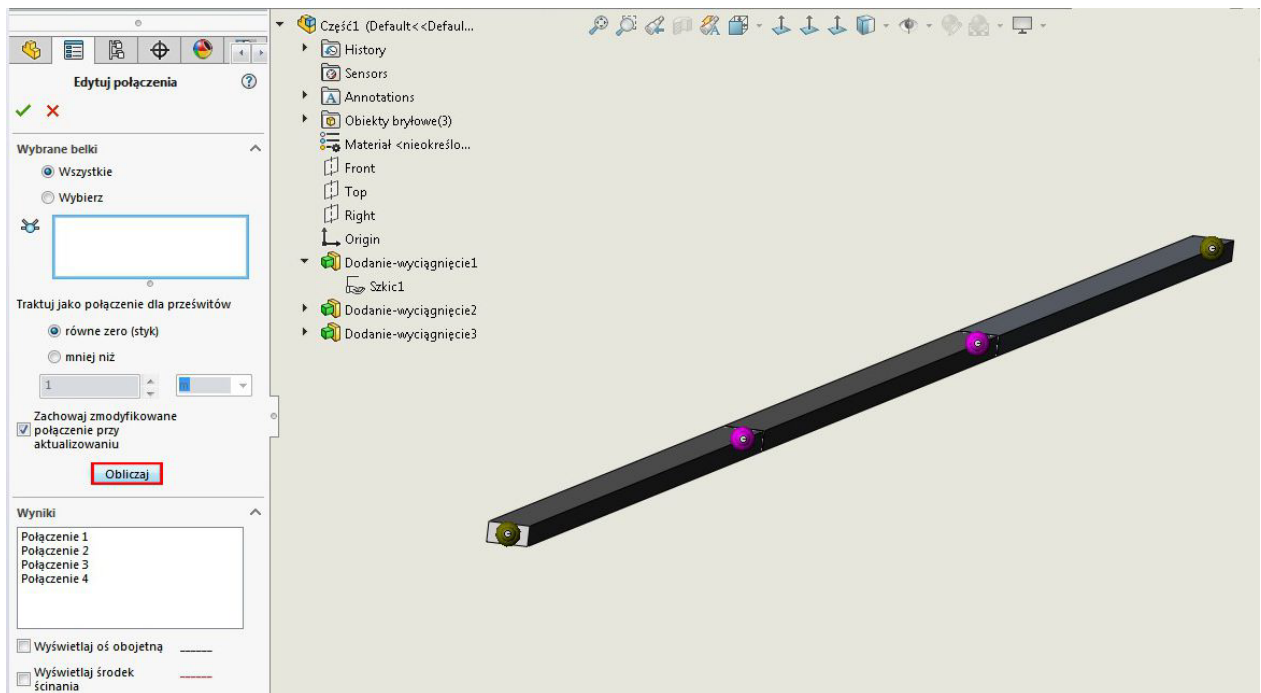
Potem należy przekształcić obiekty bryłowe na belki (rys. 60). Przekształcenie wykonuje się, klikając prawym klawiszem myszki na każdy z przedziałów i wybierając z rozwijanego menu opcję „Traktuj jako belkę”. Następnie należy wybrać materiał, z którego zbudowany jest każdy z fragmentów belki. Operację tę wykonujemy, wybierając opcję „Zastosuj materiał” (rys. 60).



Rys. 60. Przekształcenie obiektów bryłowych w belki (a) oraz wybór materiału, z którego wykonana jest belka (b)

Fig. 60. Converting solid objects into beams (a) and selection of the beam material (b)

W dalszej kolejności należy dodać połączenia (rys. 61). Opcja ta umożliwia definiowanie siły skupionej, momentu skupionego oraz warunków brzegowych w miejscach połączeń.



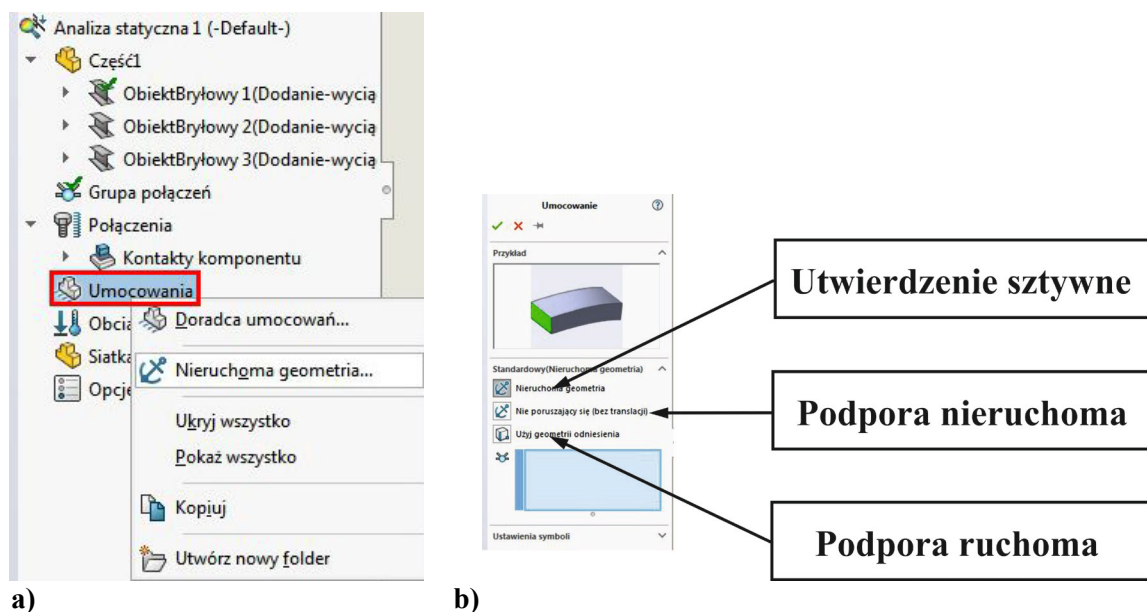
Rys. 61. Połączenia pomiędzy poszczególnymi fragmentami belki

Fig. 61. Connections between individual parts of the beam

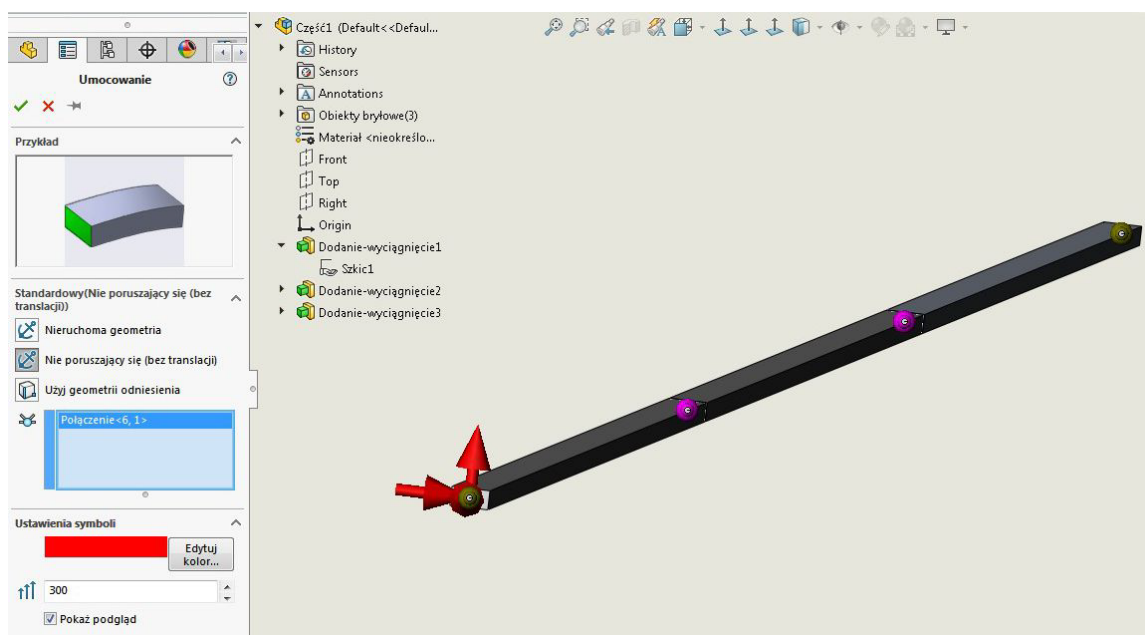
Następnie należy dodać warunki brzegowe (rys. 62). Aby dodać więzy, należy kliknąć prawym przyciskiem myszki na „Umocowania” i wybrać operację „Nieruchoma geometria”. Więzy są to warunki, które ograniczają przemieszczenia. Przyjmując za kryterium podziału podpór liczbę stopni swobody, otrzymuje się:

- podparcia odbierające jeden stopień swobody (np. pręt zakończony dwoma przegubami, cięgno, łożysko ruchome),
- podparcia odbierające ciało $m > 1$ stopni swobody (podparcie na powierzchni chropowatej, łożyska sztywne, sztywne utwierdzenia) [3, 5, 7, 8].

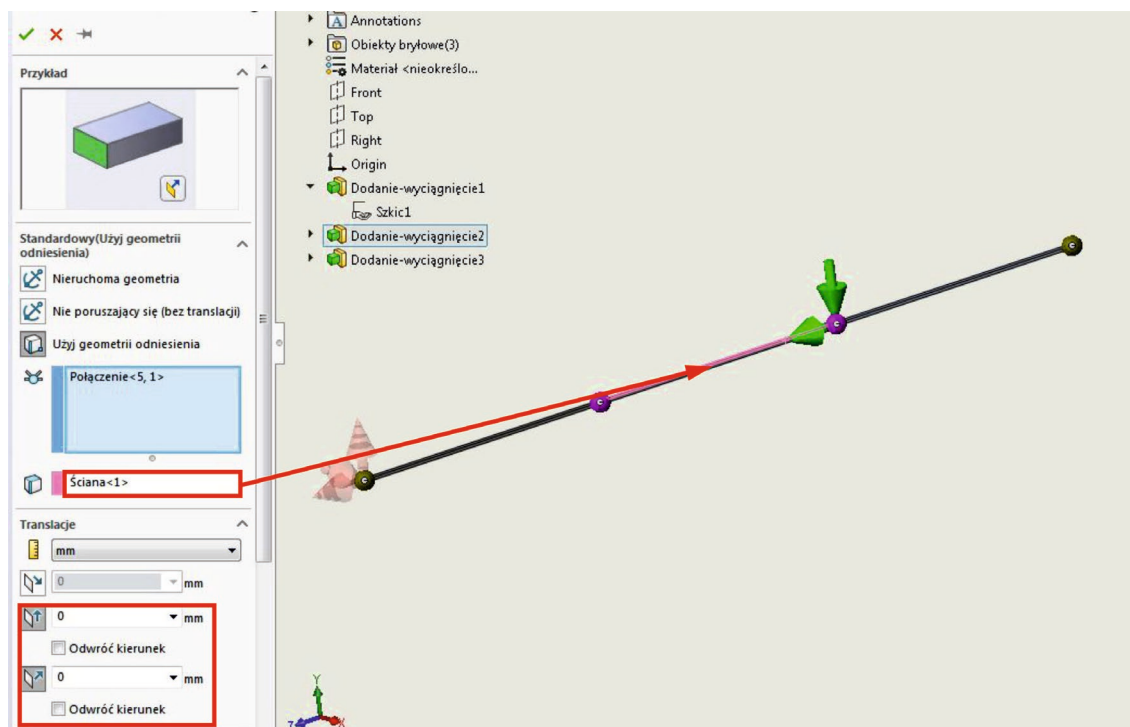
Program umożliwia dodanie takich więzów jak utwierdzenie sztywne, podpora nieruchoma i podpora ruchoma. Najpierw należy zaznaczyć rodzaj podpory, a następnie wskazać miejsce (połączenie), w którym usytuowana jest podpora, klikając na to miejsce myszką. Jeśli wybrana zostanie podpora ruchoma, należy najpierw wybrać płaszczyznę (ścianę) odniesienia, a następnie zaznaczyć, wzdłuż jakich osi będzie zablokowany ruch tej podpory, wybierając ikony translacji.



Rys. 62. Warunki brzegowe: sposób dodawania warunków brzegowych (a), rodzaje podpór (b)
 Fig. 62. Boundary conditions: the way of adding boundary conditions (a), types of supports (b)



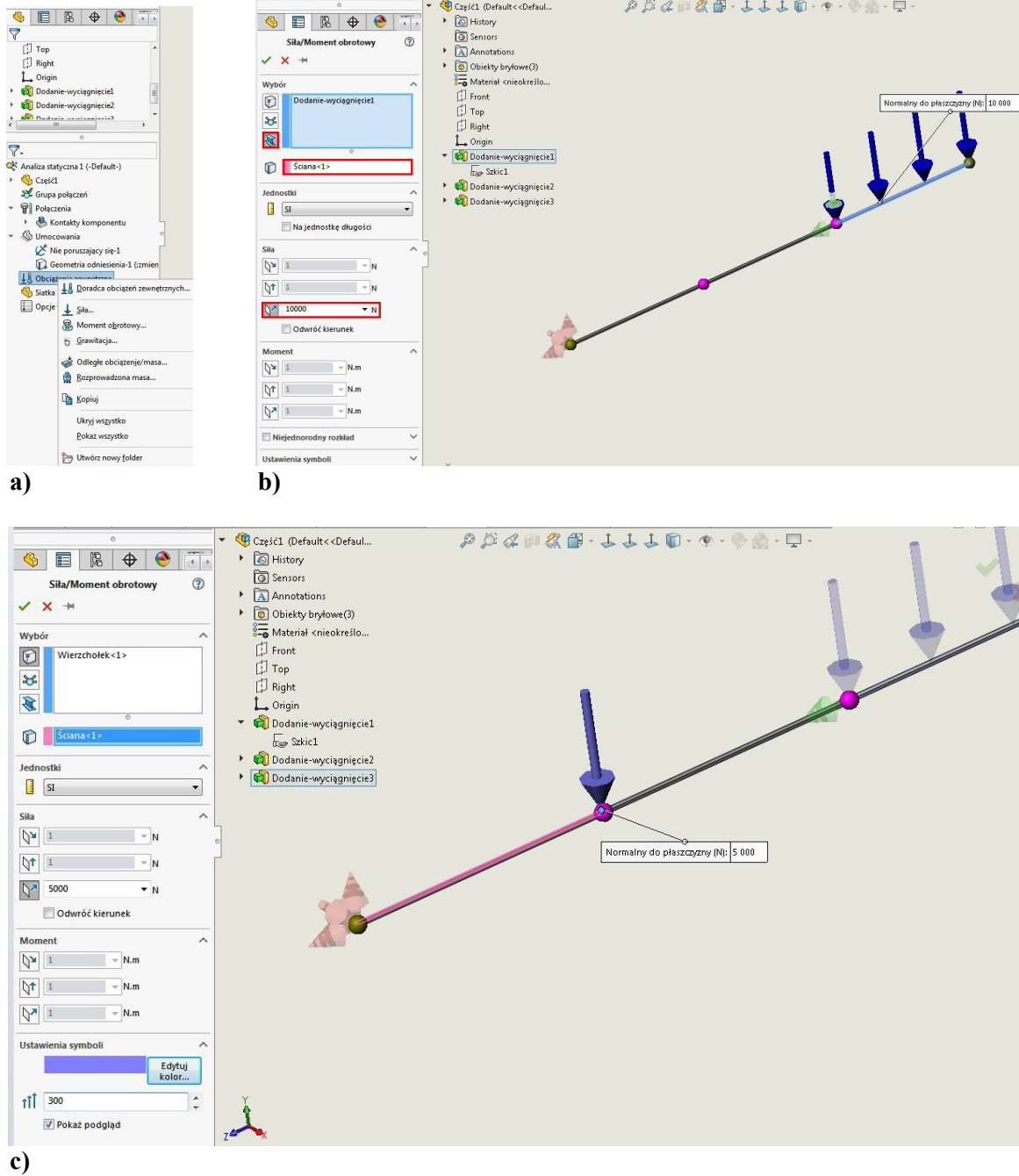
c)



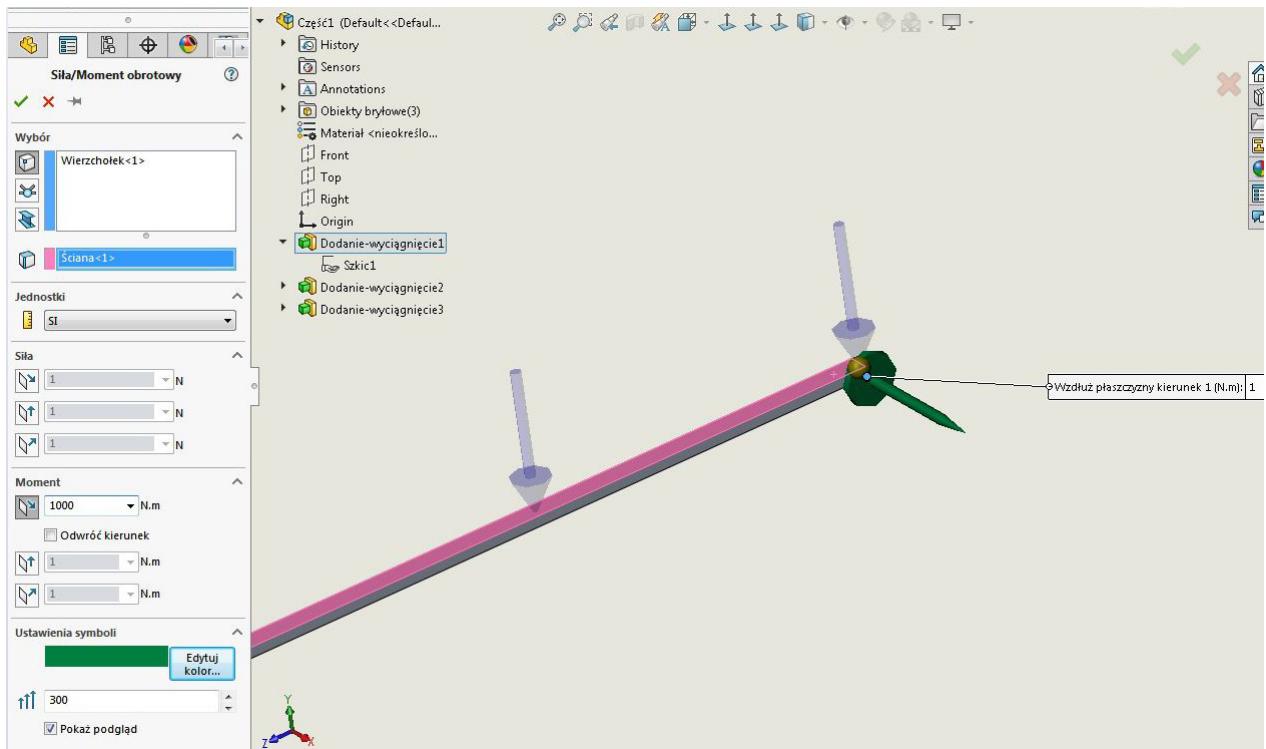
d)

Rys. 62. cd. Warunki brzegowe: dodanie podpory nieruchomej (c), podpory ruchomej (d)
 Fig. 62. cont. Boundary conditions: adding a fixed geometry (c), a mobile support (d)

Następnie należy dodać obciążenia, klikając prawym klawiszem myszki na „Obciążenia zewnętrzne” (rys. 63). Aby dodać obciążenie ciągłe, najpierw należy wybierać element, na który przyłożone jest obciążenie, następnie płaszczyznę odniesienia i oś, względem której dodane jest obciążenie.



Rys. 63. Możliwe rodzaje zadawanych obciążeń (a), obciążenie ciągłe (b), dodawanie siły (c)
 Fig. 63. Possible types of applied loads (a), continuous load (b), adding force (c)

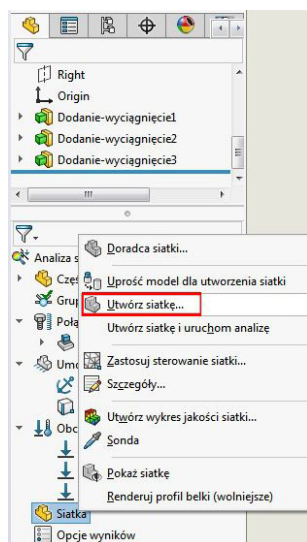


d)

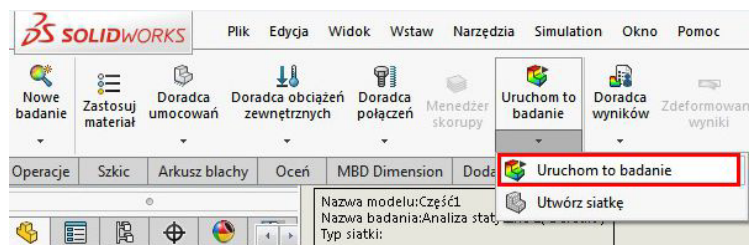
Rys. 63. cd. Dodawanie momentu (d)

Fig. 63. cont. Adding moment (d)

W dalszej kolejności należy podzielić belkę na elementy skończone, klikając prawym przyciskiem myszy na siatkę i wybierając z dostępnego menu „Utwórz siatkę” (rys. 64), a później należy uruchomić obliczenia (rys. 64).



a)

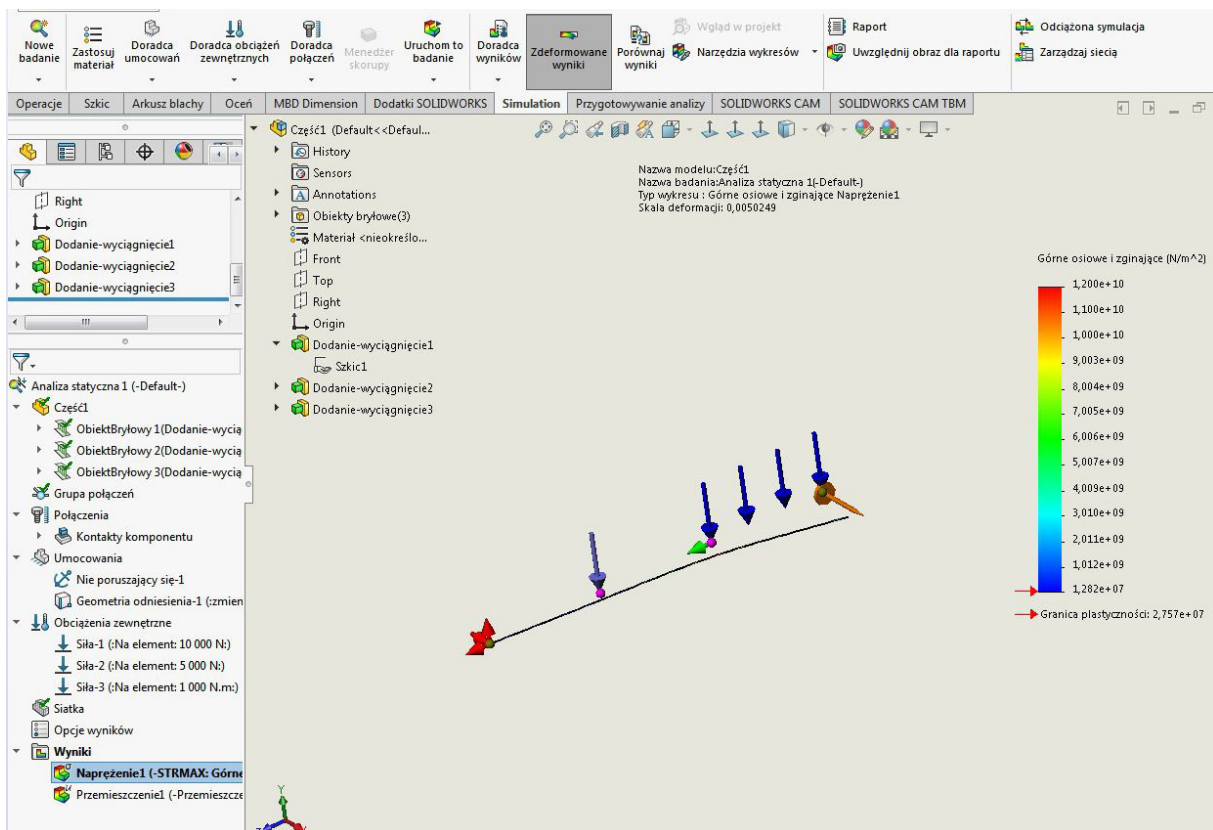


b)

Rys. 64. Podział bryły na elementy skończone (a) i uruchomienie badań (b)

Fig. 64. Division of a solid into finite elements (a) and running the study (b)

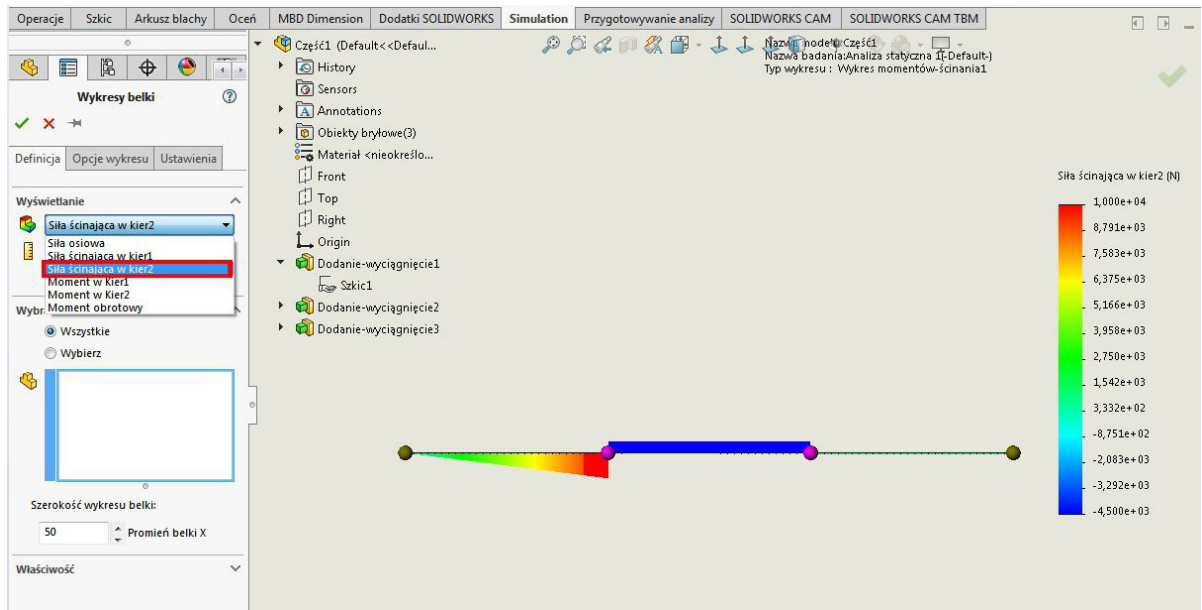
Po wykonaniu obliczeń dostępne będą wykresy jak na rys. 65.



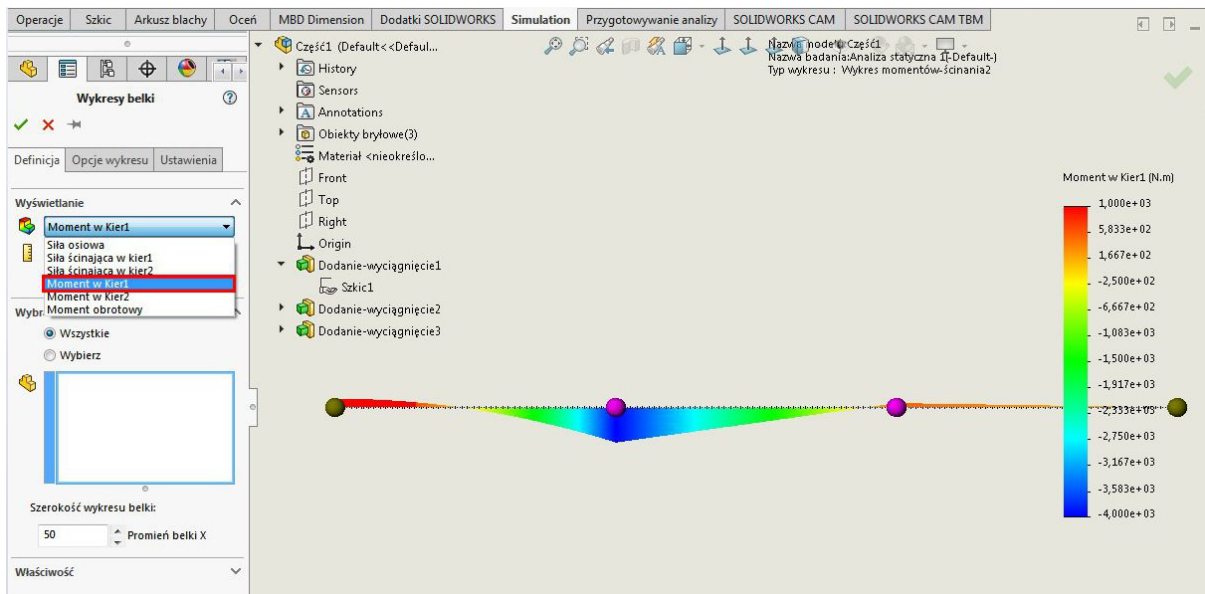
Rys. 65. Wykresy naprężeń
Fig. 65. Stress diagrams

Następnie należy usunąć oznaczenia podpór (i obciążeń), klikając kolejno na „Umocowania” („Obciążenia”) i na funkcję „Ukryj wszystko”.

Potem należy sporządzić wykresy momentów gnących i sił tnących. W tym celu należy kliknąć prawym klawiszem myszki na „Wykresy” i wybierać „Zdefiniuj wykresy belki”, a następnie wybierać opcję „Siłę ścinającą w kierunku 2” (rys. 66a), jeśli chcemy sporządzić wykresy siły tnącej, a jeśli chcemy sporządzić wykresy momentów gnących – wybierać „Moment w kierunku 1” (rys. 66b).



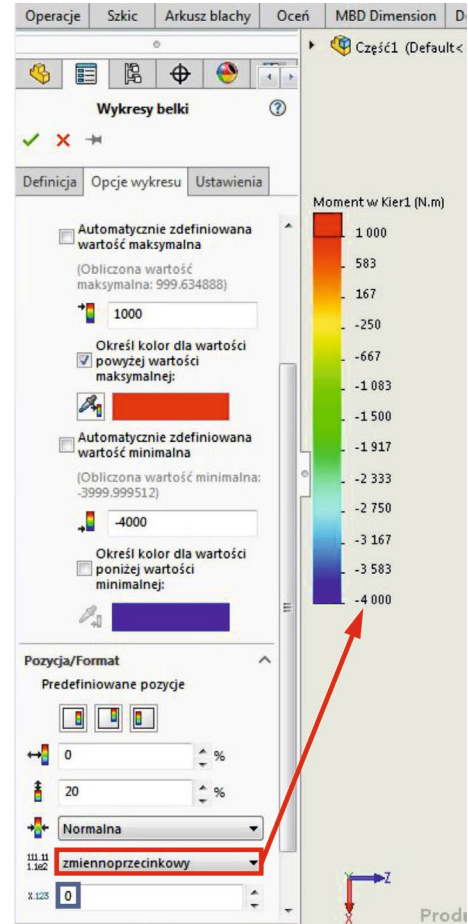
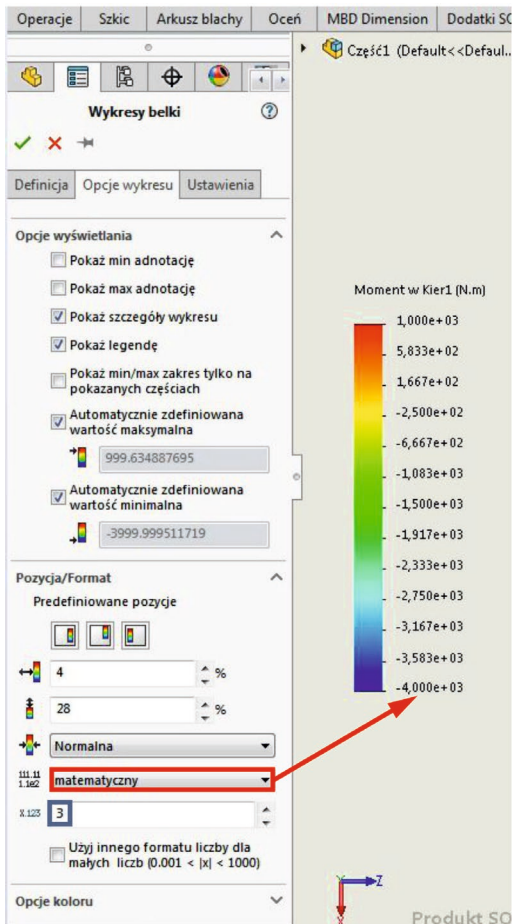
a)



b)

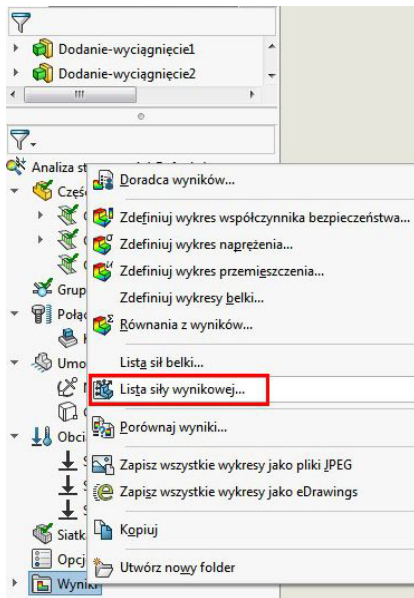
Rys. 66. Wykresy wielkości wewnętrznych: siły tnącej (a) i momentu gnącego (b)
 Fig. 66. Diagrams of internal action: shear force (a) and bending moment (b)

W dalszej kolejności należy sformatować legendę, zmieniając jednostki z Pa na MPa, a także format wyświetlania wyników. Aby zmienić format wyświetlania wyników, zamiast sposobu „matematycznego” trzeba wybrać „zmiennoprzecinkowy”(rys. 67).

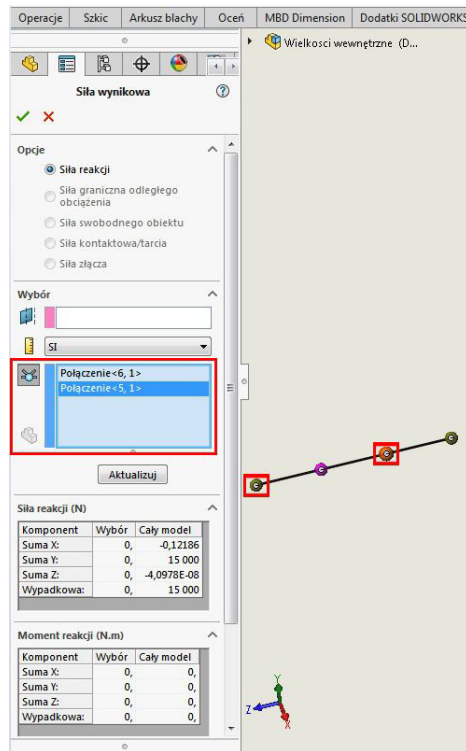


Rys. 67. Formatowanie legendy: zmiana formatu wyświetlania wyników
 Fig. 67. Legend formatting: changing the result display format

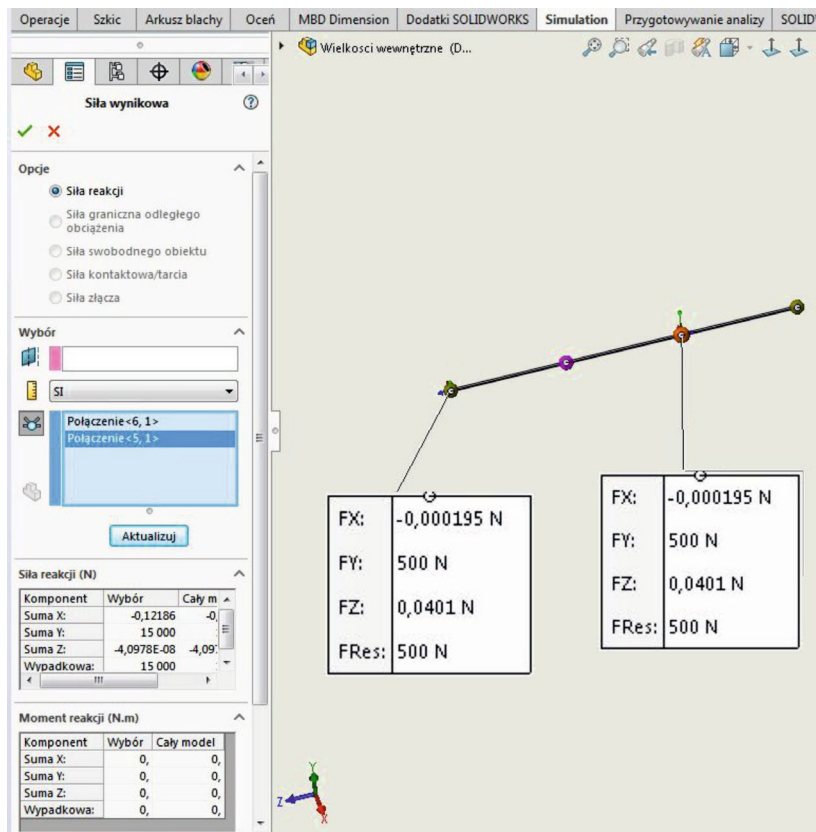
Aby wyznaczyć wartości reakcji w podporach, należy kliknąć prawym przyciskiem myszy na „Wyniki” i wybrać opcję „Lista siły wynikowej” (rys. 68). W miejscu połączeń trzeba dodać miejsca, w których występują podpory.



a)



b)

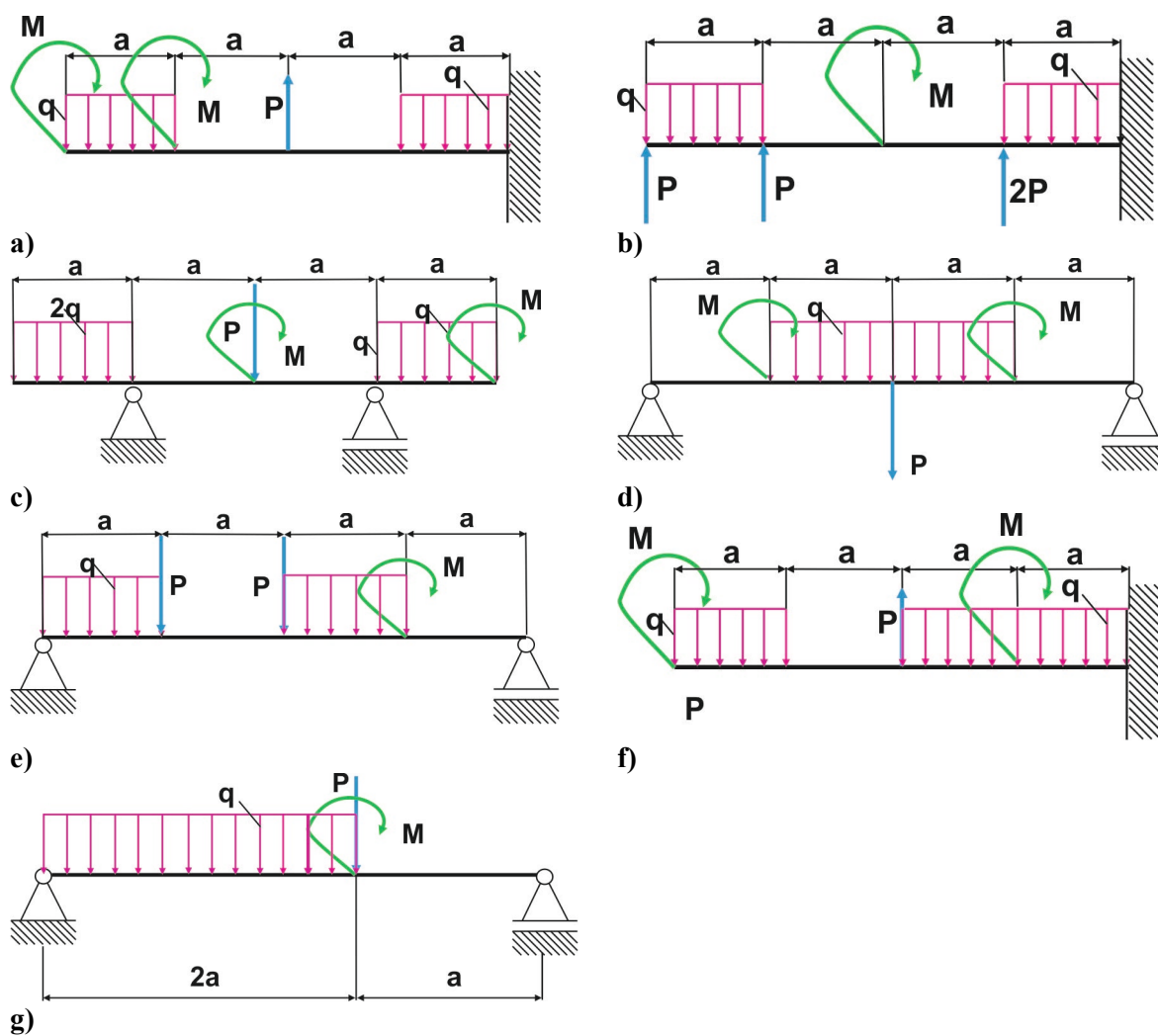


c)

Rys. 68. Wyznaczanie reakcji za pomocą programu SolidWorks
 Fig. 68. Determining reactions with the SolidWorks program

Zadania do wykonania

Wyznacz wartości reakcji oraz sporządź wykresy wielkości wewnętrznych belek pokazanych na rys. 69. W obliczeniach przyjąć $a = 1\text{ m}$, $q = 10\text{ kN/m}$, $P = 5\text{ kN}$, $M = 1\text{ kNm}$, a przekrój belki stanowi prostokąt o wysokości 30 mm i szerokości 25 mm .



Rys. 69. Belki z naniesionymi obciążeniami
Fig. 69. Beams with marked loads

6. UŻYCIE „KALKULATORA BELKI” W PRZYKŁADOWYCH OBLICZENIACH PROJEKTOWO-SPRAWDZAJĄCYCH

W tym ćwiczeniu studenci zapoznają się z dodatkowym narzędziem oprogramowania, pozwalającym szybko wykonać typowe obliczenia projektowe, tzn. dobór przekroju belki, lub sprawdzające, gdy dla znanego kształtu i przekroju belki oblicza się naprężenie rozciągające lub ściskające w elemencie poddanym zginaniu.

Cel główny ćwiczenia: zapoznanie się z opcją „Kalkulatora belki”, która nie wymaga rysowania modelu belki, definiowania podpór czy też obciążenia w sposób przedstawiony w rozdziale 5.

Cel pomocniczy ćwiczenia: wykorzystanie bazy danych zawierającej różne profile kształtowników produkowanych przez hutnictwo; korzystanie z katalogu wyrobów hutniczych [9–10].

Opis zadania: belki wykonuje się z produkowanych przez hutnictwo i dostępnych na rynku kształtowników, takich jak dwuteowniki, teowniki, ceowniki i kątowniki oraz rury okrągłe, kwadratowe lub prostokątne. Sposób podparcia lub obciążenia belek jest często typowy; stąd też poradniki konstruktorów podają gotowe wzory na ugięcie, maksymalny moment gnący i siłę tnącą dla takich przypadków. Tak też działa „Kalkulator belki” z pakietu „SOLIDWORKS Toolbox Utilities”. Profile hutnicze dostępne są w „Kalkulatorze belki” przez przycisk „Belki”, osobno zaś w narzędziu „Stal konstrukcyjna” z tego samego pakietu.

Właściwości mechaniczne – „Kalkulator belki” wykorzystuje gotowe profile stalowe, stąd pokazywany w odpowiednim okienku moduł Younga 200 GPa. Można oczywiście wpisać wartość E innego materiału. Pozostałe właściwości mechaniczne, jak wytrzymałość na rozciąganie czy granica plastyczności, nie są wykorzystywane przez oprogramowanie, jednak mogą być użyteczne przy obliczaniu naprężenia dopuszczalnego (przykład pokazano w dalszej części). W przypadku sprawdzenia naprężenia można posłużyć się bazą danych materiałowych SolidWorksa.

Przypomnienie wiadomości z wytrzymałości materiałów

Niniejsze oprogramowanie wykorzystuje pojęcia znane z przedmiotu „Wytrzymałość materiałów” [3, 7, 8]. W tabelach 3 i 4 przedstawiono zestawienie najważniejszych z nich oraz niektóre wzory na ugięcie i naprężenie maksymalne. Zawsze należy zwrócić uwagę na orientację przekroju względem osi układu współrzędnych przy obliczaniu lub wykorzystywaniu momentu bezwładności przekroju lub wskaźnika wytrzymałości przekroju na zginanie!

Tabela 3

Podstawowe wzory na osiowe momenty bezwładności i wskaźniki zginania

Przekrój	Prostokątny	Kołowy	Pierścieniowy (rura)
Moduł bezwładności przekroju, J	$J = \frac{bh^3}{12}$	$J = \frac{\pi d^4}{64}$	$J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$
Wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie (sprężysty), W	$W = \frac{bh^2}{6}$	$W = \frac{\pi d^3}{32}$	$W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}$


gdzie: b – szerokość, h – wysokość prostokąta; d – średnica koła; D/d – średnica zewnętrzna, wewnętrzna rury.

Tabela 4

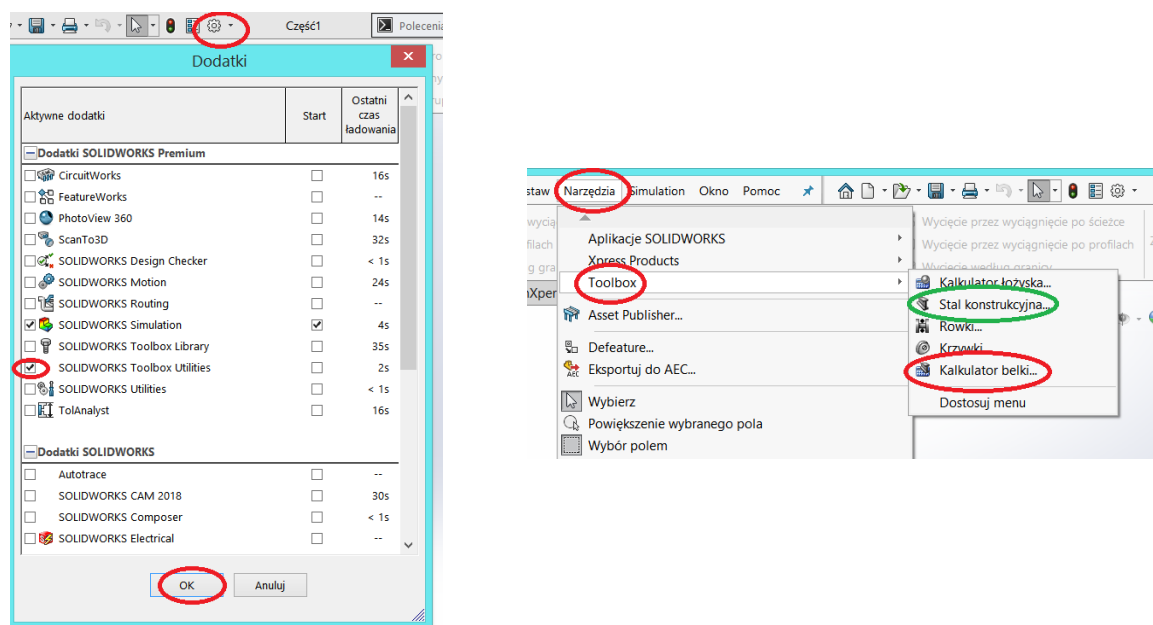
Podstawowe wzory na strzałkę ugięcia i maksymalne naprężenie przy zginaniu

Sposób umocowania i obciążenia belki	y_{maks}	σ_{maks}
Utwierdzona o długości l , obciążenie skupione F	$\frac{Fl^3}{3EJ}$	$\frac{Fl}{W}$
Utwierdzona o długości l , obciążenie rozłożone q	$\frac{ql^4}{8EJ}$	$\frac{ql^2}{2W}$
Podparta dwustronnie o długości l , obciążenie skupione F w odległości a i b od podpór	$\frac{Fa^2b^2}{3EJl}$	$\frac{Fab}{lW}$
Podparta dwustronnie o długości l , obciążenie rozłożone q	$\frac{5ql^4}{384EJ}$	$\frac{ql^2}{4W}$

Gdzie znaleźć narzędzie „Kalkulator belki”?

Aby uaktywnić narzędzie „Kalkulator belki”, należy odnaleźć ikonę  na końcu górnego paska panelu oprogramowania. Po otwarciu tej opcji należy wybrać „Dodatki” i tam znaleźć pozycję „SOLIDWORKS Toolbox Utilities” (rys. 70), a następnie zatwierdzić wybór przyciskiem OK. Załadowanie tego dodatku może chwilę potrwać.

Aktywny „Kalkulator belki” dostępny jest w pasku „Narzędzia” (rys. 70), gdzie po otwarciu należy wybrać „Toolbox”, a w nim „Kalkulator belki...”; tutaj również znajduje się narzędzie „Stal konstrukcyjna”, które może być stosowane samodzielnie lub jest elementem „Kalkulatora belki” przez przycisk „Belki” w jego obrębie.



Rys. 70. Wybór dodatku SOLIDWORKS Toolbox Utilities i jego uruchomienie
Fig. 70. Choice of the Add-ins – SOLIDWORKS Toolbox Utilities and its launching

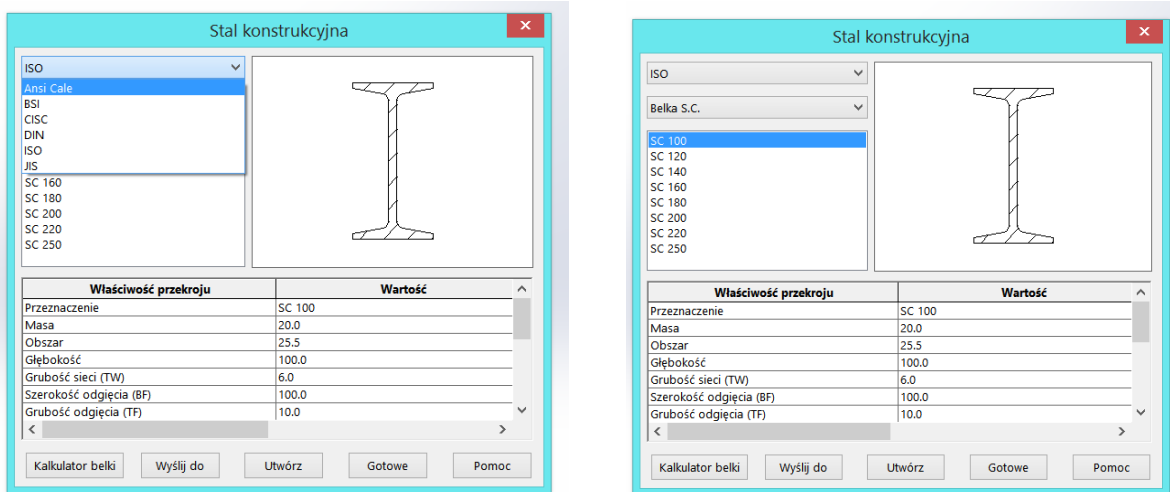
Zawartość panelu „Stal konstrukcyjna”

Oprócz narzędzia „Kalkulator belki” istnieje osobne narzędzie – „Stal konstrukcyjna”. Jest to katalog wyrobów hutniczych podzielonych według norm (Ansi, BSI, CISN, DIN, ISO i JIS), a w ich obrębie podzielonych na wyroby ze względu na kształt. Należy być ostrożnym, gdyż niektóre nazwy są niezgodne z polską terminologią, np. nie występuje nazwa dwuteownik, oraz nazwy poszczególnych parametrów profilu mogą być mylące, np. „przeznaczenie” zamiast „oznaczenie”, „głębokość” zamiast „wysokość” (rys. 71).

Zawartość panelu „Kalkulator belki”

Jak wspomniano, zasadniczo istnieją 2 typy obliczeń belek i jest to widoczne w panelu „Kalkulator belki”. Niemniej zawsze należy podać podstawowe dane występujące w tabeli 5 i rys. 72.

Sposób działania „Kalkulatora belki” wymaga, aby 1 z dostępnych pól było wolne, a pozostałe wypełnione. Wtedy po naciśnięciu przycisku „Rozwiąż” puste pole będzie wypełnione wartością liczbową zgodną z jednostką wskazywaną przez programowanie.



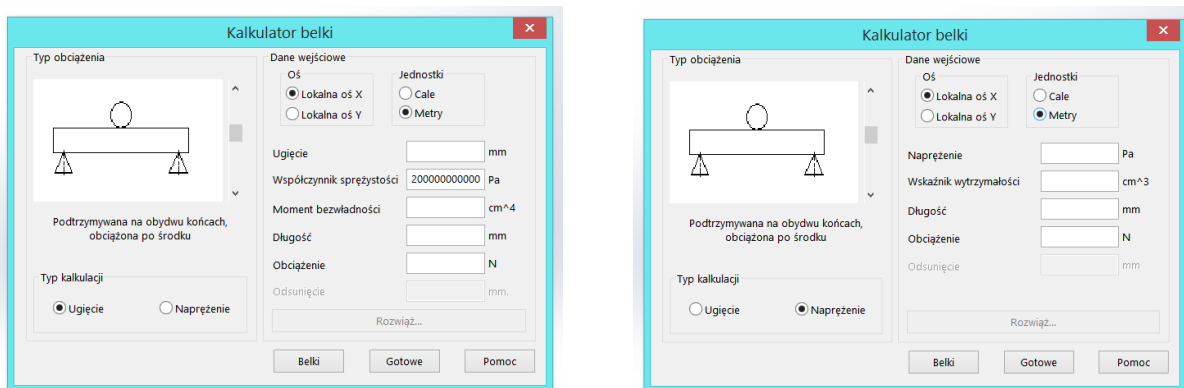
Rys. 71. Narzędzie „Stal konstrukcyjna”, dostępne normy produkcyjne oraz przykład stosowanego nazewnictwa

Fig. 71. Tool „Structural Steel”, available manufacturing standards and an example of used terminology

Wykaz wielkości potrzebnych do obliczeń:

- Typ kalkulacji „Ugięcie”: ugięcie, współczynnik sprężystości (moduł Younga!), moment bezwładności, długość, obciążenie i odsunięcie (w niektórych wypadkach).
- Typ kalkulacji „Napężenie”: napężenie, wskaźnik wytrzymałości, długość, obciążenie i odsunięcie (w niektórych przypadkach).

Wspomniane pole „Odsunięcie” występuje w przypadku typu obciążenia „Podtrzymywana na obydwu końcach, niesymetrycznie obciążona” i „Podtrzymywana na obydwu końcach, dwa symetryczne obciążenia”.



Rys. 72. Pola do wypełnienia w przypadku wariantów „Ugięcie” i „Napężenie”

Fig. 72. Fields to fill out in case of options „Deflection” and „Stress”

Możliwości wyboru przy wykorzystaniu „Kalkulatora belki”

Wybór	Nazewnictwo programu	Typowy opis z wytrzymałości materiałów
Typ obciążenia	nieruchoma na jednym końcu, obciążona na drugim końcu	jednostronnie utwierdzona, obciążona siłą skupioną na końcu
	nieruchoma na jednym końcu, równomiernie obciążona	jednostronnie utwierdzona, obciążenie ciągłe równomierne
	podtrzymywana na obydwu końcach, obciążona pośrodku	obustronnie podparta, obciążenie siłą skupioną w środku belki
	podtrzymywana na obydwu końcach, równomiernie obciążona	obustronnie podparta, obciążenie ciągłe równomierne
	podtrzymywana na obydwu końcach, niesymetrycznie obciążona	obustronnie podparta, obciążenie siłą skupioną nie w środku belki
	podtrzymywana na obydwu końcach, 2 symetryczne obciążenia	obustronnie podparta, obciążenie 2 równymi siłami skupionymi, symetrycznie względem środka belki
Typ kalkulacji	„Ugięcie” lub „Napężenie”	obliczenie sprawdzające lub projektowe
Dane wejściowe/oś	Lokalna oś X lub Y	wybór osi (płaszczyzny) obojętnej przy zginaniu
Jednostki	do wyboru „Cale” lub „Metry”	wybrać „Metry”

Przykłady użycia „Kalkulatora belki” w zależności od rodzaju obliczeń

Uwaga – oprogramowanie nie pozwala na zmianę jednostek poszczególnych wielkości, stąd należy wpisać moduł Younga w paskalach. Można używać notacji matematycznej, np. $200 \text{ GPa} = 200e9 \text{ Pa} = 2e11 \text{ Pa}$.

Obliczenia projektowe – w celu dobrania odpowiedniego rodzaju i wielkości elementu.

Typ kalkulacji: Ugięcie

Polecenie

Wyliczyć moment bezwładności przekroju belki, a następnie wyszukać w „Kalkulatorze belki” odpowiedni element, który będzie odpowiadał zadaniu.

Na początku wybiera się typ obciążenia i wypełnia pola odpowiednimi danymi z zadania. Należy pamiętać, że jedno pole musi pozostać puste. W omawianym przypadku jest to „moment bezwładności” (pola przekroju belki względem wybranej osi – zgodnie z pełną nazwą tej wielkości jako charakterystyki geometrycznej figur płaskich). Przycisk „Rozwiąż” uruchamia oprogramowanie i pokazuje się szukana wielkość (rys. 73). Ostatecznym krokiem jest odnalezienie profilu belki spełniającego warunek, że jego moment bezwładności będzie równy lub większy niż obliczony. Czynność tę wykonuje się, naciskając przycisk „Belki” lub wracając do narzędzia „Stal konstrukcyjna”.

Dane:

- belka podparta na obu końcach, obciążona symetrycznie;
- ugięcie – 0,1% rozpiętości belki, w omawianym przypadku 5 mm;
- współczynnik sprężystości wzdłużnej (moduł Younga) – 200 GPa = $2e11$ Pa;
- długość – 5 m = 5000 mm;
- obciążenie – 415 kN = $415e3$ N;
- odsunięcie – 1500 mm.

Szukane: moment bezwładności przekroju belki.

The image shows two software windows. The left window, 'Kalkulator belki', displays a beam diagram and input fields: 'Ugięcie' (5 mm), 'Współczynnik sprężystości' (200000000000 Pa), 'Moment bezwładności' (171187.500000 cm⁴), 'Długość' (5000 mm), 'Obciążenie' (415e3 N), and 'Odsunięcie' (1500 mm). The 'Belki' button is highlighted with a green circle. The right window, 'Stal konstrukcyjna', shows a list of steel profiles with 'W760x265x161' selected. A table below lists properties for this profile, with 'Moment bezwładności (IX)' highlighted in red, showing a value of 186060.81.

Właściwość przekroju	Wartość
Promień zaokrąglenia (RI)	17.0
Promień zaokrąglenia brzegu (RA)	17.0
Promień ruchu wirowego (IT)	6.62
Moment bezwładności (IX)	186060.81
Wskaźnik wytrzymałości (WX)	4909.26
Promień ruchu wirowego (IX)	30.17
Moment bezwładności (IV)	6072.96
Wskaźnik wytrzymałości (WV)	456.61

Rys. 73. Widok panelu „Kalkulator belki” po rozwiązaniu zadania oraz wybrany profil

Fig. 73. Panel „Beam Calculator” after solving the task and the chosen profile

Odpowiedź

Należy dobrać stalowy profil hutniczy. Może być nim dwuteownik według norm DIN o oznaczeniu W760 x 265 x 161, ponieważ spełnia on wymagania zadania. Moment bezwładności przekroju tego profilu wynosi 186 tys. cm⁴, czyli jest większy

od 171 tys. cm^4 (wynik obliczony w zadaniu). Oczywiście można zaproponować inny profil pojedynczy lub grupę, np. 10 ceowników według ISO CH 400x59 o momencie bezwładności $17\,200\text{ cm}^4$.

Obliczenia sprawdzające – w celu sprawdzenia belki o znanym przekroju pod względem przyłożonej siły, oczekiwanego ugięcia, rozpiętości itd.

Typ kalkulacji: Naprężenie

Polecenie

Znając kształt i wymiary belki, dobrać wartość siły skupionej F przyłożonej na końcu belki jednostronnie utwierdzonej, tak aby maksymalne naprężenie normalne od zginania wynosiło 50% granicy plastyczności materiału belki. Warunek ten oznacza liczbę bezpieczeństwa $n = 2$.

Dane

Belka o przekroju rurowym według norm ISO o oznaczeniu i wymiarach 219,1 x 5,9 mm (średnica zewnętrzna x grubość ścianki!), ze stali węglowej; jednostronnie utwierdzona; obciążona siłą skupioną przyłożoną na wolnym końcu.

Naprężenie dopuszczalne – wyliczyć 50% granicy plastyczności – skorzystać z bazy danych oprogramowania.

Wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie – wyliczyć z odpowiedniego wzoru z tabeli 1 i porównać z wielkością przedstawioną w danych profilu, tzn. 205 cm^3 .

Długość – $1,5\text{ m} = 1500\text{ mm}$.

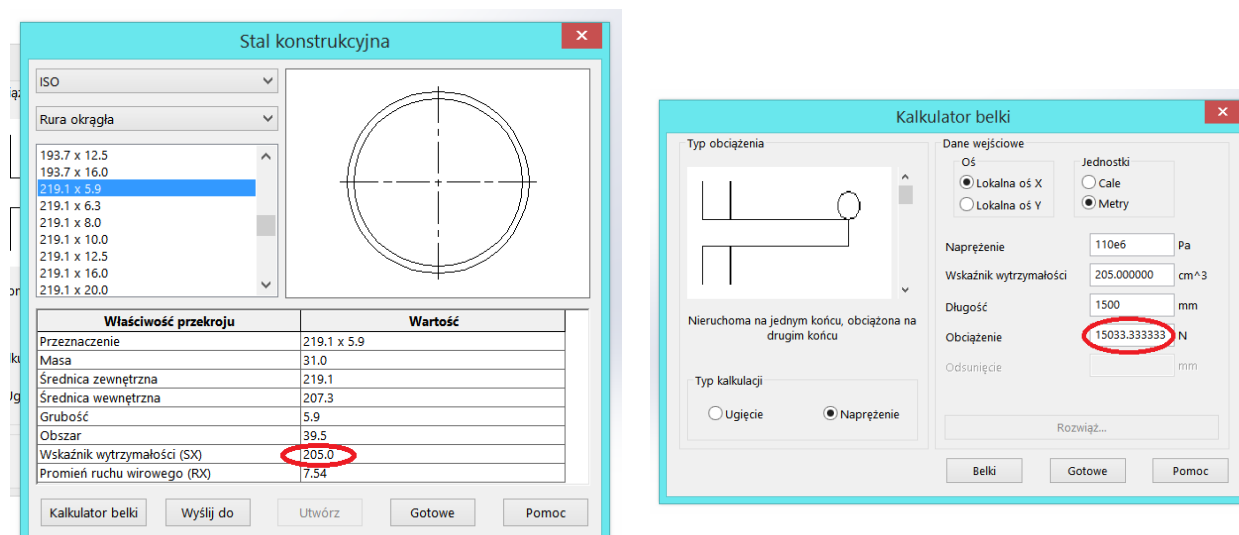
Szukane: obciążenie?

Obliczenia

Naprężenie dopuszczalne obliczono względem granicy plastyczności. Założono współczynnik bezpieczeństwa 2, co odpowiada 50% $R_{0,2}$.

Granica plastyczności stali węglowej (według bazy materiałowej „SolidWorks materials”) wynosi $220\,594\,000\text{ N/m}^2 = 221\text{ MPa}$. Należy wyliczyć 50% z 221 MPa, co daje 110,5 MPa.

Po wyliczeniu brakujących danych należy wpisać je w odpowiednie pola. W momencie wpisania wszystkich danych zostanie wolne pole „Obciążenie”, które po kliknięciu przycisku „Rozwiąż” zostanie automatycznie wyliczone (rys. 74).



Rys. 74. Widok analizowanego profilu oraz panelu „Kalkulator belki” po rozwiązaniu zadania
Fig. 74. Analysed profile and panel „Beam Calculator” after solving the task

Odpowiedź

Wartość siły skupionej F przyłożonej na końcu belki wynosi 15 kN.

Zadanie własne

Konstrukcja nośna platformy wagonu jest wykonana z 4 dwuteowników ISO SC 120 o długości 4,3 m rozstawionych obok siebie. Na platformie umieszczony jest zbiornik na wodę o wymiarach 4 x 2 x 2 m. Nie mając innych danych, wybrać najbardziej zbliżony przypadek obciążenia i wykorzystać w obliczeniach. Pomijając ciężar zbiornika, do jakiej wysokości można go napełnić wodą, jeśli założony współczynnik bezpieczeństwa wynosi 2,5?

7. BRYŁA RYSOWANA Z WYKORZYSTANIEM DODATKOWYCH PŁASZCZYZN

W tym ćwiczeniu studenci rysują przenikające się bryły z wykorzystaniem dodatkowych płaszczyzn.

Cel główny ćwiczenia: opanowanie definiowania dodatkowych płaszczyzn.

Cel pomocniczy ćwiczenia: rozwijanie wyobraźni przestrzennej.

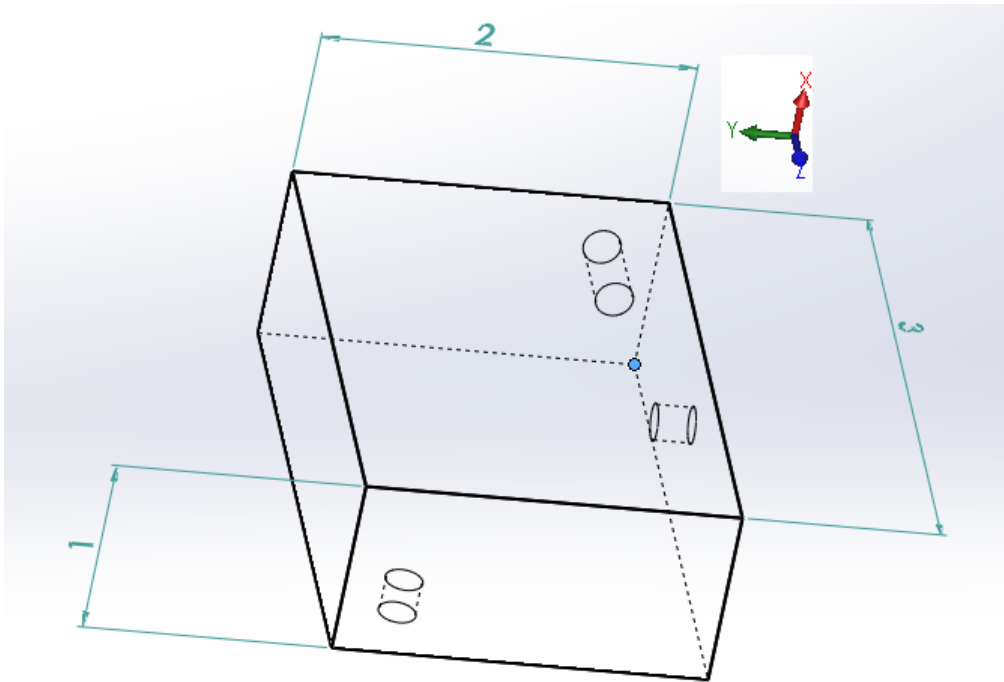
Opis zagadnienia: oprogramowanie pozwala na rysowanie brył z wykorzystaniem podstawowych operacji wyciągania dodania lub wycięcia oraz obrotów. Operacje te wykorzystują podstawowy układ 3 płaszczyzn. Czasami konieczne jest definiowanie dodatkowych płaszczyzn.

Prostopadłościan z otworami nieprzelotowymi i kanałami wewnętrznymi

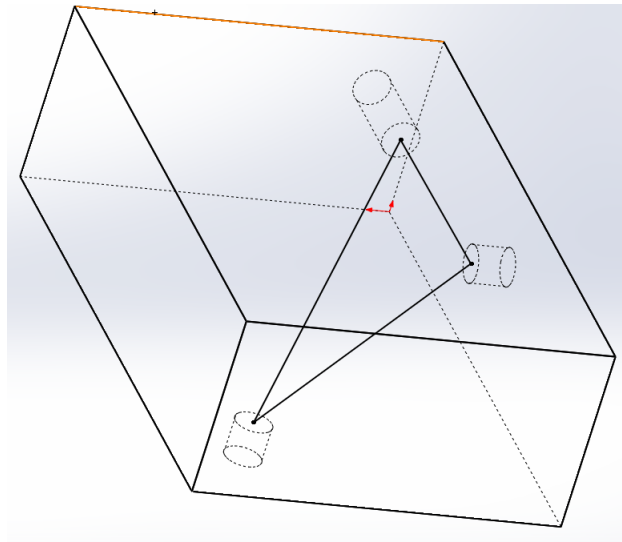
Należy narysować (wymiary mają charakter orientacyjny, można rysować przy dowolnej jednostce długości):

- prostopadłościan o bokach $1 \times 2 \times 3$; jeden z wierzchołków w środku układu współrzędnych, boki wzdłuż dodatniego zwrotu osi x , y i z !;
- narysować 3 otwory o promieniu $0,1$ zdefiniowane przez współrzędne środka (x, y) oraz długość: a) na płaszczyźnie przedniej $[0,7; 0,3]$ $l = 0,5$; b) na płaszczyźnie prawej $[2,6; 1,6]$ $l = 0,2$; c) na płaszczyźnie górnej $[0,6; -1,5]$ $l = 0,2$ (rys. 75);
- wstaw szkic 3D, narysuj linie, łącząc środki dna otworów (rys. 76);
- wstaw dodatkowe płaszczyzny, definiując je przez wskazanie punktu środka dna otworu oraz odcinka wychodzącego z niego (zaznaczyć opcję prostopadłości); należy najpierw wyjść ze szkicu – wtedy dostępna jest płaszczyzna w „Geometria odniesienia” (rys. 77);
- na dodanej płaszczyźnie należy narysować okrąg o promieniu $0,05$ i wyciągnąć wycięcie do kolejnego otworu – dla utrudnienia wycinać z odsunięciem wstecz i poza punkt końcowy linii łączącej dna otworów (rys. 78).

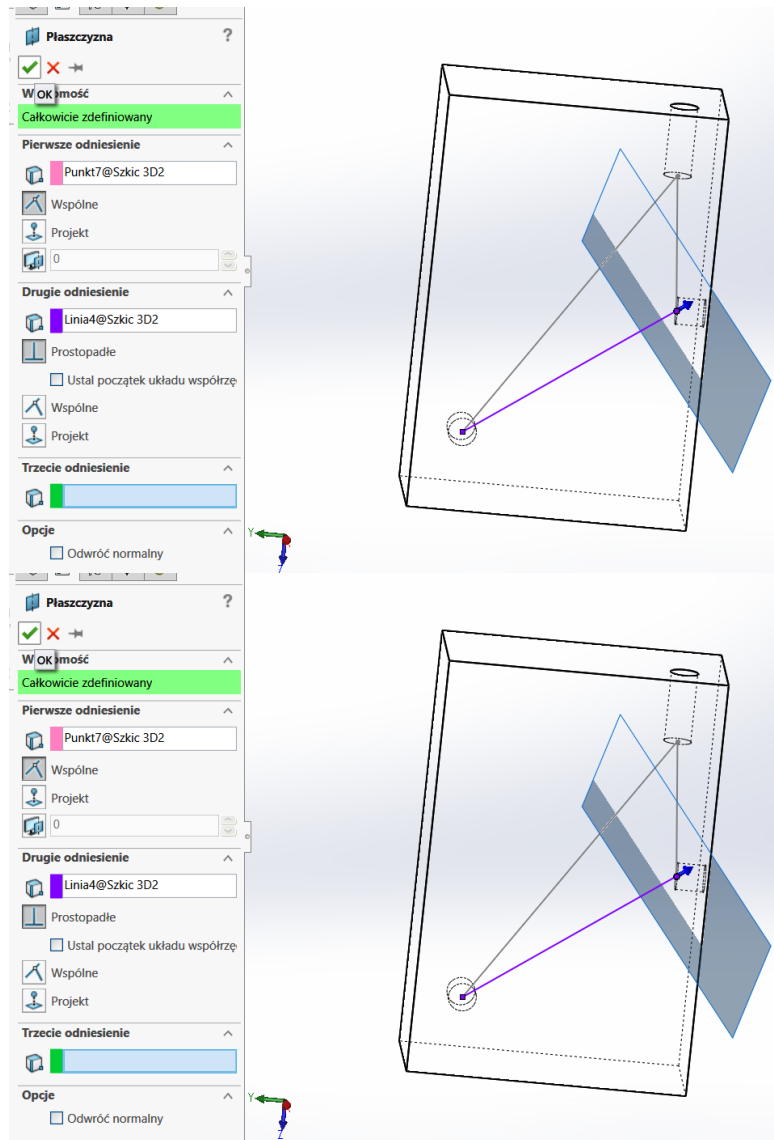
Ostateczny widok narysowanej części przedstawiono na rys. 79.



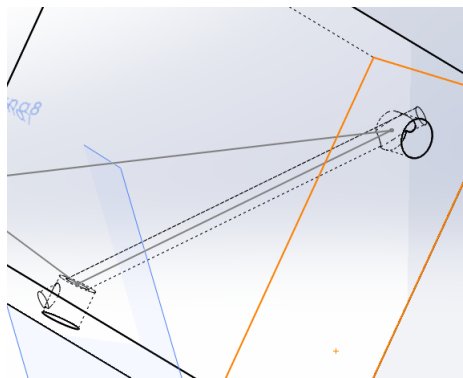
Rys. 75. Prostopadłościan z wyciętymi otworami – zaznaczono początek układu współrzędnych
Fig. 75. Rectangular prism with cut holes – origin of coordinate system is shown



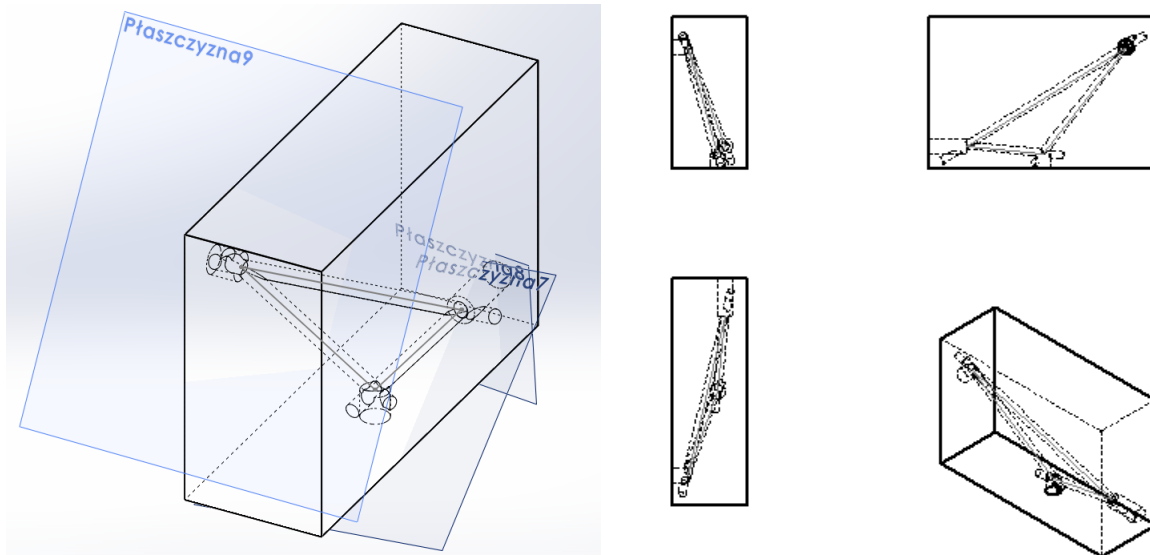
Rys. 76. Odcinki łączące środki den otworów
Fig. 76. Line segments linking centers of the hole bottoms



Rys. 77. Zdefiniowanie dodatkowej płaszczyzny
Fig. 77. Fully defined additional plane



Rys. 78. Wycięcie otworu łączącego dna otworów
Fig. 78. Extruded cuts linking hole bottoms



Rys. 79. Ostateczny widok części
Fig. 79. Final presentation of the part

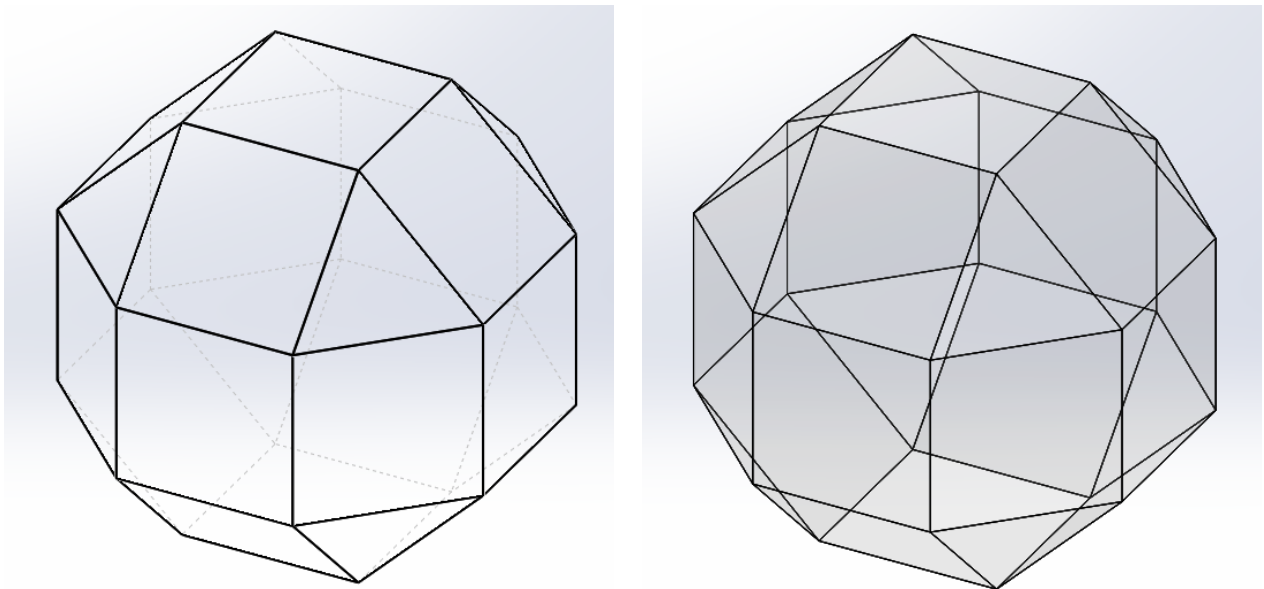
8. WIEŁOŚCIENNA KOSTKA SZKLANA JAKO PRZYKŁAD STOSOWANIA RÓŻNYCH TECHNIK MODELOWANIA

W tym ćwiczeniu studenci wykorzystają zdobyte umiejętności do narysowania bryły szklanej 26-ściennej. Powierzchnia bryły składa się z 18 kwadratów i 8 trójkątów równobocznych.

Cel główny ćwiczenia: wykorzystanie szkicu wieloboku foremego, kopiowanie i wklejanie szkicu, rysowanie i wyciąganie na 3 podstawowych płaszczyznach, dodawanie płaszczyzny, zapoznanie się ze specyfiką rysowania i oglądania materiałów przezroczystych jak szkło.

Cel pomocniczy ćwiczenia: pokazanie znaczenia matematyki, w szczególności trygonometrii i geometrii do zrozumienia budowy modelu przestrzennego, stosowanie różnych technik do uzyskania tego samego wyniku.

Opis zagadnienia: przedstawiona na rys. 80 bryła jest modelem ozdoby szklanej.



Rys. 80. Rysowana bryła szklana widoczna na 2 sposoby: z przerywanymi liniami niewidocznymi oraz jako przezroczysta bryła

Fig. 80. Modeled body viewed in 2 ways: hidden lines visible, and transparent body

W rzeczywistości bryła jest przezroczysta i po zdefiniowaniu materiału SolidWorks imituje tę cechę, co przeszkadza w rysowaniu. Pomaga wówczas geometryczne oglądanie bryły, gdzie linie niewidoczne ukazane są jako przerywane. Aby uniknąć tej niedogodności, można zdefiniować materiał dopiero na końcu modelowania!

Właściwości materiałowe – oprogramowanie zawiera własną bibliotekę materiałów. Oprócz właściwości fizycznych i mechanicznych SolidWorks imituje również wygląd materiału przez kolor i stan powierzchni, np. polerowana. Jedną z cech może być również przezroczystość.

Wstęp geometryczny

Rysowany będzie ośmiobok foremny opisany na okręgu o średnicy D . Analiza geometryczna pozwala powiązać długość boku tej figury płaskiej i średnicę okręgu przez zależność (1):

$$D = a[1 + 2\cos(45^\circ)] = a(1 + \sqrt{2}) \quad (1)$$

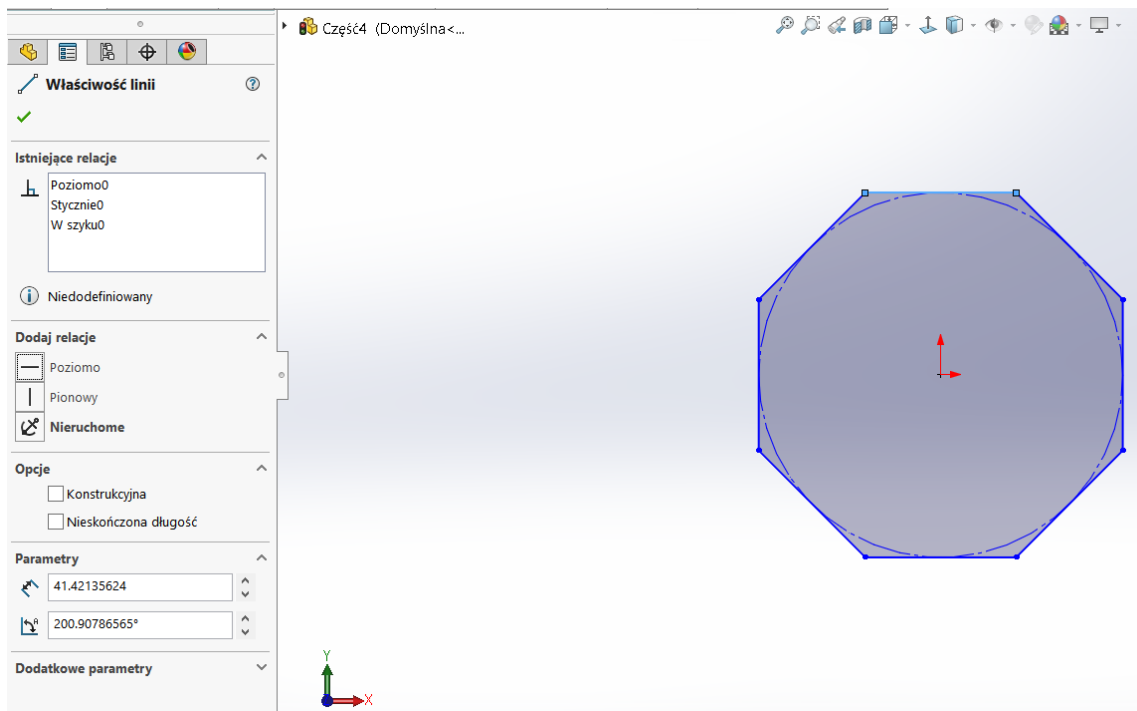
Przyjmując $D = 100$ mm, można obliczyć długość boku a , która będzie wykorzystana przy wyciągnięciu wieloboku.

Kroki budowania modelu

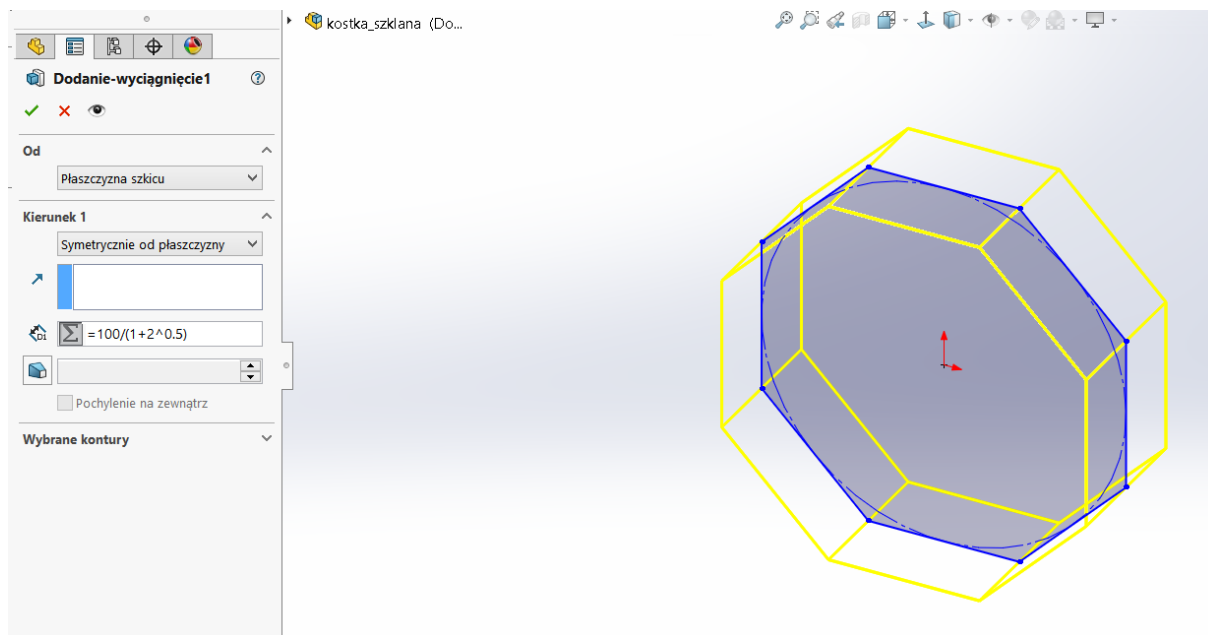
Jako pierwszy należy narysować na dowolnej płaszczyźnie podstawowej ośmiobok foremny, opisany na okręgu o średnicy 100 mm tak, aby bok położony najwyżej był poziomy. Zaleca się, aby środek ośmioboku był w środku układu współrzędnych (rys. 81). Program powinien pokazać długość tego boku, wielkość 41,42 mm można sprawdzić, wykorzystując wzór (1).

Kolejnym krokiem jest wyciągnięcie szkicu. Należy je dokonać „Symetrycznie od płaszczyzny” na odległość podaną równaniem (rys. 82).

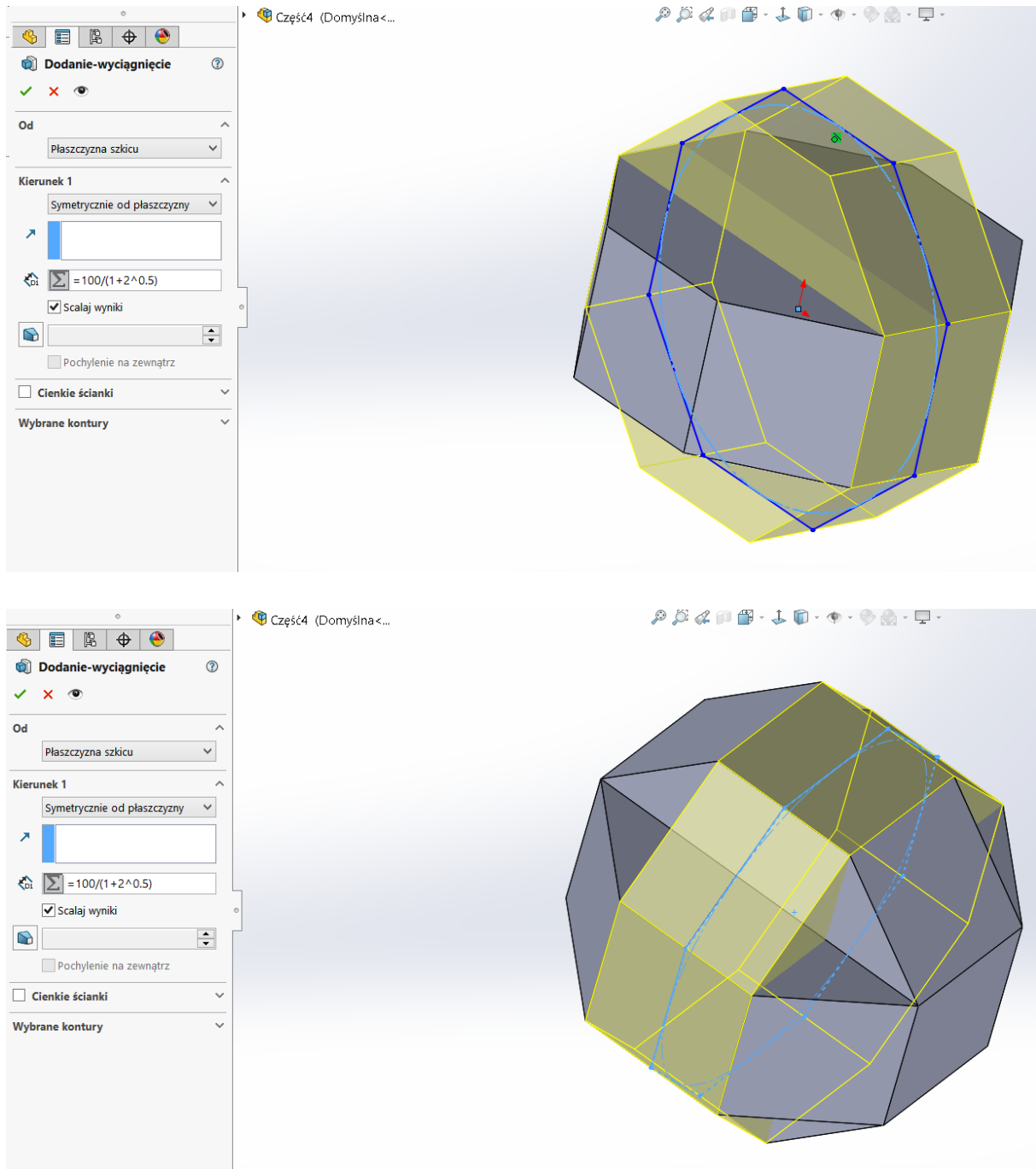
Należy teraz narysować ten sam ośmiobok na kolejnej płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny szkicu 1. Można jednak go skopiować za pomocą „Ctrl+C”, a potem przejść na kolejną płaszczyznę podstawową i wkleić go za pomocą „Ctrl+V”. Podobnie można znaleźć polecenia „Kopiuj” i „Wklej” w pasku „Edycja”. Kopiowanie i wklejanie powoduje, że nie trzeba ustawiać relacji jednego z boków. Następnie dokonuje się drugiego wyciągnięcia w identyczny sposób. Dokładnie tak samo postępuje się na trzeciej płaszczyźnie głównej (rys. 83). Wygląd bryły po tych operacjach przedstawia rys. 84.



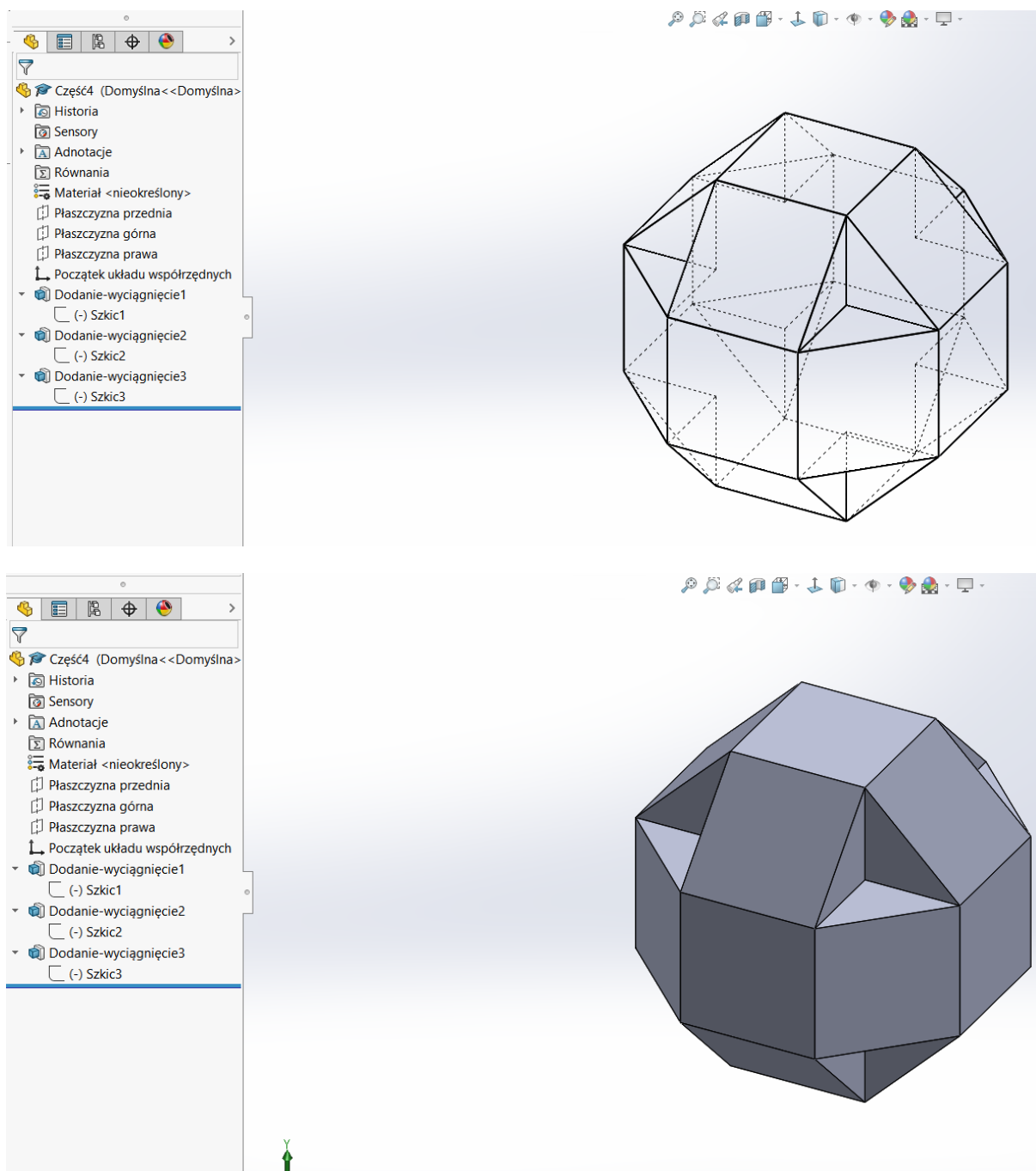
Rys. 81. Ośmiobok foremny wraz z relacjami jednego z boków
 Fig. 81. Regular octagon with its relations for one edge



Rys. 82. Pierwsze wyciągnięcie szkicu ośmioboku
 Fig. 82. First extruding of the octagon sketch

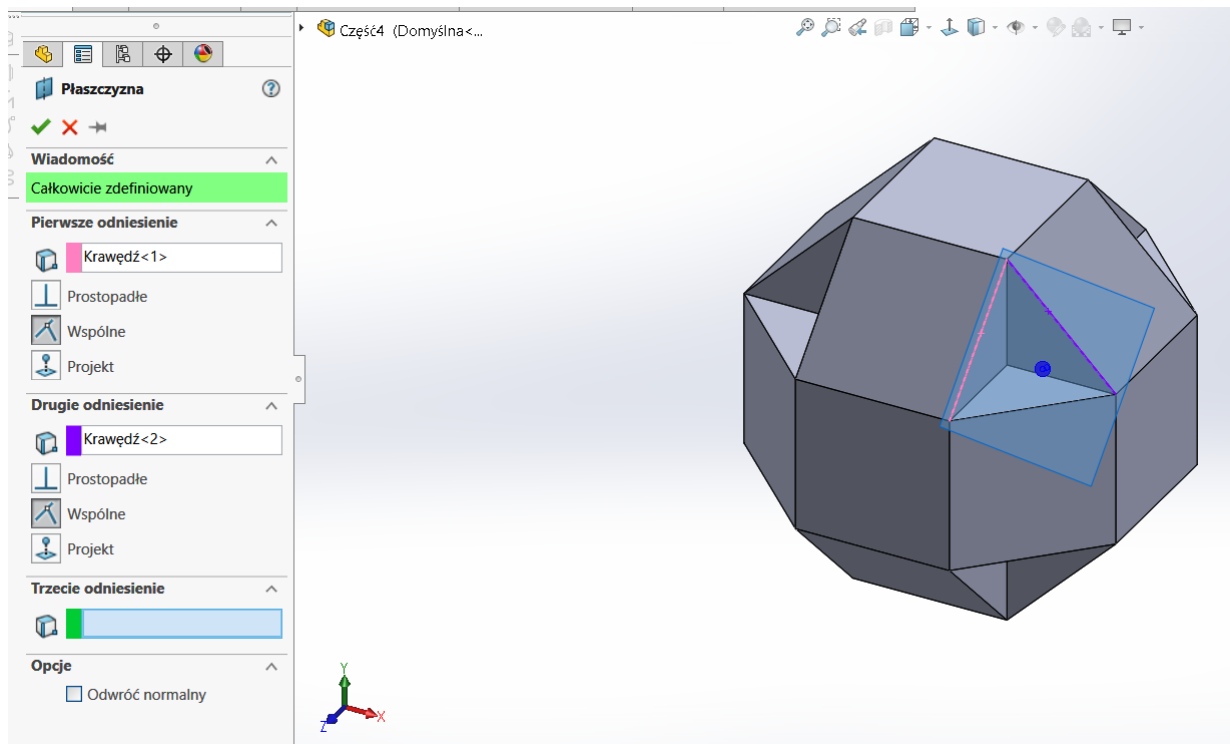


Rys. 83. Drugie i trzecie wyciągnięcie
Fig. 83. Second and third extruding



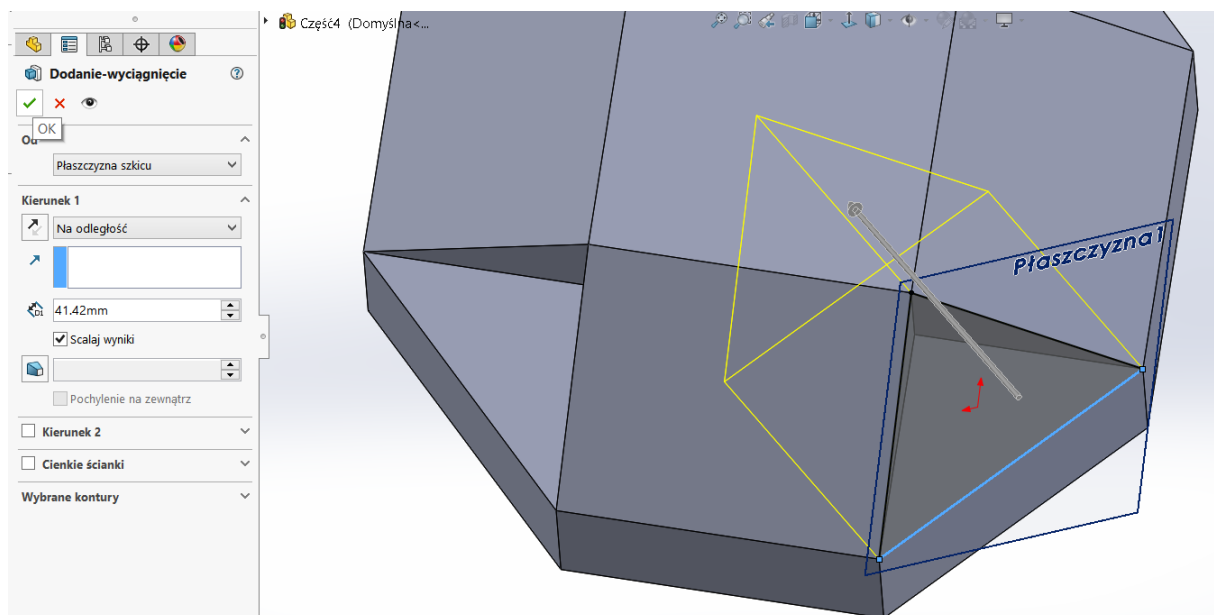
Rys. 84. Bryła po trzech wyciągnięciach widziana na 2 sposoby
 Fig. 84. Body after 3 extruding operations viewed in 2 ways

W kolejnym kroku należy przystąpić do „wypełnienia” wgłębień narożnych. Konieczne jest zdefiniowanie dodatkowej płaszczyzny. Kolejność wykonania jest następująca: „Operacje” → „Geometria odniesienia” → „Płaszczyzna”. Jeśli „Płaszczyzna jest niedostępna”, oznacza to, że jakiś szkic jest wciąż edytowany – należy wyjść ze szkicu. Płaszczyznę można zdefiniować, wybierając 3 punkty narożne lub, krócej, dwie krawędzie. Ten drugi sposób pokazano na rys. 85.



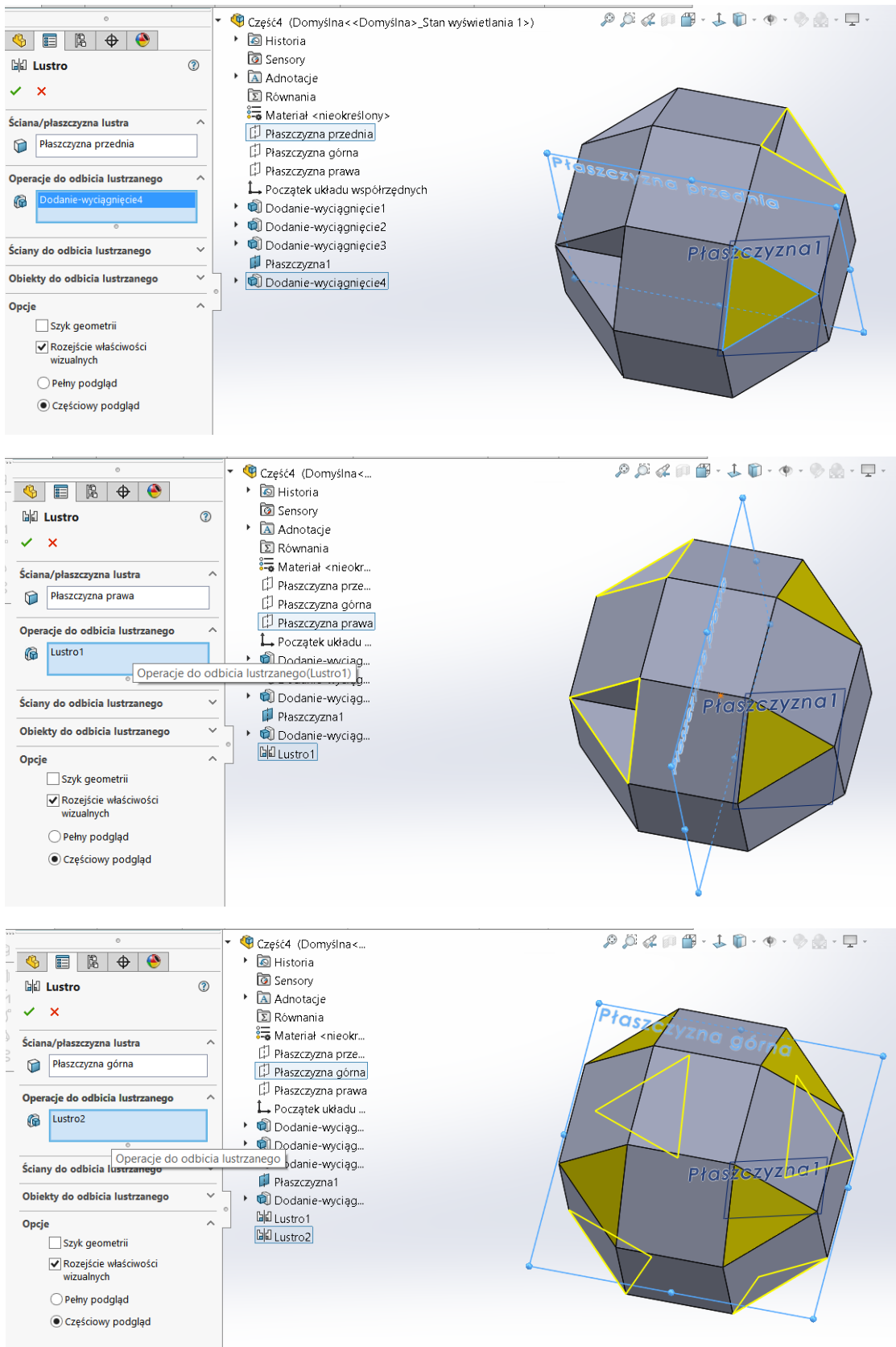
Rys. 85. Zdefiniowana płaszczyzna dodatkowa
 Fig. 85. Fully defined additional plane

Przystępuje się teraz do narysowania szkicu trójkąta (równobocznego) na dodanej płaszczyźnie. W kolejnym kroku należy ten szkic wyciągnąć w stronę bryły na dowolną odległość, ale taką, aby nie wysunąć się poza istniejącą bryłę – program zaproponuje 41,41 mm (z ostatnich operacji), można ją zaakceptować (rys. 86).



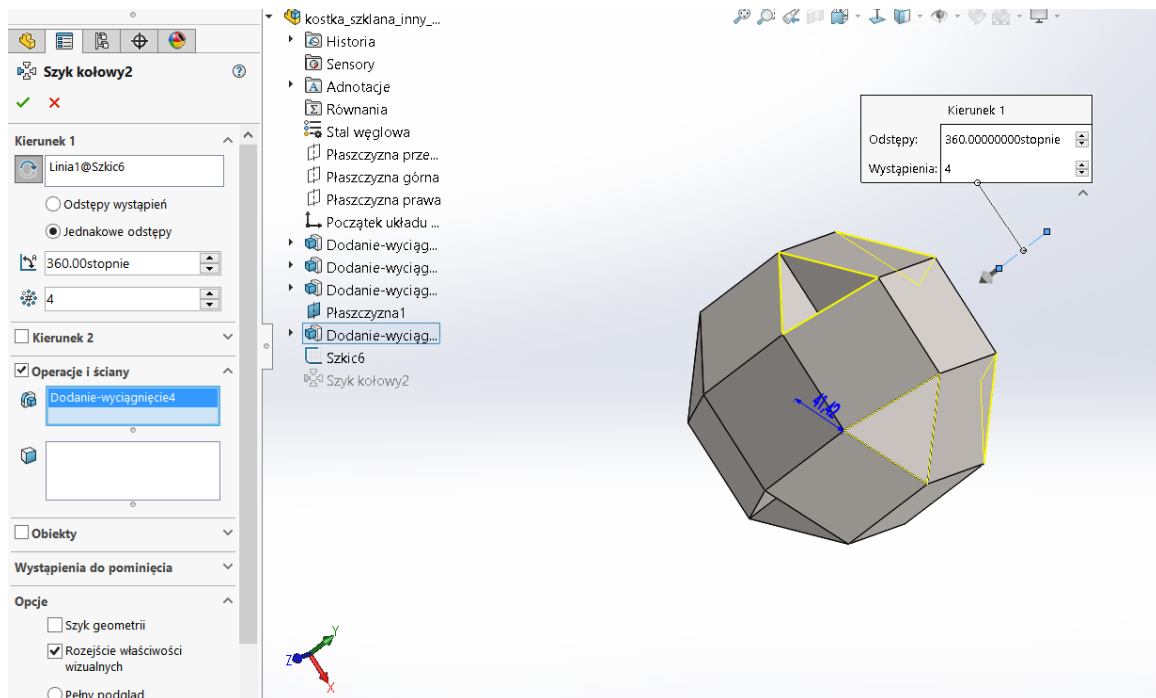
Rys. 86. Wyciągnięcie szkicu trójkąta
 Fig. 86. Sketch of triangle before extruding

W tym momencie wypełniono 1 z 8 naroży. Następnym wypełnień można dokonać, wykonując kolejne 3 lustra (rys. 87) lub szysk kołowy i 1 lustro.



Rys. 87. Kolejne operacje lustra
Fig. 87. Next operations of mirror

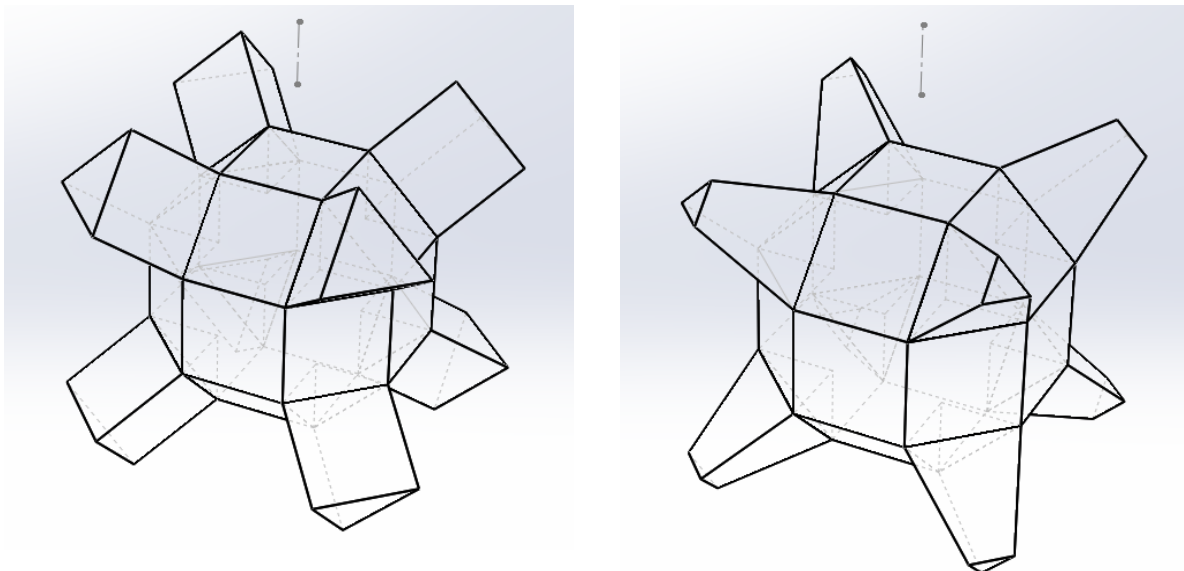
Ta druga możliwość wymaga jednak narysowania szkicu odcinka na jednej z płaszczyzn. Ten sposób prezentuje rys. 88.



Rys. 88. Szyk kołowy wraz z widocznym odcinkiem jako oddzielnym szkicem
Fig. 88. Circular pattern with a segment line visible as a separate sketch

Praca własna

Proponuje się narysować modyfikację tej bryły. Zamiast wypełniać trójkątne naroża, wyciągnąć je na zewnątrz, można również pochylić ich ściany. Przykłady pokazano na rys. 89. Należy zwrócić uwagę, że teraz te bryły są rozłączne – w oknie operacji pojawi się dodatkowa bryła!



Rys. 89. Modyfikacje bryły podstawowej
Fig. 89. Modification to the basic body

9. PRZENIKAJĄCE SIĘ BRYŁY RYSOWANE ZE SZKICU RĘCZNEGO

W tym ćwiczeniu studenci rysują 4 przenikające się bryły, tym razem na podstawie gotowego rysunku zestawienia (złożenia) lub skanu odręcznego szkicu oraz krótkiego opisu.

Cel główny ćwiczenia: sprawdzenie umiejętności rzeczywistego tworzenia grafiki na życzenie klienta według jego wyobrażeń, czytania rysunku zestawieniowego z zaznaczonymi liniami niewidocznymi.

Cel pomocniczy ćwiczenia: ćwiczenie techniki wyciągania oraz wycinania z odsunięciem, na odległość, rozumienie rysunków z przerywanymi liniami niewidocznymi.

Opis zagadnienia: rys. 90 przedstawia sześcian o boku A i grubości ściany B , przebijany dwoma bryłami; pierwsza to prostopadłościan o boku $F \times G$ przechodzący w bok $F \times E$ – w części szerszej jest otwór kwadratowy o boku D ; druga to walec eliptyczny o osiach C i DE , przechodzący w prostopadłościan o przekroju $D \times D$ i wysokości F , potem zaś w walec o promieniu D ; przebicie w środku symetrii sześcianu; część wspólna to prostopadłościan o bokach $F \times D \times D$; pozostałe wymiary dowolne.

STUDENCI W ZALEŻNOŚCI OD NUMERU KOMPUTERA MAJĄ INNE DANE WYMIAROWE (tabela 6)! Studenci tworzą 3 pliki poszczególnych części i jeden złożenia!

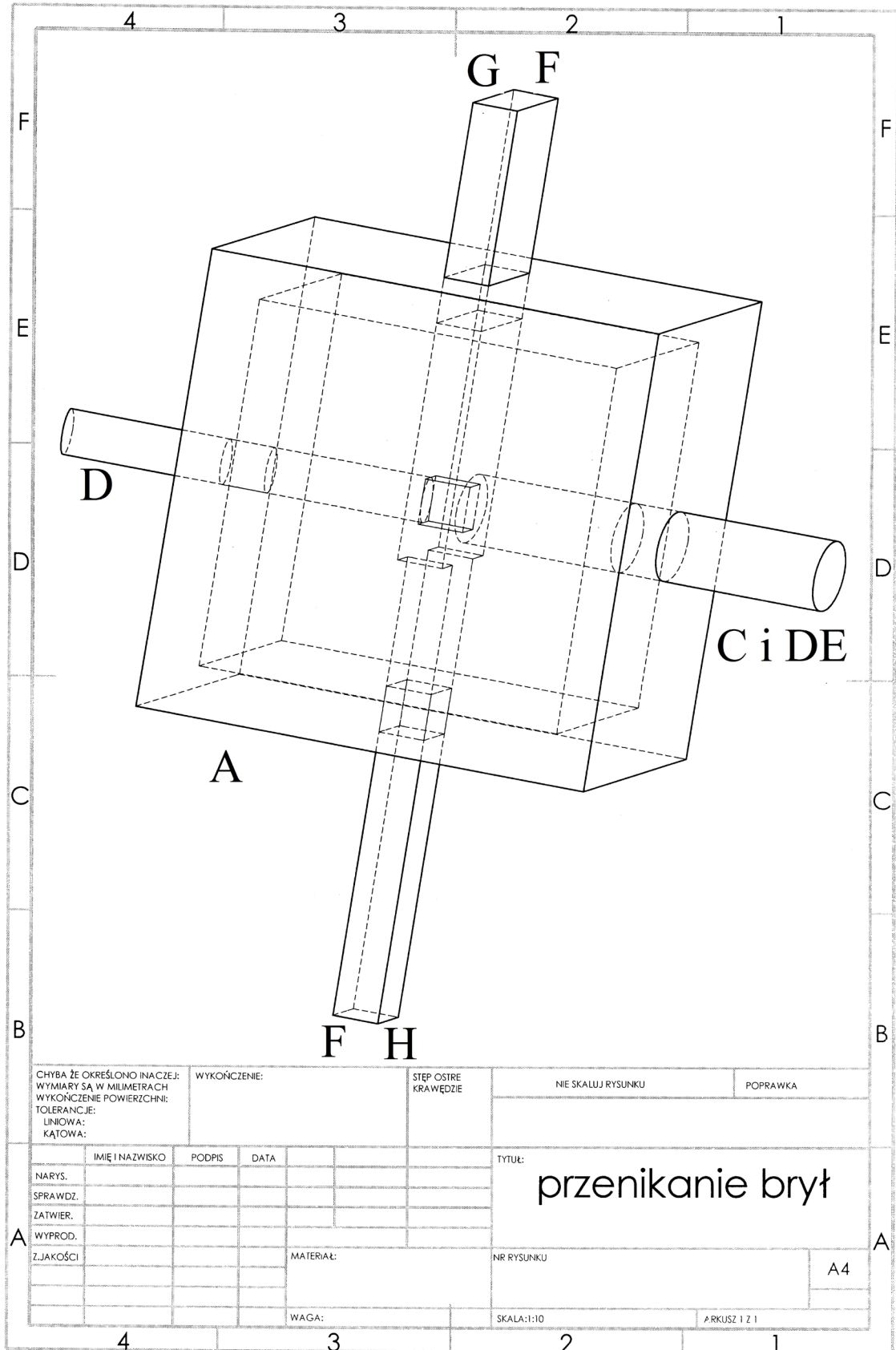
Ważne jest, aby oglądać tworzone złożenie na sposób „rysunku technicznego”, tzn. z liniami niewidocznymi jako liniami przerywanymi.

Tabela 6

Zależności wymiarowe omawianego szkicu

A	B	C	DE	D	E	F	G
$10n$	n	$3n$	$1,5n$	n	$2n$	n	$4n$

gdzie n to numer komputera!



Rys. 90. Rysunek zestawienia przenikających się brył
Fig. 90. Assembly drawing of the bodies

10. KONFIGURACJE – TABELE KONFIGURACJI

Cel główny ćwiczenia: celem ćwiczenia jest nabycie umiejętności budowy obiektu opartego na relacjach wymiarowych pomiędzy poszczególnymi wymiarami.

Tworzenie własnej bazy elementów.**Cel pomocniczy ćwiczenia:** nabycie umiejętności budowy własnej bazy elementów składowych. Szybka modyfikacja i dopasowanie obiektów do wymagań konstrukcyjnych.

Zakres ćwiczenia:

- a) zbudowanie prostego elementu opartego na powiązaniach wymiarowych:
 - budowa obiektu przestrzennego,
 - wyświetlenie odpowiednich wymiarów,
 - przypisanie zależności wymiarowych,
 - przebudowa obiektu,
- b) stworzenie tabeli konfiguracji,
- c) formatowanie tabeli konfiguracji,

Tabela konfiguracji umożliwia budowę wielu konfiguracji części lub złożeń przez wyszczególnienie parametrów w osadzonym arkuszu Microsoft Excel.

Tabela konfiguracji jest zapisywana w dokumencie modelu i nie ma łączy do pierwotnego pliku programu Excel. Zmiany dokonywane w modelu nie znajdują odzwierciedlenia w pierwotnym pliku programu Excel. Można jednak połączyć dokument modelu z plikiem Excel.

Aby utworzyć tabelę konfiguracji, należy zdefiniować nazwy konfiguracji, które chcemy utworzyć, wyszczególnić parametry, którymi chcemy sterować, oraz przypisać wartości dla każdego z parametrów.

Istnieje kilka sposobów utworzenia tabeli konfiguracji:

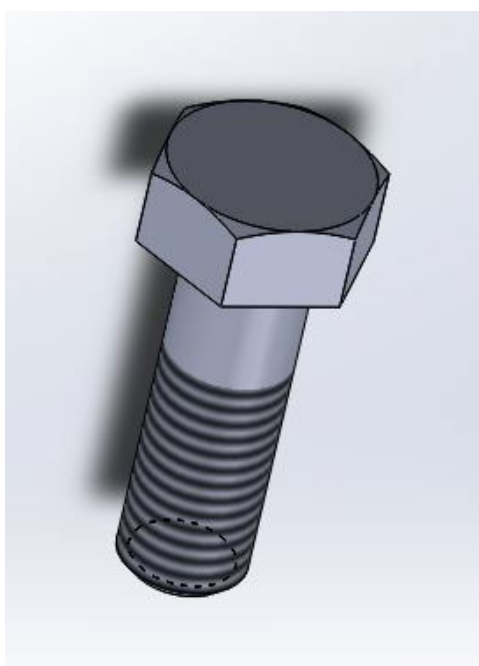
- Wstawić nową, pustą tabelę konfiguracji w modelu i wprowadzić informacje tabeli konfiguracji bezpośrednio w arkuszu. Nowe konfiguracje zostaną automatycznie utworzone w modelu po zakończeniu wprowadzania informacji do tabeli konfiguracji.

- Oprogramowanie SolidWorks może automatycznie utworzyć tabelę konfiguracji. SolidWorks ładuje wszystkie skonfigurowane parametry i ich skojarzone wartości z części lub złożeń.
- Utworzyć arkusz tabeli konfiguracji w postaci odrębnej operacji w programie **Microsoft Excel**. Zapisać arkusz, a następnie wstawić go w dokumencie modelu, aby utworzyć konfigurację.

Możliwe są: wstawienie częściowo wypełnionego arkusza i jego późniejsza edycja w celu dodania kolejnych konfiguracji, sterowania dodatkowymi parametrami lub zaktualizowania wartości.

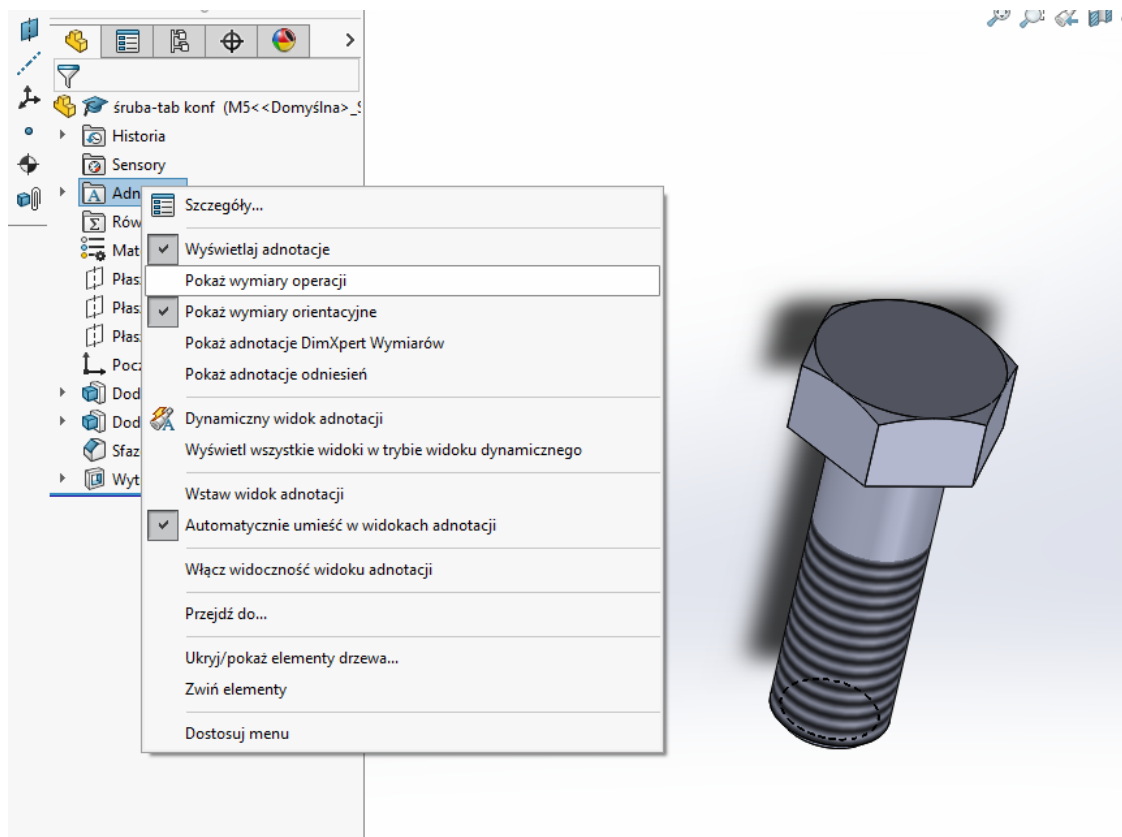
Przebieg ćwiczenia – tworzenie konfiguracji dla prostego elementu znormalizowanego

- tworzenie geometrii przestrzennej: zbudować model dowolnej śruby z łbem sześciokątnym, wymiary przyjąć według ogólnie przyjętych uproszczeń rysunkowych. Przykładową geometrię śruby z łbem sześciokątnym pokazano na rys. 91.



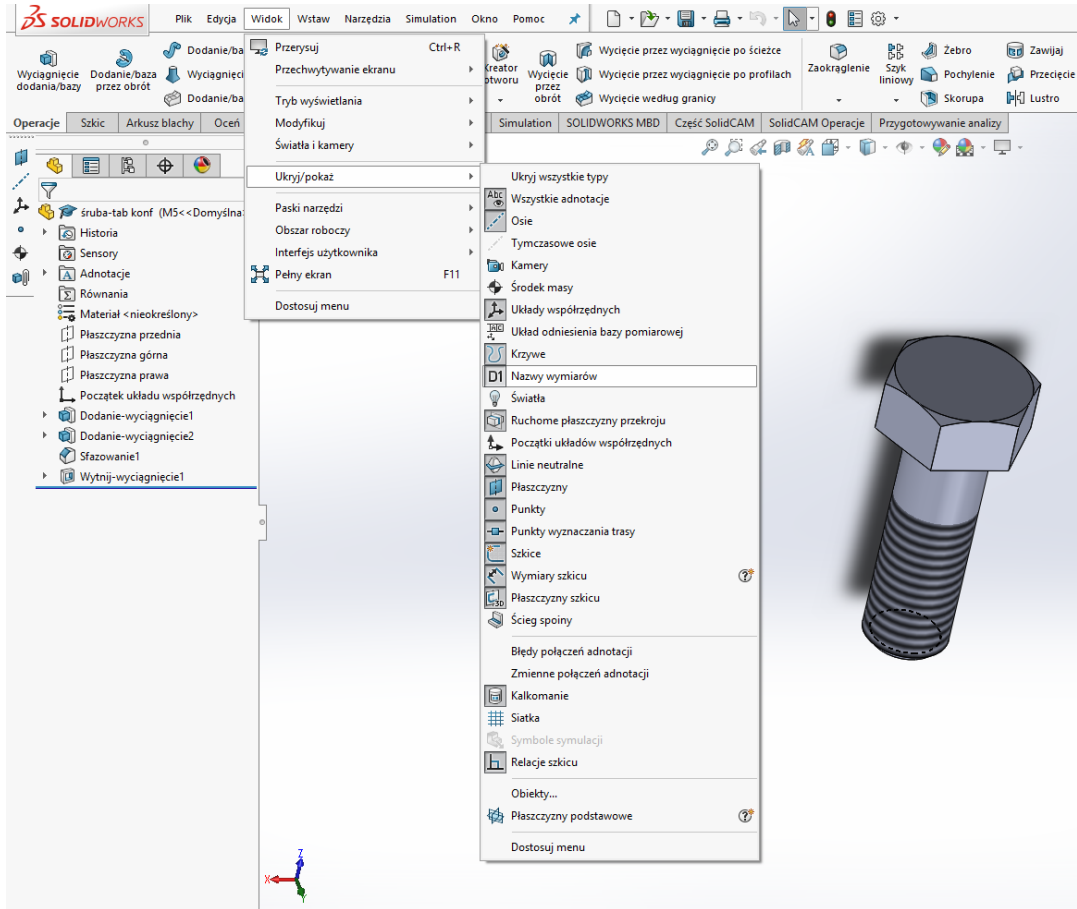
Rys. 91. Model śruby M5 z łbem sześciokątnym
Fig. 91. M5 hexagon bolt model

- włączyć wyświetlanie wymiarów (rys. 92):
Adnotacje/Pokaż wymiary operacji



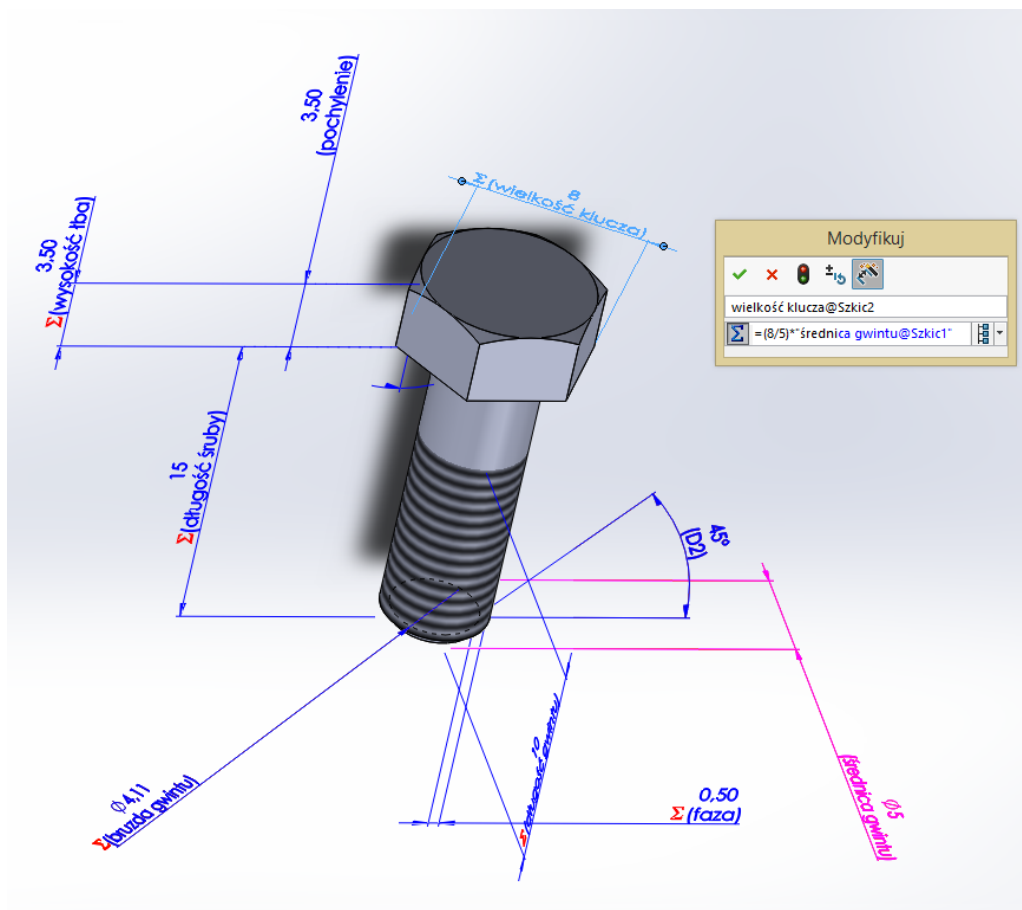
Rys. 92. Sposób włączenia wyświetlania wymiaru
Fig. 92. How to enable the display of the dimension

- włączyć **nazwy wymiarów** (rys. 93):
Widok/Ukryj-Pokaż/Nazwy wymiarów



Rys. 93. Sposób włączenia wyświetlania nazwy wymiaru
Fig. 93. The way to enable the display of the dimension name

W celu szybszej i lepszej identyfikacji konkretnego wymiaru najlepiej przypisać własne nazwy. Musimy następnie określić jeden z wymiarów jako wymiar **podstawowy-główny** (w naszym przypadku będzie to średnica śruby). Pozostałym wymiarom, które będą **wymiarami zależnymi**, przypisujemy funkcję uwzględniającą **wymiar główny**, według której będą modyfikowane (rys. 94).



Rys. 94. Sposób opisu poszczególnych wymiarów w obiekcie
 Fig. 94. The way of describing individual dimensions in the object

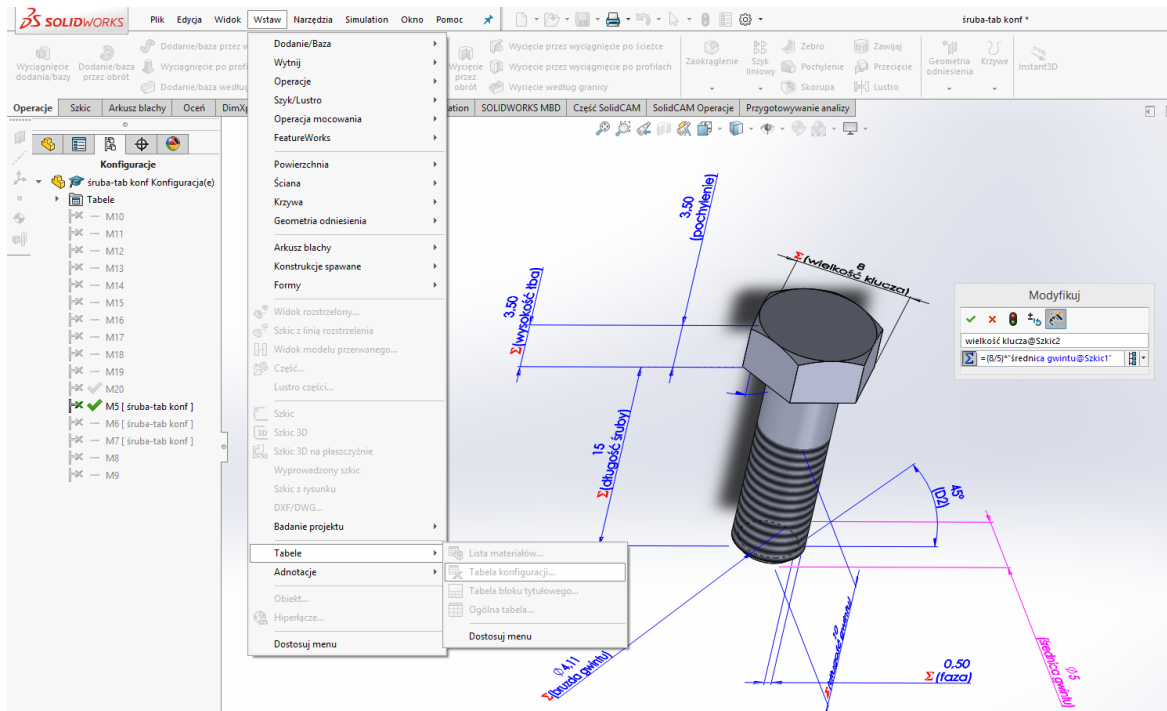
Metody tworzenia konfiguracji:

1. konfiguracje tworzone ręcznie,
2. konfiguracje tworzone przy użyciu tabeli konfiguracji, aby tworzyć i zarządzać konfiguracjami w arkuszu Microsoft Excel. Można wyświetlać tabele konfiguracji w rysunkach,
3. konfiguracje tworzone przy użyciu okna dialogowego **Modyfikuj konfiguracje**, aby tworzyć i modyfikować konfiguracje dla najczęściej konfigurowanych parametrów.

Konfiguracje umożliwiają tworzenie relacji rodzic-potomek w ramach konfiguracji. Domyślnie wszystkie parametry konfiguracji potomka są połączone z konfiguracją rodzica. Jeżeli zmienimy jakiś parametr w konfiguracji rodzica, to zmiana ta automatycznie przenosi się na potomka.

- utworzenie **tabeli konfiguracji** (rys. 95):

Wstaw/Tabele/Tabela konfiguracji



Rys. 95. Sposób tworzenia Tabeli konfiguracji

Fig. 95. How to create a Configuration Table

Tworzenie konfiguracji z użyciem tabeli konfiguracji

Tabela konfiguracji umożliwia budowę wielu konfiguracji części lub złożeń przez wyszczególnienie parametrów w osadzonym arkuszu Microsoft Excel.

Tabela konfiguracji jest zapisywana w dokumencie modelu i nie ma łączy do pierwotnego pliku programu Excel. Zmiany dokonywane w modelu nie znajdują odzwierciedlenia w pierwotnym pliku programu Excel, aczkolwiek można połączyć dokument modelu z plikiem Excel.

Aby utworzyć tabelę konfiguracji, należy zdefiniować nazwy konfiguracji, które chcemy utworzyć, wyszczególnić parametry, którymi chcemy sterować, oraz przypisać wartości dla każdego z parametrów.

Tworzenie TABELI KONFIGURACJI jako odrębnego pliku Excel

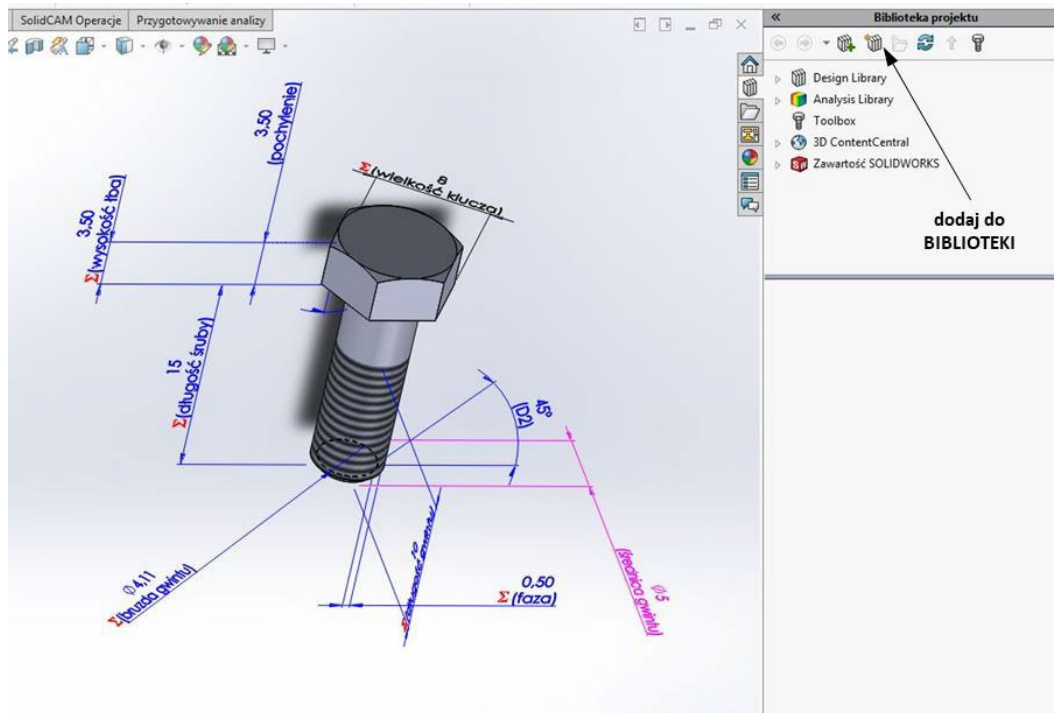
- Możemy tworzyć tabele konfiguracji jako oddzielne pliki Excel, a następnie użyć menedżera właściwości **PropertyManager Tabela konfiguracji**, aby wstawić plik do naszego modelu.
- Przy wstawianiu tabeli konfiguracji w oprogramowaniu SolidWorks utworzonej w programie Excel bardzo ważnym elementem jest prawidłowe **formatowanie** tabeli.

Aby utworzyć tabelę konfiguracji jako oddzielny plik Excel, należy:

1. W pierwszej kolumnie (komórki A2, A3 itd.) wpisać nazwy konfiguracji, które chcemy utworzyć. Pozostawić pustą komórkę A1. Nazwy mogą zawierać cyfry, lecz nie mogą zawierać znaków zwykłej kreski ukośnej (/) ani symbolu @.
2. W pierwszym rzędzie (komórki B1, C1 itd.) należy wpisać parametry, którymi chcemy sterować.
3. Prawidłowo skonfigurować i zapisać utworzoną TABELĘ.
4. Po otwarciu dokumentu w którym chcemy wstawić tabelę konfiguracji, przejść do Wstaw → Tabela konfiguracji.
5. Wprowadzić odpowiednie ustawienia w PropertyManager (tabela konfiguracji), w części ŹRÓDŁO.
6. Ustawić Z PLIKU → PRZEGLĄDAJ i otworzyć plik EXCEL. Można również zaznaczyć pole wyboru Połącz z plikiem, które łączy tabelę z modelem. Połączona tabela konfiguracji odczytuje dane z zewnętrznego pliku Excel. Kiedy tabela konfiguracji jest połączona, jakiegokolwiek zmiany w tabeli dokonane poza SolidWorks są odzwierciedlone w modelu SolidWorks i odwrotnie.

Aktualizacja połączonej tabeli

Opcje aktualizacji można ustawić następująco: **Narzędzia, Opcje, Opcje systemu, Zewnętrzne odniesienia**. Należy ustawić **Aktualizuj nieaktualne połączone tabele konfiguracji zgodnie z** na **Monituj, Model** lub **Plik Excel**. Przygotowany w całości obiekt można dodać do biblioteki programu, co przedstawiono na rys. 96.

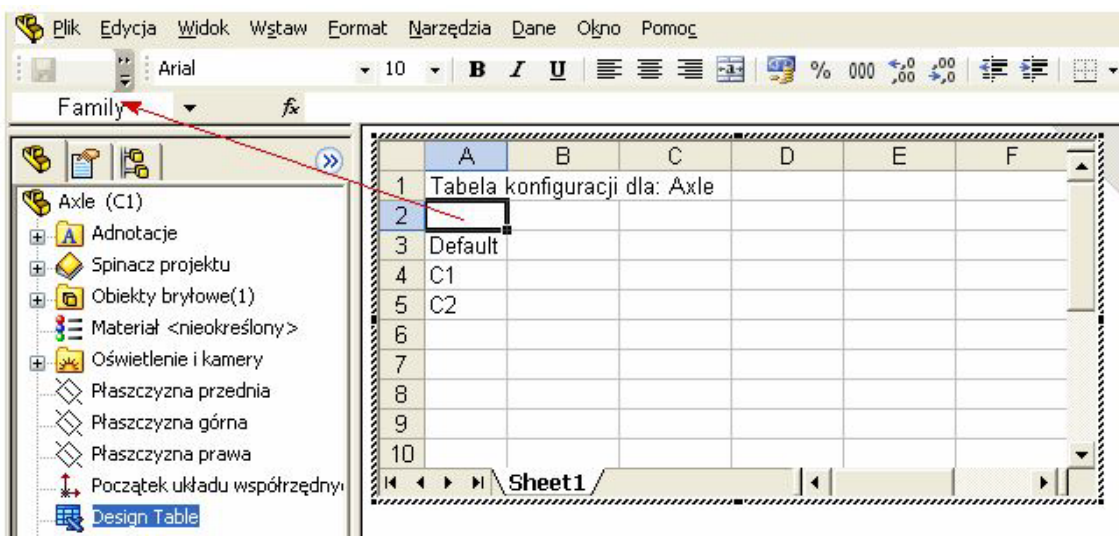


Rys. 96. Sposób wstawienia Konfiguracji do biblioteki

Fig. 96. The way of inserting the Configuration into the library

Formatowanie tabeli konfiguracji

- Automatycznie utworzone tabele konfiguracji (rys. 97).



Rys. 97. Przykład automatycznie utworzonej tabeli konfiguracji
Fig. 97. An example of an automatically created design table

Przez polecenie **PropertyManager Tabela konfiguracji** oprogramowanie SolidWorks automatycznie tworzy plik Excel. Automatycznie utworzone tabele konfiguracji zawierają komórkę **Family**.

Domyślnie jako komórka **Family** jest zarezerwowana komórka **A2**. Komórka determinuje, gdzie zaczynają się dane parametrów i konfiguracji. Komórka **Family** nie zawiera tekstu.

- Ręcznie utworzone tabele konfiguracji

Ręcznie utworzona tabela konfiguracji w Microsoft Excel powstaje przez wpisanie nazw konfiguracji w pierwszej kolumnie (komórki **A3**, **A4** itd.) i parametrów w pierwszym wierszu (komórki **B2**, **C2** itd.). Komórka **A1** musi być **PUSTA**.

Oprogramowanie SolidWorks, przetwarzając tabelę konfiguracji, przetwarza każdą konfigurację w kolumnie z nazwami konfiguracji (od góry do dołu), a następnie przetwarza każdy parametr w wierszu parametru (od lewej do prawej).

11. MODELOWANIE UKŁADÓW MECHANICZNYCH NA PRZYKŁADZIE MECHANIZMU WAHADŁA I TAKTOMETRU

W tym ćwiczeniu studenci przygotowują prosty mechanizm wahadła fizycznego. Wahadło to tworzy taktometr, inaczej zwany metronomem.

Cel główny ćwiczenia: przygotowanie prostego złożenia, którego ruch wywołany jest przyciąganiem ziemskim, zapoznanie się z analizą ruchu oraz wiązaniem odległości.

Cel pomocniczy ćwiczenia: wykorzystanie zarysu paraboli do rysowania sfazowania, wyciąganie walca z pochyloną pobocznicą (ma to symulować kształt odlewu).

Wiadomości z innych dziedzin nauki pomocne przy wykonaniu tego zadania: fizyka – okres drgań wahadła, równowaga trwała, chwiejna i obojętna.

Założenia: zestawienie 3 elementów tworzących taktometr. Baza wahadła może mieć kształt dowolny, gdyż będzie unieruchomiona. Ważne jest, aby połączenie obrotowe wahadła i podstawy miało pasującą, tzn. tę samą, średnicę.

Elementy:

- baza taktometru – nieruchoma podstawa z osią obrotu wahadła; podstawa to wyciągnięty na 10 mm prostokąt o bokach 20 x 10 cm; pionowa ściana to kwadrat o boku 20 cm wyciągnięty na 10 mm, sfazowane boki; w osi symetrii oś obrotu wahadła jako wyciągnięty walec o średnicy 10 mm i długości 35 mm; w dolnej części otwór – wycięty elipsą o średnicach 12 x 60 cm (rys. 98);
- ciężar taktometru to prostopadłościan o bokach 5 x 2 x 3 cm powstały przez wyciągnięcie dowolnego boku na odpowiednią odległość; w jednej ze ścian wycięcie otworu – prostokąta o bokach 20 x 10 mm (rys. 99);
- wahadło to prostopadłościan o bokach 2 x 30 x 1 cm; jeden koniec zakończony promieniem 8 mm; w odległości 10 cm od drugiego końca wyciągnięcia obustronne stożka ściętego (walec z pochyleniem ścian) – symuluje to pochylenie odlewnicze; w tym samym miejscu otwór o średnicy 10 mm (rys. 100).

Materialy – proponuje się: podstawa – dowolny; wahadło – dowolny stop aluminium lub inny lekki materiał, np. włókno węglowe; ciężar – stal węglowa.

Uwaga – przyjęcie tych samych materiałów może spowodować zmianę położenia równowagi mechanizmu, tzn. przejście z równowagi trwałej do równowagi chwiejnej!
Przy okazji można znaleźć położenie równowagi obojętnej (wyważenie mechanizmu).

Zastosowane wiązania:

- podstawa > nieruchoma;
- okrąg – krawędź otworu wskazówki + okrąg – krawędź osi z podstawy > wspólna;
- powierzchnia wewnętrznego otworu ciężaru + powierzchnia zewnętrzna boczna wskazówki > wspólna;
- powierzchnia dolna ciężaru + powierzchnia dolna wskazówki > odległość.

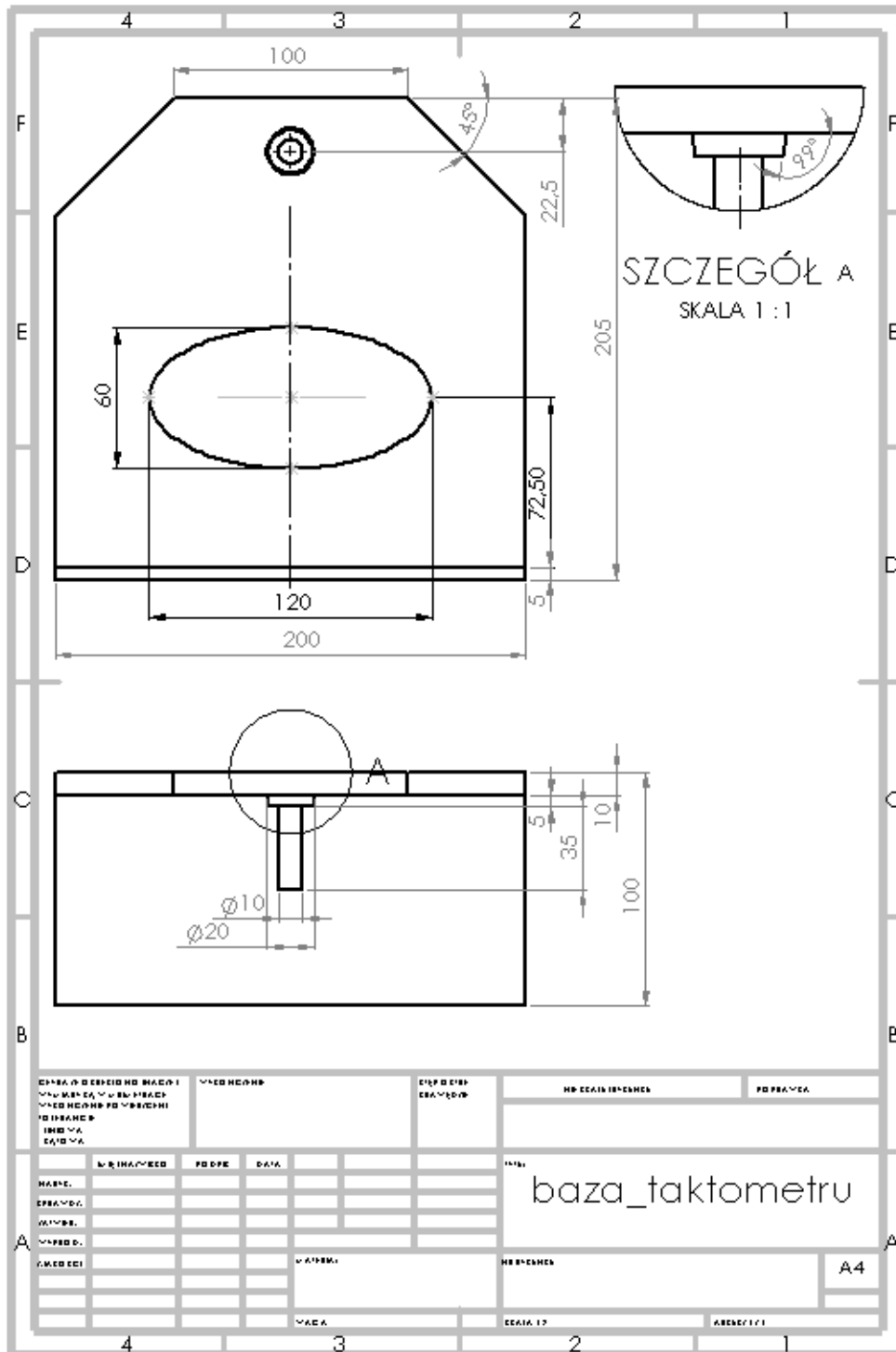
Przebieg symulacji – ustalenie aktywnej grawitacji (kierunek i zwrot zgodny z intuicją i przyjętym układem współrzędnych), włączenie analizy ruchu; wybór wykresu przemieszczenia kąтового wahadła.

Analiza wyników – obliczenie okresu drgań wahadła na podstawie wykresu przemieszczenia kąтового; zmiana położenia ciężaru (wiązanie odległości) i ponowna analiza ruchu; porównanie otrzymanego wyniku (okresu drgań wahadła).

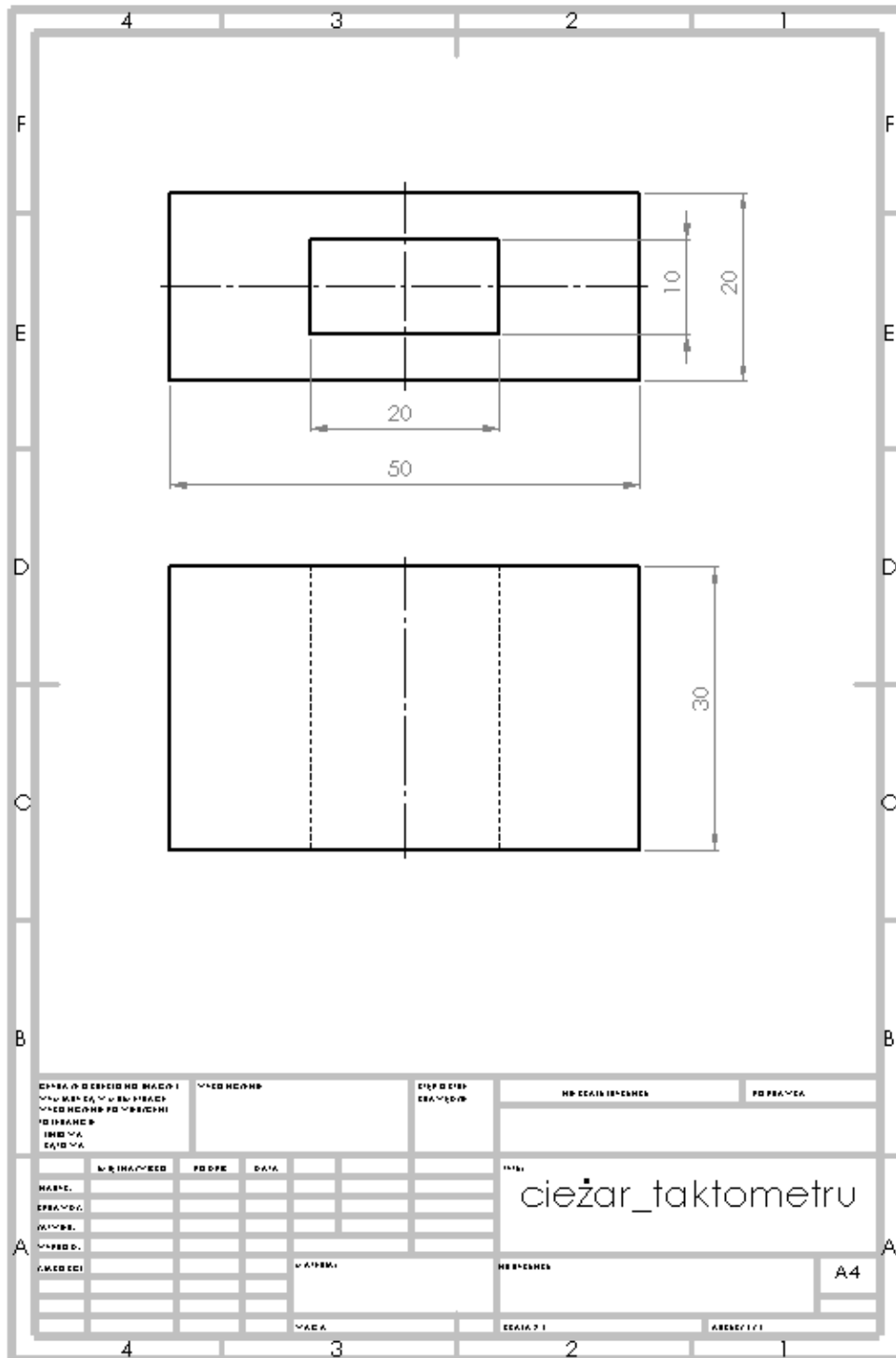
UWAGA! ABY BADAĆ RÓŻNE USTAWIENIA TAKTOMETRU, ZMIANĘ WIĄZANIA ODLEGŁOŚCI NALEŻY WYKONYWAĆ W ZAKŁADCE „MODEL”, A NIE W „BADANIU RUCHU”, tak dla każdego nowego ustawiania, np. 0, 10, 20 mm itd.

Przykładowe zadanie – znalezienie położenia ciężaru tak, aby okres drgań wahadła wynosił 1 s, tzn. częstotliwość wahań była równa 1 Hz.

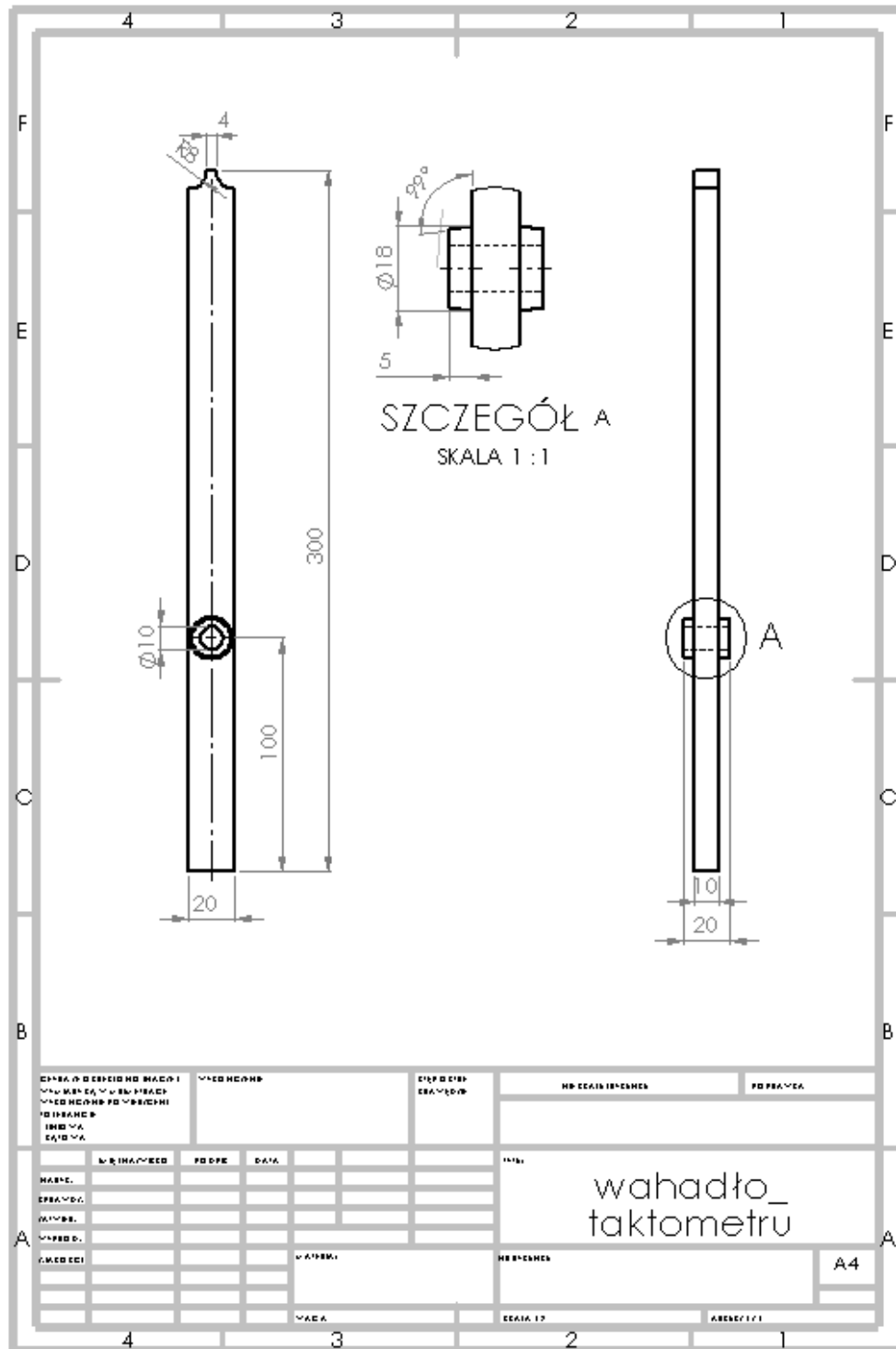
Poniżej przedstawiono rysunki wykonawcze trzech (rys. 98–100) elementów taktometru oraz złożenia (rys. 101). Pokazano również zrzut ekranu przedstawiający symulowany mechanizm wraz z wykresem wyników, tzn. przemieszczenia kąтового (rys. 102).



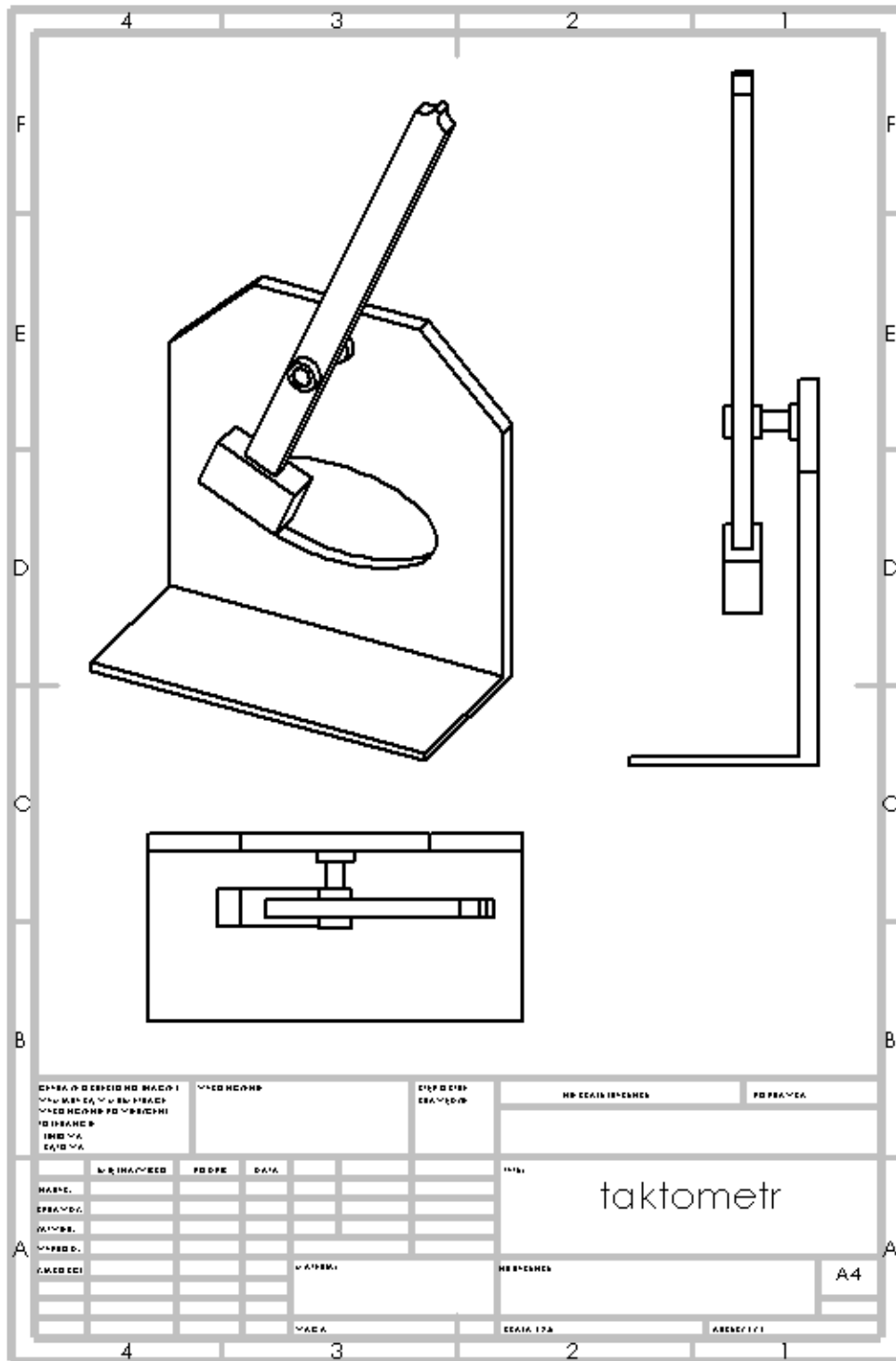
Rys. 98. Rysunek wykonawczy bazy, podstawy taktometru
 Fig. 98. Working drawing of metronome mechanism base, footing



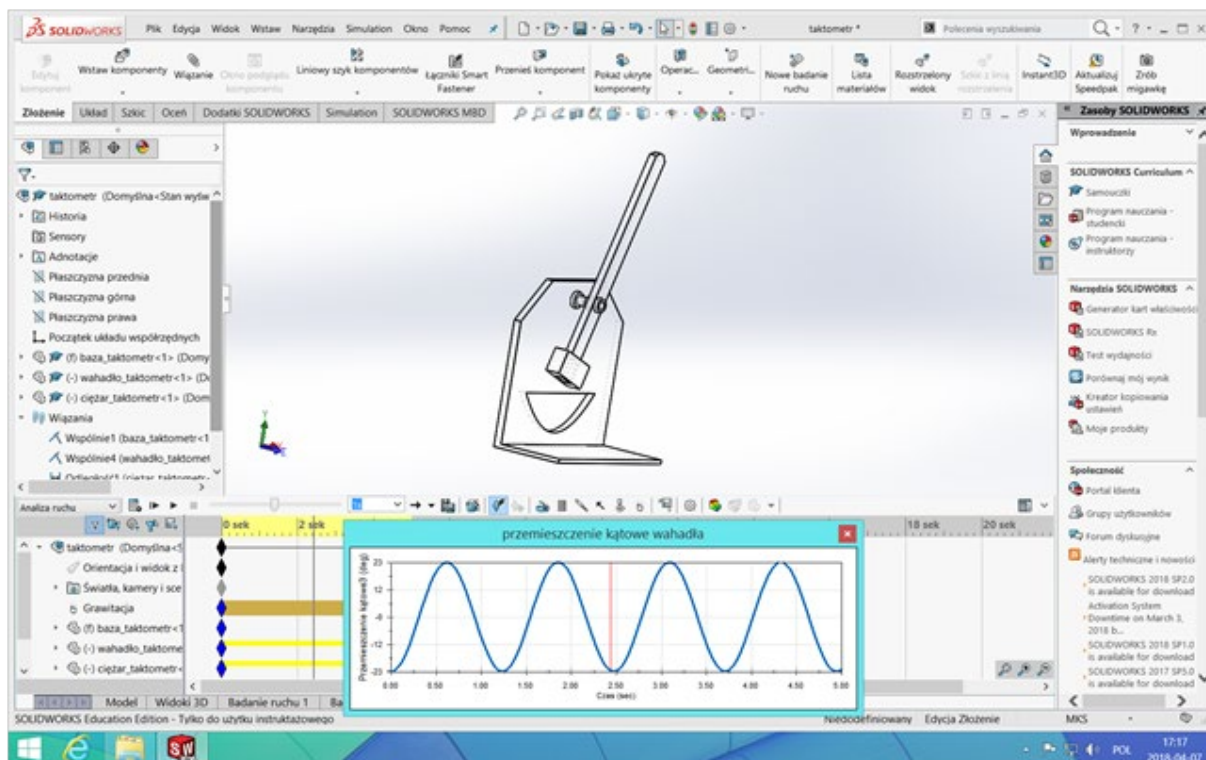
Rys. 99. Rysunek wykonawczy ciężaru taktometru
 Fig. 99. Working drawing of metronome weight



Rys. 100. Rysunek wykonawczy wahadła taktometru
Fig. 100. Working drawing of metronome pendulum



Rys. 101. Złożenie narysowanego mechanizmu
 Fig. 101. Assembly drawing of drawn mechanism



Rys. 102. Ekran programu pokazujący wykonywaną analizę ruchu wraz z wykresem przemieszczenia kątowego – chwila około 2,40 sekundy (czerwony pasek na wykresie oraz szary na ekranie analizy ruchu)

Fig. 102. Printscreen showing performed analysis of metronome motion with a chart of angular displacement – time of 2.40 seconds (red line on the chart and grey on the motion analysis screen)

Przedstawiony wykres pokazuje amplitudę drgań (wahań) równą 23 stopnie, a okres 1,25 s, co oznacza częstotliwość wynoszącą 0,8 Hz (1/1,25 s).

12. MODELOWANIE MECHANIZMU KORBOWO-WODZIKOWEGO

W tym ćwiczeniu studenci przygotowują prosty mechanizm korbowo-wodzikowy, który symuluje działanie silnika lub sprężarki tłokowej.

Cel główny ćwiczenia: przygotowanie prostego złozenia, którego analizę kinematyczną wykonuje się na innych zajęciach, wprowadzenie napędu obrotowego do analizy ruchu.

Cel pomocniczy ćwiczenia: potwierdzenie przez symulację obliczeń teoretycznych prędkości i przyspieszenia tłoka na podstawie równań ruchu z wykorzystaniem ilorazów różnicowych.

Wiadomości z innych dziedzin nauki pomocne przy wykonaniu tego zadania: fizyka – kinematyka ruchu punktu materialnego.

Założenia: zestawienie 4 elementów tworzących model jednocylindrowego silnika spalinowego lub sprężarki tłokowej [1].

Elementy:

- korpus, baza mechanizmu – nieruchoma miska olejowa, skrzynia korbowa z osią obrotu korby oraz ścianami cylindra; bazę stanowi wielobok foremny (sześciobok) z prostokątami ustawionymi symetrycznie względem osi symetrii bazy; całość wyciągnięta na 10 mm; orientacyjne wymiary to: średnica okręgu wpisanego w wielobok 90 mm, rozstaw prostokątów – 45 mm (średnica tłoka), długość 241 mm; w środku wieloboku otwór o średnicy 10 mm (rys. 103);
- korba – elipsa o średnicach 32 i 65 mm wyciągnięta na 10 mm; w odległości 15 mm od jednego wierzchołka elipsy walec o średnicy 10 mm i wysokości 10 mm, następnie w odległości 35 mm otwór o tej samej średnicy (rys. 104);
- korbowód – prostokąt o rozmiarze 148 x 20 mm wyciągnięty na 10 mm; w odległości 11 mm od końca otwór o średnicy 10 mm, w odległości 3,6 x 35 mm = 126 mm walec o tej samej średnicy i wysokości 10 mm; narożniki prostokąta sfazowane (rys. 105); uwaga: na rys. 105 pokazano jedynie zakończenie elementu, wymiary długościowe należy ustalić na podstawie opisu elementu!;
- tłok – prostokąt o bokach 45 x 60 mm wyciągnięty na odległość 10 mm; w środku symetrii walec o średnicy 10 mm i wysokości 20 mm (rys. 106).

Materialy – baza i tŁok to dowolny odlewniczy stop aluminium; korba oraz korbowÓd – Źeliwo.

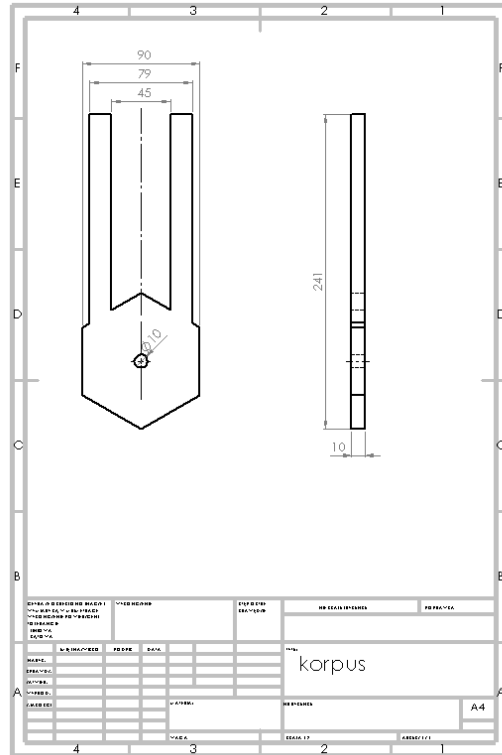
Wykorzystane wiĄzania – podstawa > nieruchoma; okrĄg-krawĘdŹ otworu bazy + okrĄg-krawĘdŹ wyciĄgniĘcia z korby > wspÓlna; podobnie otwÓr korby i wyciĄgniecie korbowodu; podobnie otwÓr tŁoka i wyciĄgniecie korbowodu; boczna powierzchnia tŁoka + boczna, „wewnĘtrzna” powierzchnia prostokĄta bazy > wspÓlna.

Przebieg symulacji – ustalenie napĘdu obrotowego korby (kierunek i zwrot) o prĘdkoŹci obrotowej 5500 obr/min, wŁĄczenie analizy ruchu; wybÓr wykresu prĘdkoŹci i przyspieszenia liniowego w kierunku ruchu (x lub y) tŁoka.

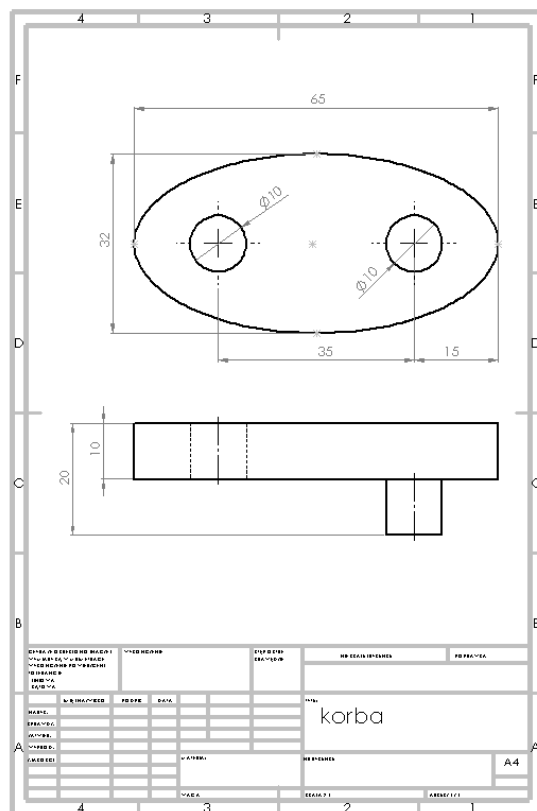
Analiza wyniku – uzyskanie 2 przebiegów zmian prĘdkoŹci i przyspieszenia liniowego tŁoka na jednym wspÓlnym wykresie (dwie osie „y”).

KoŃcowy wynik stanowi potwierdzenie uzyskania tych samych prĘdkoŹci i liniowego przyspieszenia tŁoka co wartoŹci otrzymane w arkuszu kalkulacyjnym podczas rozwaŹaŃ teoretycznych, tzn. $v_{maks} \sim 21$ m/s, $a_{maks} \sim 14\,800$ m/s².

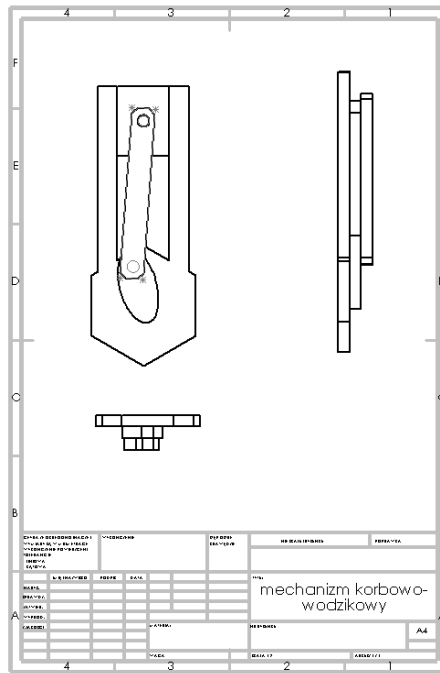
PoniŹej przedstawiono rysunki wykonawcze 4 elementów taktometru oraz zestawieniowy mechanizmu (rys. 107). Pokazano rÓwnieŹ zrzut ekranu przedstawiajĄcy symulowany mechanizm wraz z wykresem wyników, tzn. prĘdkoŹci i przyspieszenia liniowego tŁoka (rys. 108).



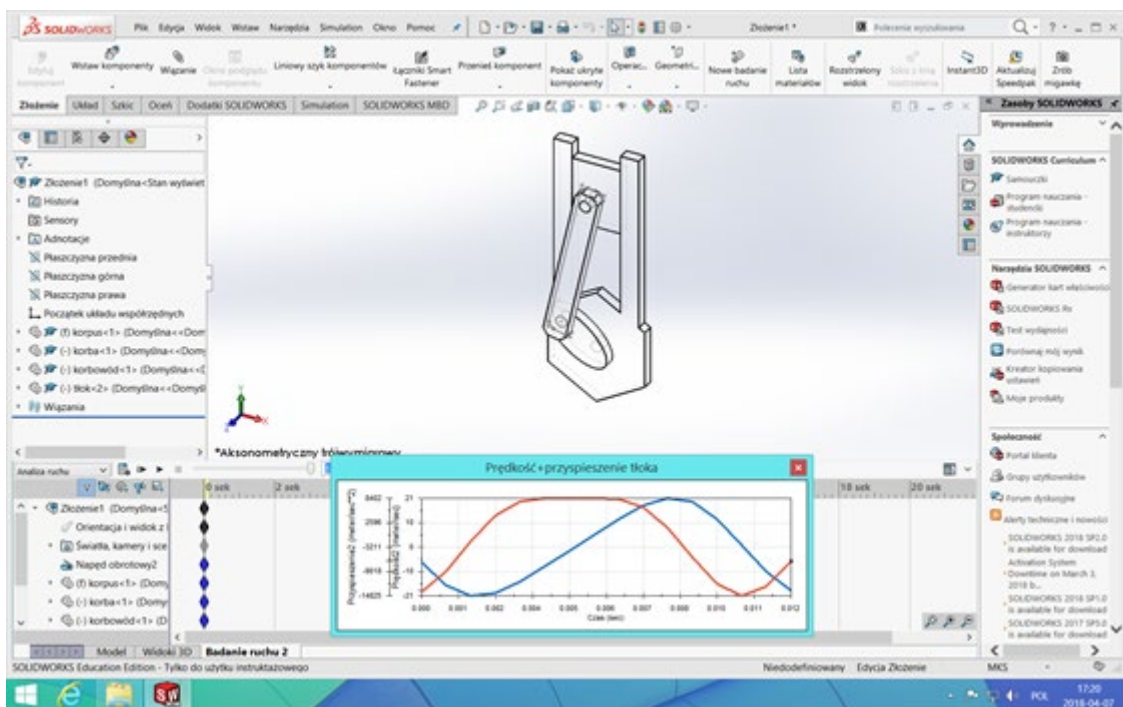
Rys. 103. Rysunek wykonawczy korpusu mechanizmu
 Fig. 103. Working drawing of mechanism frame



Rys. 104. Rysunek wykonawczy korby mechanizmu
 Fig. 104. Working drawing of mechanism crank



Rys. 107. Rysunek zestawieniowy mechanizmu korbowo-wodzikowego
Fig. 107. Assembly drawing of slider-crank mechanism



Rys. 108. Ekran programu pokazujący wykonaną analizę ruchu wraz z wykresem prędkości i przyspieszenia liniowego tłoka
Fig. 108. Printscreen showing carried out analysis of mechanism motion with charts presenting linear velocity and acceleration of piston

Na pokazanym wykresie niebieska krzywa przedstawia prędkość, a czerwona przyspieszenie tłoka. Bezwzględne wartości maksymalne wynoszą tyle co obliczone.

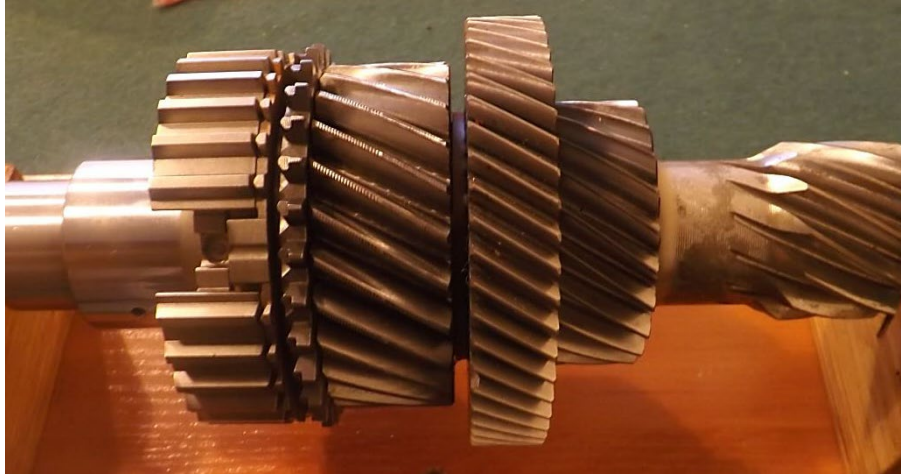
13. ZAPIS CECH KONSTRUKCYJNYCH KOŁA ZĘBATEGO – ZĘBNIK

Cel główny ćwiczenia: celem ćwiczenia jest zbudowanie elementu uzębionego. Nabycie umiejętności prawidłowego doboru wymiarów na podstawie obowiązujących norm oraz ograniczeń w doborze cech konstrukcyjnych wynikających z normalizacji. Nabycie umiejętności poprawnego zapisu cech konstrukcyjnych wałków i wałków uzębionych. **Cel pomocniczy ćwiczenia:** doskonalenie umiejętności posługiwania się normami przy budowie obiektów o znormalizowanych (narzuconych przez określone kryteria) wymiarach. Przygotowanie dokumentacji wykonawczej budowanego obiektu.

Zakres ćwiczenia:

- a) zapoznanie się z obowiązującymi normami:
 - uproszczenia rysunkowe. Koła zębate i łańcuchowe,
 - koła zębate,
 - uproszczenia rysunkowe. Połączenia wielowypustowe,
 - uproszczenia rysunkowe. Łożyska,
 - wymiarowanie. Zasady tolerowania kształtu i położenia,
- b) wyliczenie podstawowych zależności wymiarowych zębника,
- c) poprawny dobór średnic wałka uzębionego na podstawie obowiązujących norm,
- d) zbudowanie modelu zębника w programie SolidWorks na podstawie przeprowadzonych obliczeń,
- e) sporządzenie dokumentacji wykonawczej przy wykorzystaniu zbudowanego modelu 3D.

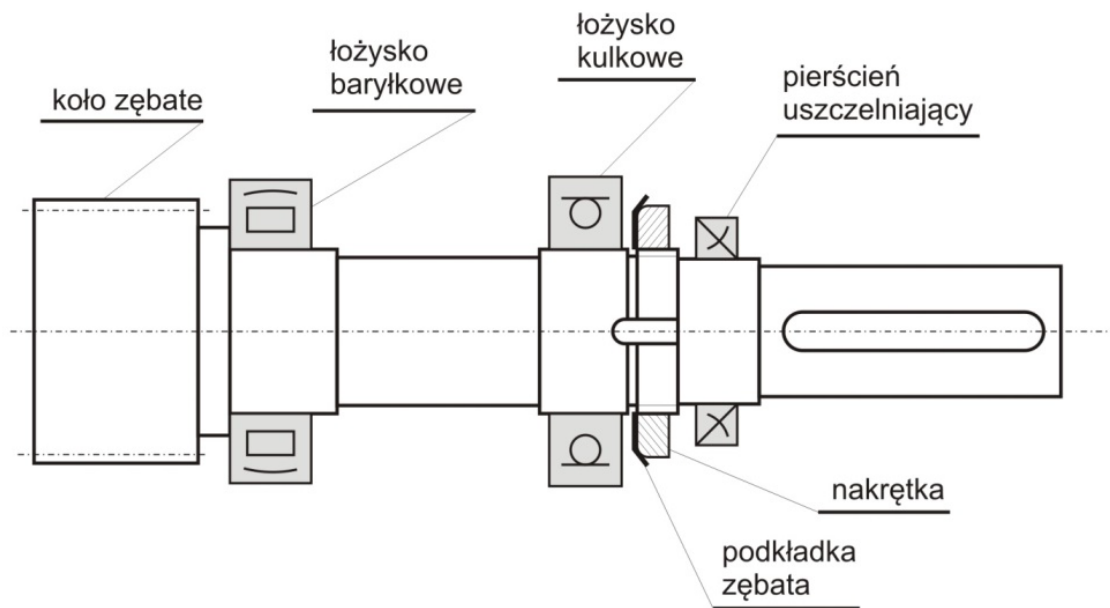
Wał uzębiony (zębник) – jest to część maszyny, najczęściej w kształcie walca, obracająca się wokół własnej osi wraz z zamocowanymi na niej elementami i służąca do przenoszenia momentu siły. Na wale znajduje się osadzona lub stała część uzębiona. Przykładowy zębник przedstawiono na rys. 109.



Rys. 109. Przykładowy model zębniaka
Fig. 109. An example of a pinion model

Przebieg ćwiczenia – budowa modelu:

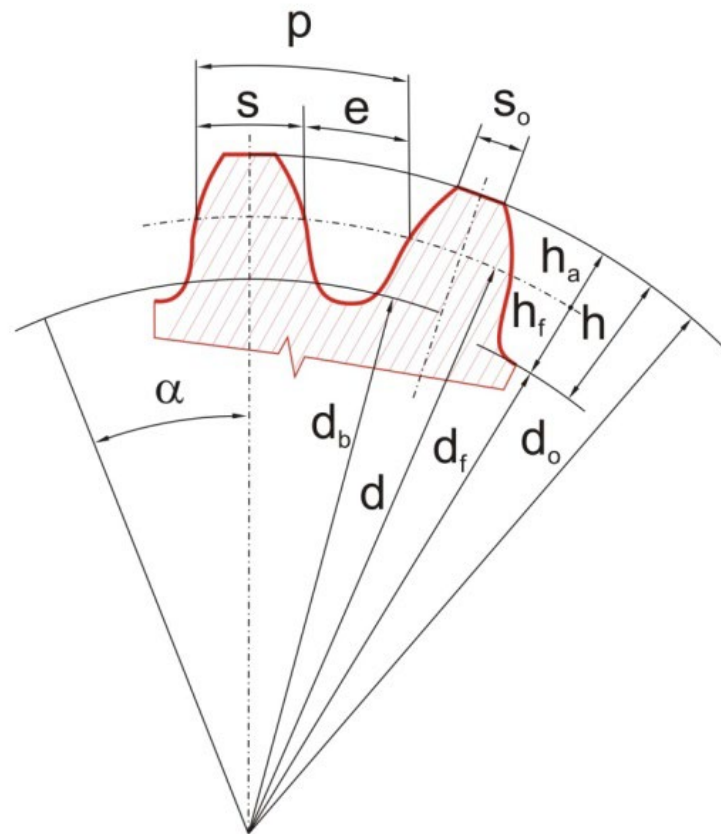
Obiekt, który będzie omawiany w poniższym zadaniu, przedstawiono na rys. 110.



Rys. 110. Przykładowy model wału uzębionego
Fig. 110. An example of a toothed shaft model

a) podstawowe wyliczenia zębniaka

Podstawowe oznaczenia brane pod uwagę przy obliczeniach pokazano na rys. 111.



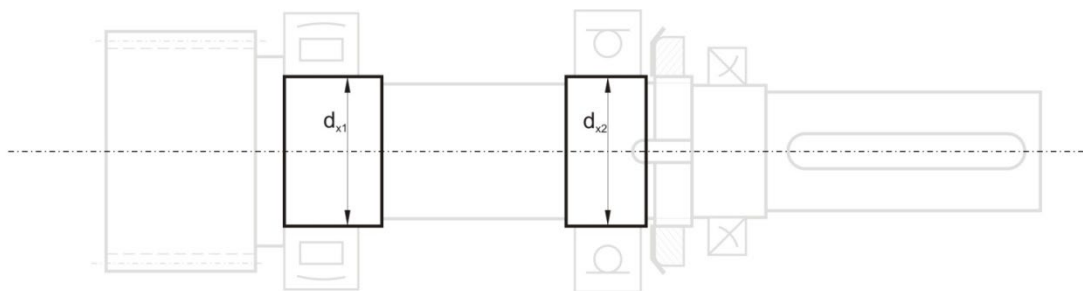
d – średnica podziałowa
 d_b – koło wewnętrzne, koło podstaw zębów
 d_f – koło wierzchołkowe

Rys. 111. Podstawowe oznaczenia zarysu zęba i zębnika
 Fig. 111. Basic designations of tooth profile and pinion

$$\begin{aligned}
 m_e &= \frac{m_n}{\cos\beta} \\
 d &= \frac{m_e}{1} \cdot z = m_e \cdot z \\
 d_a &= d + 2m_n \\
 d_w &= d - 2,5m_n
 \end{aligned}$$

m_e – moduł czołowy
 m_{en} – moduł normalny
 $\cos\beta$ – kąt pochylenia linii zęba

- b) dobór kolejnych zależności wymiarowych wału uzębionego
- obliczenia związane z doбором średnic łożyskowych (rys. 112)

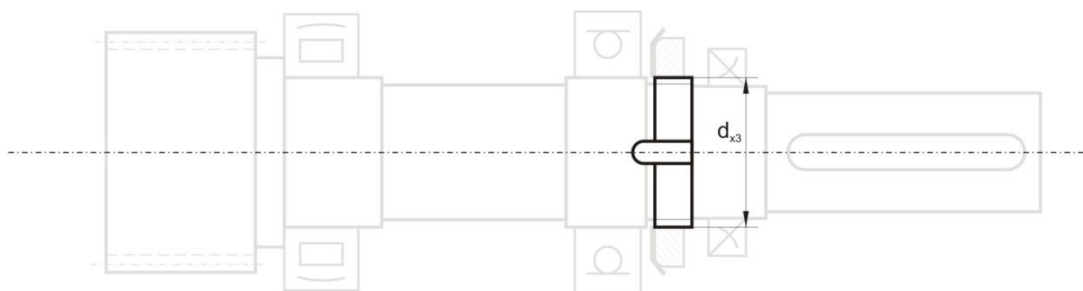


Rys. 112. Wał uzębiony – dobór średnic łożyskowych
 Fig. 112. Toothed shaft – selection of bearing diameters

d_{x1} – średnica dobierana na podstawie normy łożysk baryłkowych, np. **PN-M-86271:1992**

d_{x2} – średnica dobierana na podstawie normy łożysk kulkowych, np. **PN-M-86100:1985**

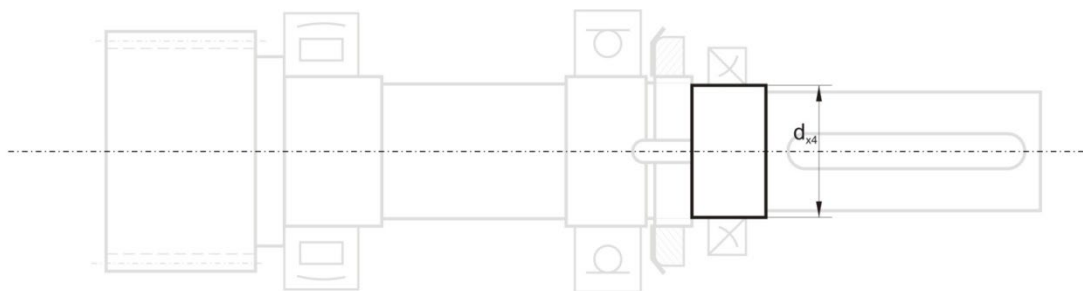
- obliczenia związane z doбором średnic pod nakrętkę łożyskową i podkładkę zębatą (rys. 113)



Rys. 113. Wał uzębiony – dobór średnic pod nakrętkę łożyskową i podkładkę zębatą
 Fig. 113. Toothed shaft – selection of diameters for the bearing nut and toothed washer

d_{x3} – średnica dobierana na podstawie normy nakrętek łożyskowych, np. **PN-M-82471:1985**,
 oraz podkładek zębatych, np. **PN-M-86482:1982**

- obliczenia związane z doбором średnic pod pierścień uszczelniający (rys. 114)

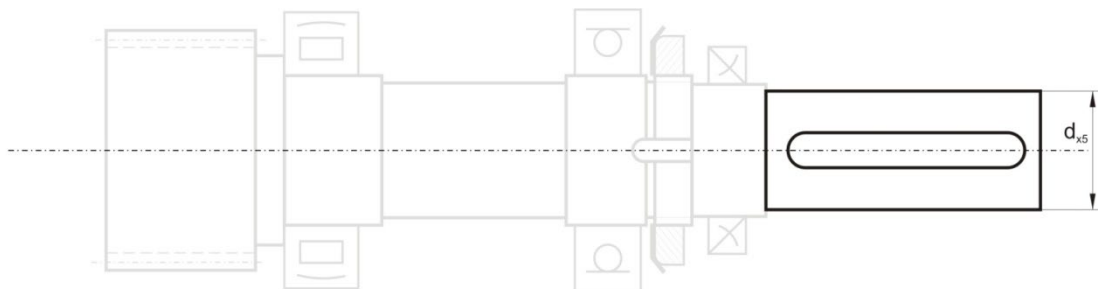


Rys. 114. Wał zębiony – dobór wymiarów pod pierścień uszczelniający

Fig. 114. Toothed shaft – selection of dimensions for the sealing ring

d_{x4} – średnica dobierana na podstawie normy pierścieni gumowych uszczelniających z metalową wkładką usztywniającą, np. **PN-M-86964:1972**, **PN-M-73067:1988**

- obliczenia związane z doбором średnic pod czop końcowy (rys. 115)

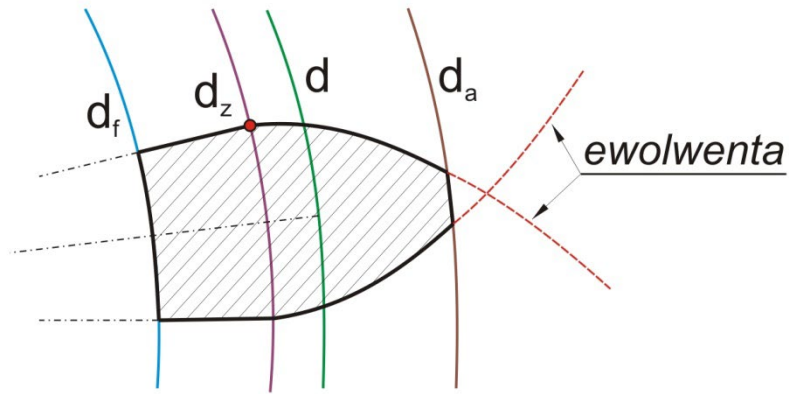


Rys. 115. Wał zębiony – dobór wymiarów pod czop końcowy

Fig. 115. Toothed shaft – selection of dimensions for the end pin

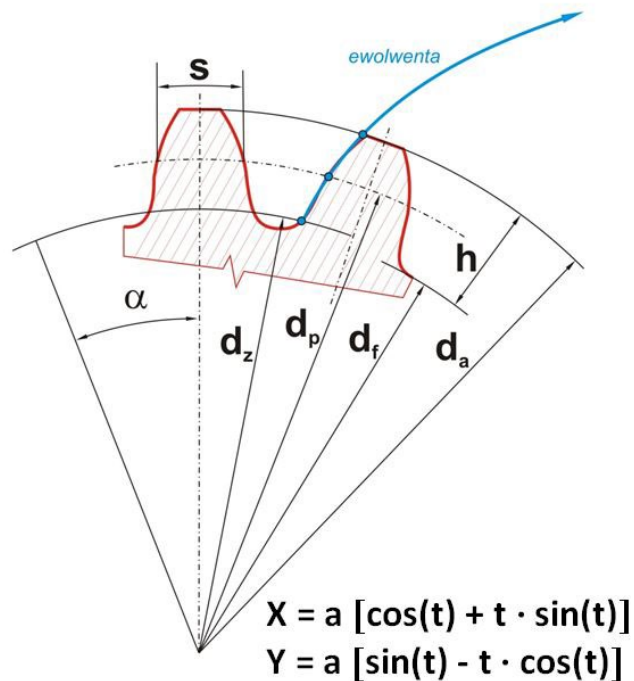
d_{x5} – wymiary dobierane na podstawie normy walcowe czopu końcowego, np. **PN-M-85000:1998**, oraz wpusty pryzmatyczne, np. **PN-M-85005:1970**

- budowa zasadniczej części zębika – zębik o zarysie ewolwentowym. Podstawowe oznaczenia przedstawiono na rys. 116. Na rys. 117 pokazano geometrię zęba o zarysie ewolwentowym oraz przykładowe równania opisujące ewolwentę



Rys. 116. Zarys ewolwenty
Fig. 116. Involute outline

- d** – średnica podziałowa, średnica okręgu, na którym szerokość wrębu jest równa grubości zęba
- d_a** – średnica wierzchołkowa, średnica okręgu przechodzącego przez wierzchołki zębów
- d_f** – średnica stóp, średnica okręgu przechodzącego przez dna wrębów
- d_z** – średnica koła zasadniczego, czyli wyobraźalnego koła, z którego rozwijane są zarysy ewolwentowe boków zębów



Rys. 117. Ząb o zarysie ewolwentowym wraz z przykładowymi równaniami opisującymi ewolwentę o promieniu **a** i środku w początku układu współrzędnych

Fig. 117. An involute tooth with exemplary equations describing an involute with radius **a** and center at the origin of the coordinate system

Ewolwenta rozwijająca krzywej k – krzywa wykreślona przez punkt leżący na prostej toczącej się po krzywej k . Krzywa k jest dla swojej ewolwenty ewolutą.

Wynika stąd, że normalna wystawiona w dowolnym punkcie A ewolwenty jest zawsze styczna do ewoluty, przy czym punkt styczności jest środkiem krzywizny ewolwenty w punkcie A .

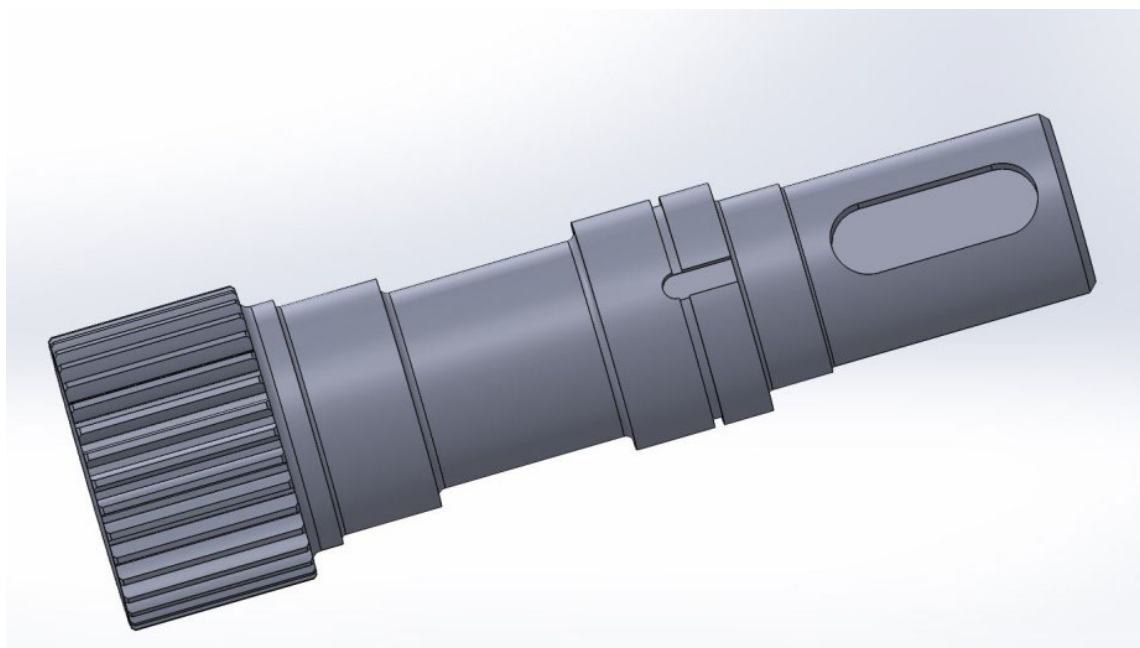
ZARYS EWOLWENTOWY

Zalety:

- Jest zarysem sprzężonym. Zachowuje tę cechę także przy zmianie odległości osi.
- Jest łatwy do wykonania. Uniwersalność narzędzi obróbkowych do wielu kół. Możliwość uzyskania dużych dokładności i małej chropowatości powierzchni styku.
- Siła międzyzębna zachowuje stały kierunek w czasie współpracy zębów.
- Uniwersalność kół. Praca kół o różnych liczbach zębów i tych samych cechach geometrycznych.

Wady:

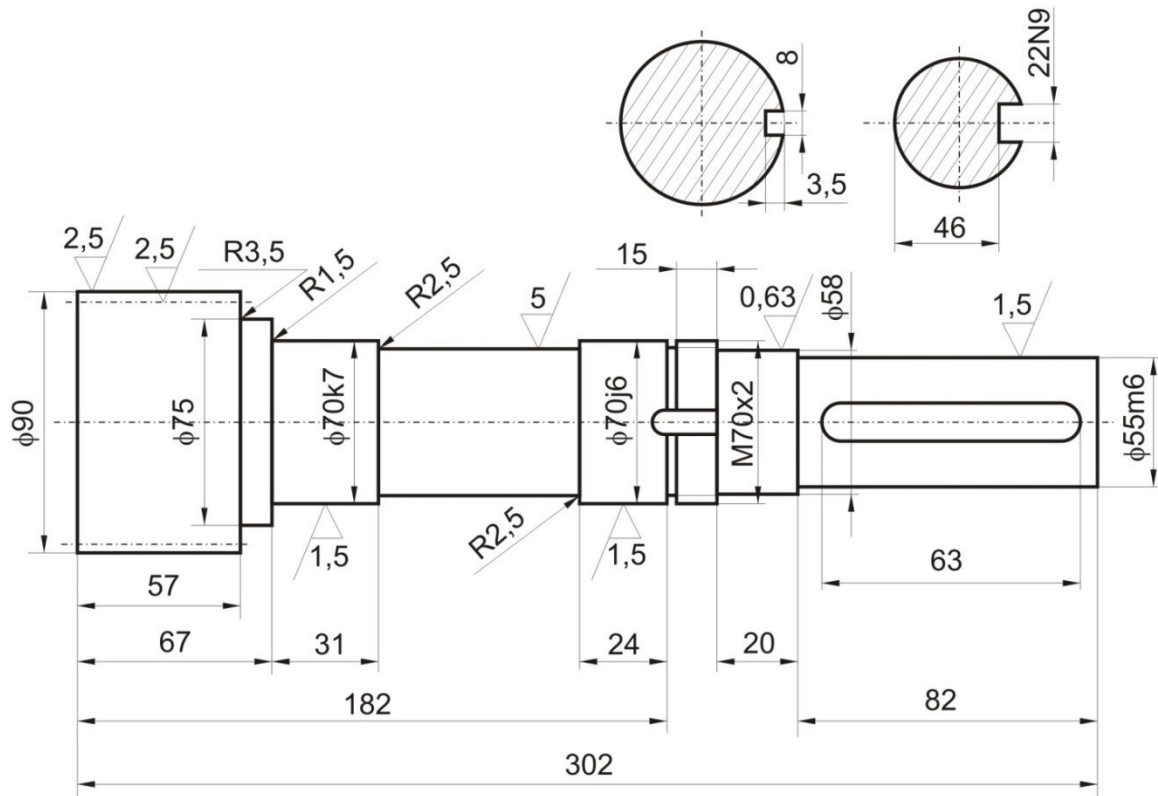
- Mała powierzchnia styku (stykają się dwie powierzchnie wypukłe). Duże naciski są przyczyną zmniejszenia trwałości.
- Duże prędkości poślizgów przy zazębianiu i wyzębianiu się kół. Zwiększone zużycie głów i podstaw zębów.
- Budowa modelu przestrzennego wału uzębionego (rys. 118).



Rys. 118. Wał uzębiony – model geometryczny

Fig. 118. Toothed shaft – geometric model

- Przygotowanie dokumentacji wykonawczej wału uzębionego (rys. 119)



Rys. 119. Wał uzębiony – dokumentacja wykonawcza 2D
 Fig. 119. Toothed shaft – executive documentation 2D

14. MODELOWANIE POŁĄCZENIA WCISKOWEGO TARCZY NA WALE

W tym ćwiczeniu narysowane zostaną 2 elementy współosiowe: wał oraz grubościenna tarcza nasadzona na wał.

Cel główny ćwiczenia: sprawdzenie połączenia wciskowego tarczy na wale przy zadanym wcisku średnim.

Przykładowe pasowanie wciskowe to pasowanie H7/p6. Przyjmując, że wymiar nominalny pasowanych średnic wynosi 200 mm, można znaleźć odchyłki otworu i wałka. Wynoszą one odpowiednio (H7) $ES = 0,046$ i $EI = 0$ mm oraz (p6) $es = 0,079$ i $ei = 0,050$ mm.

Wynika z tego, że wcisk maksymalny wynosi 0,079, a minimalny 0,004 mm. Średni wcisk to zatem 0,0415 mm.

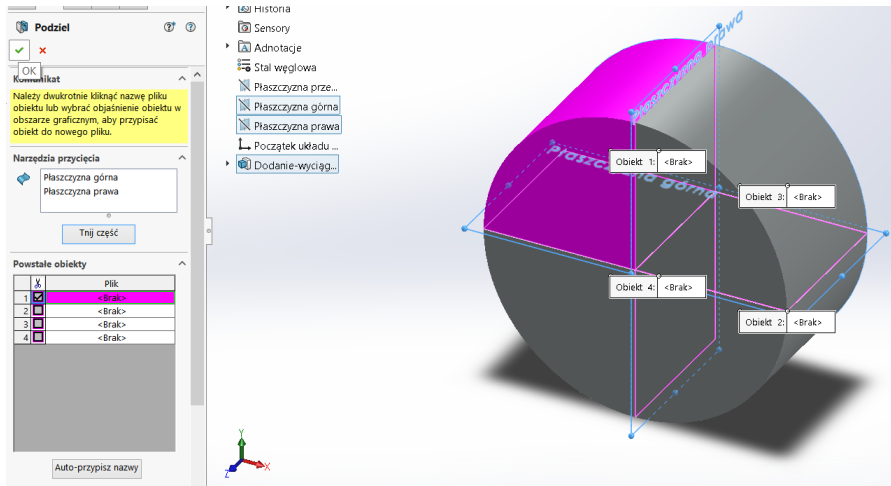
Cel pomocniczy ćwiczenia: zapoznanie się z podziałem części narzędziem „Podziel”; wykorzystanie kontaktu elementów typu „połączenie skurczowe”; zapoznanie się z naprężeniem montażowym; wykorzystanie umocowania typu „symetria”.

Wiadomości z innych dziedzin nauki pomocne przy wykonaniu tego zadania: podstawy konstrukcji maszyn, dział tolerancje i pasowania.

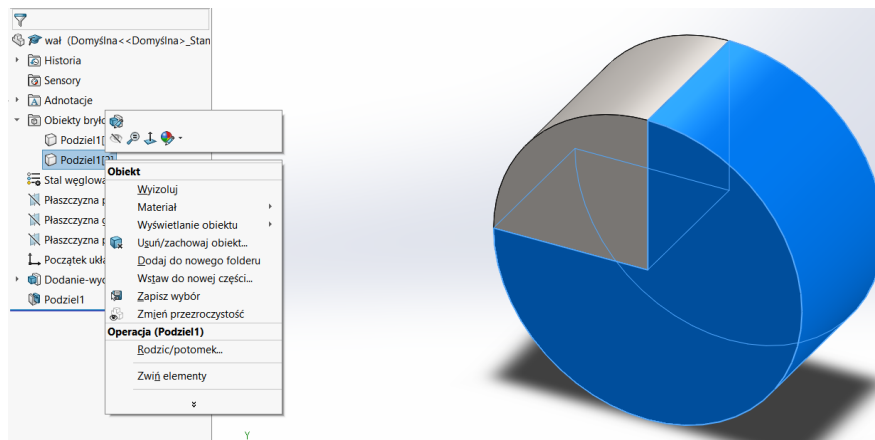
Opis zagadnienia – rysowane są 2 oddzielne części, potem następuje ich złożenie oraz analiza statyczna. Części połączone są na wcisk o wartości 0,04 mm. Dla uproszczenia można przyjąć, że otwór ma promień 100 mm, a wałek 100,02 mm.

Modele części:

- Wał – walec o średnicy 200,04 mm (promień 100,02 mm) i wysokości 100 mm; materiał stal węglowa. Element podzielić na 4 części, stosując „Wstaw/Operacje/Podziel”, wykorzystać 2 podstawowe płaszczyzny (rys. 120). Następnie wybrać 1 ćwiartkę, np. górną lewą, a pozostałe obiekty usunąć przez wybór „Usuń/Zachowaj obiekty”; Uwaga: można również zamiast pełnego wału narysować rurę grubościenną. Średnicę wewnętrzną przyjąć wariantowo jako 25%, 50% i 75% średnicy zewnętrznej. W wynikach sprawdzić wpływ średnicy otworu na rozkład naprężeń!



Miejsce definiowania operacji

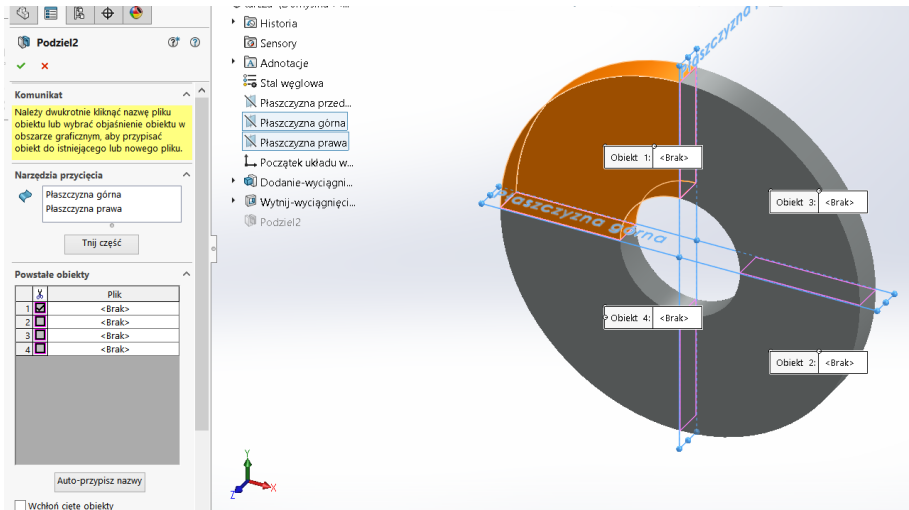
Widok przed usunięciem $\frac{3}{4}$ walca

Rys. 120. Operacja dzielenia wału na 4 części
 Fig. 120. Operation of shaft intersection into 4 parts

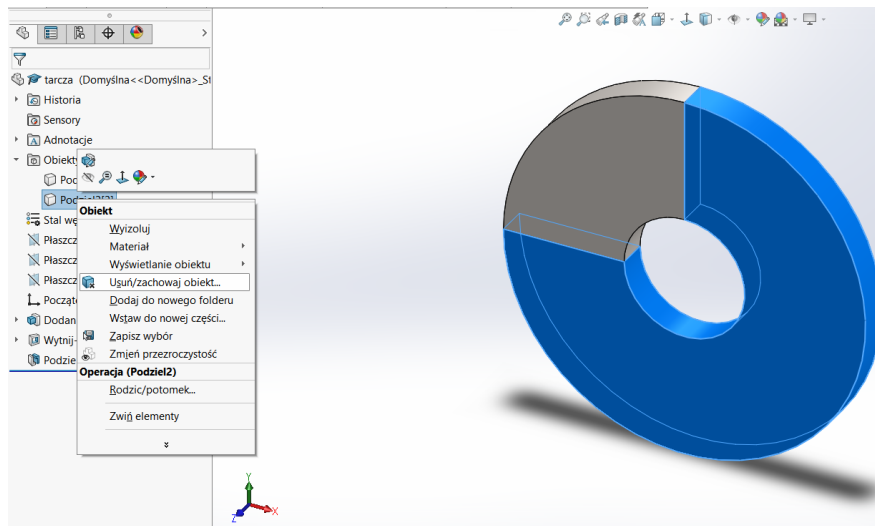
- Tarcza – walec o średnicy zewnętrznej 600 mm, wysokości 50 mm, z otworem o średnicy 200 mm (promień 100 mm); materiał stal węglowa. Element podzielić na 4 części, stosując „Narzędzia/Operacje/Podziel”, wykorzystać 2 podstawowe płaszczyzny (rys. 121). Następnie wybrać 1 ćwiartkę, np. dolną lewą, a pozostałe obiekty usunąć przez wybór „Usuń/Zachowaj obiekty”.

Uwaga! Można połączyć dzielenie elementu z usunięciem w jednej operacji!

Uwaga! Można też zdefiniować inny materiał lub różne materiały dla obu części.



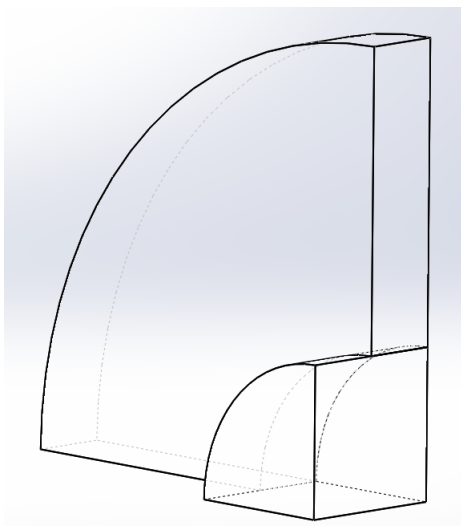
Miejsce definiowania operacji

Widok przed usunięciem $\frac{3}{4}$ tarczy

Rys. 121. Operacja dzielenia tarczy na 4 części
 Fig. 121. Operation of disk intersection into 4 parts

Złożenie

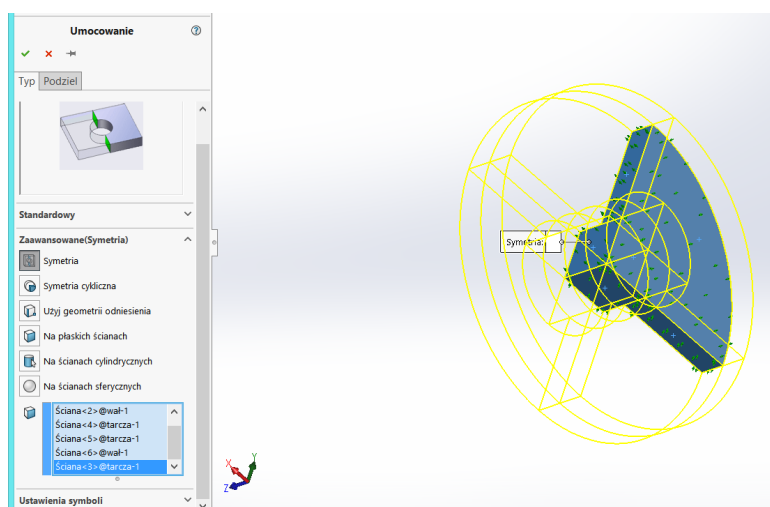
W nowym pliku następuje złożenie 2 części (rys. 122). Wystarczy kliknąć wstawianie (zielony przycisk) i przy braku ruchu myszą części wstawiane są koncentrycznie z wyrównaniem jednej powierzchni – nie trzeba wtedy ustawiać wiązań. Dotyczy to przypadku, gdy części rysowane były z ich środkami symetrii w środku układu współrzędnych! W innym przypadku należy ustawić je ręcznie – typowo jak w złożeniach.



Rys. 122. Złożone elementy
Fig. 122. Assembled parts

Analiza statyczna

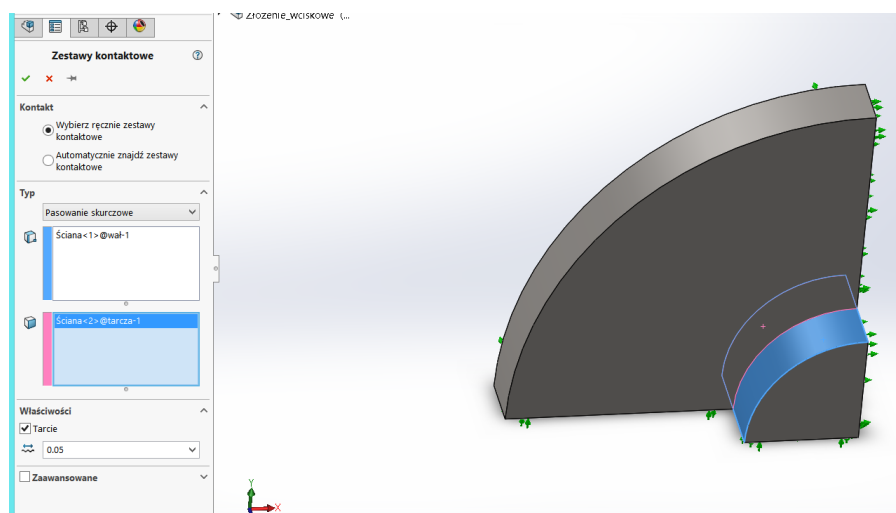
W następnym kroku uruchamia się „Nowe badanie” i wybiera „Analizę statyczną”. W „Umocowaniach” należy wybrać „Zaawansowane...”, a następnie „Symetria” i zaznaczyć ściany według rys. 123. W rzeczywistości oznacza to, że tarcza ma grubość 100 mm, a wał 200 mm.



Rys. 123. Szkic zdefiniowania umocowania przez symetrię
Fig. 123. Definition of fixtures by advanced fixture of symmetry

Najważniejsze jest, aby zdefiniować „Połączenia”, a tam „Zestawy kontaktowe”. Bez tej czynności program po uruchomieniu obliczeń wskaże błąd – nachodzenie na siebie elementów. W analizowanym przypadku to nachodzenie to właśnie wcisk. Należy więc w wierszu „Połączenia” wstawić „Zestawy kontaktowe”, wybrać „Pasowanie skurczowe” (rys. 124), wskazując powierzchnię walcową wału

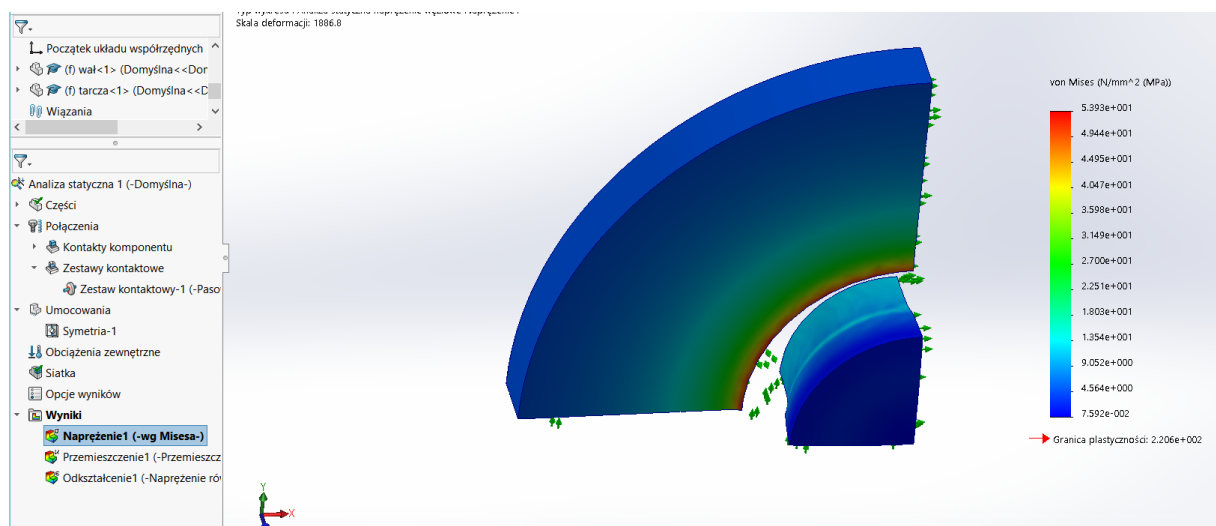
oraz wewnętrzną tarczy, w oddzielnych polach. Konieczne uaktywnić „Tarcie”, można zostawić bieżącą wartość współczynnika tarcia ślizgowego. Można teraz uruchomić obliczenia.



Rys. 124. Sposób zdefiniowania pasowania skurczowego
Fig. 124. Definition of contact sets by shrink fit

Analiza wyników

Należy przeanalizować wykres naprężenia zredukowanego, sprawdzając, czy miejscowo nie przekroczono granicy plastyczności materiału (rys. 125). Wykresy można oglądać na dwa sposoby: bez zdeformowania i jako zdeformowane, tzn. w zmienionej skali.



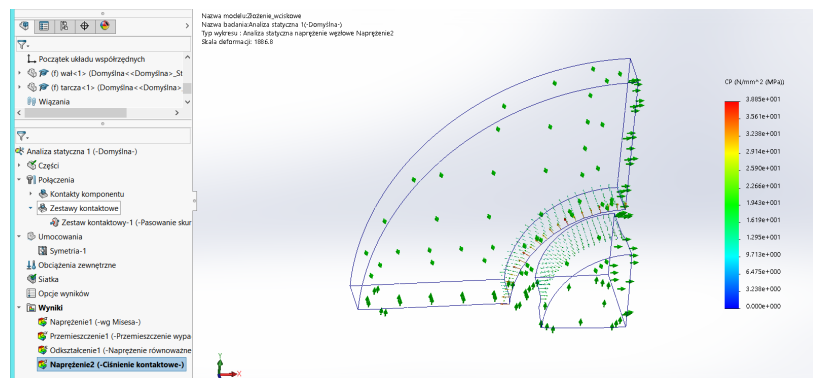
Rys. 125. Naprężenie zredukowane modelowanego złożenia elementów walcowych (widok zdeformowany)
Fig. 125. Equivalent stress for modeled assembly of cylinders (deformed view)

Aby wskazać, jaki nacisk panuje na powierzchni styku elementów, należy wstawić nowy wykres z naprężeniem, w którym należy wybrać „Ciśnienie powierzchniowe”. Program wskaże wynik jedynie na powierzchni, gdzie zdefiniowano „połączenie skurczowe” (rys. 126). Rozsunięte powierzchnie będą opisane wektorami o module równym naprężeniu normalnemu do ich powierzchni.

Naprężenie to, zwane również naciskiem powierzchniowym, można obliczyć według wzorów literaturowych (1). W przypadku gdy elementy są z tego samego materiału, wzór ten jest następujący [3]:

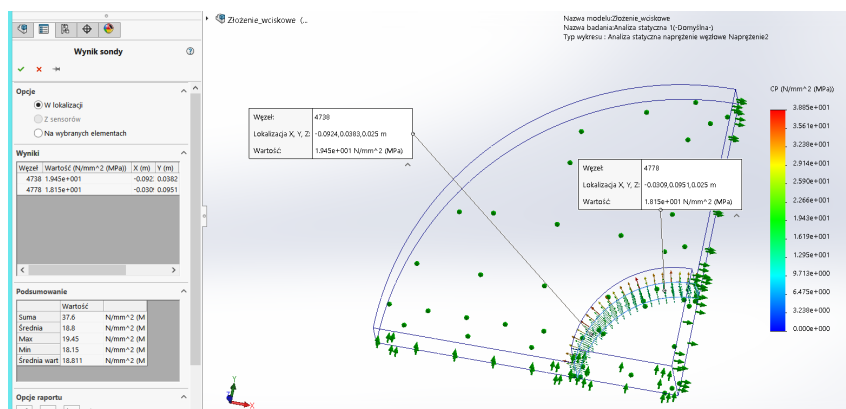
$$(1)$$

gdzie: E – moduł sprężystości objętościowej (Younga), b – średnica zewnętrzna wału, c – średnica zewnętrzna tarczy, a – średnica wewnętrzna wału, dotyczy rury (w analizowanym przypadku $a = 0$), δ – wcisk.



Rys. 126. Ciśnienie powierzchniowe (nacisk) w miejscu styku modelowanych elementów walcowych
Fig. 126. Contact pressure (thrust) on surface of shrink contact of modeled cylinders

W przypadku stali węglowej o $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa i danych $a = 0$, $b = 200$, $c = 600$ oraz $d = 0,04$ mm nacisk powierzchniowy pomiędzy powierzchniami walców wynosi 19 MPa (porównać z wartością otrzymaną z rys. 127).



Rys. 127. Ciśnienie (nacisk) powierzchniowe w miejscu styku modelowanych elementów walcowych dla wybranych punktów
Fig. 127. Contact pressure (thrust) on surface of shrink contact of modeled cylinders at chosen points

15. BUDOWA ORAZ ANALIZA RUCHU UPROSZCZONEGO MODELU MASZYNY TŁOKOWEJ

Cel główny ćwiczenia: celem ćwiczenia jest zbudowanie uproszczonego modelu (złożenia) maszyny tłokowej. Nabycie umiejętności prawidłowego przypisywania relacji (wiązań) pomiędzy poszczególnymi elementami. Przeprowadzenie prostej symulacji ruchu oraz wyznaczenie trajektorii ruchu, wykresów prędkości i przyspieszenia dla wybranych elementów mechanizmu.

Cel pomocniczy ćwiczenia: budowa skomplikowanych układów złożonych. Przypisywanie relacji w złożeniach. Modyfikacja poszczególnych elementów w celu ich dopasowania i współdziałania w zespole.

Zakres ćwiczenia:

- a) przeprowadzenie obliczeń dla geometrii wału korbowego oraz korbowodu,
- b) zbudowanie modeli poszczególnych elementów maszyny tłokowej:
 - wał korbowy,
 - korbowód,
 - tłok,
 - głowica,
- c) zbudowanie złożenia maszyny tłokowej z zamodelowanych elementów z uwzględnieniem odpowiednich wiązań pomiędzy poszczególnymi elementami,
- d) przeprowadzenie prostej symulacji ruchu zbudowanego układu,
- e) wyznaczenie trajektorii ruchu oraz charakterystyk prędkości i przyspieszenia wybranych elementów mechanizmu,

Maszyna tłokowa jest to układ złożony z cylindra oraz szczelnego tłoka. Zadaniem układu jest przetwarzanie energii ciśnienia w energię mechaniczną lub odwrotnie energii mechanicznej w energię ciśnienia płynu. Przykładami maszyn tłokowych mogą być: silnik tłokowy, pompa tłokowa, sprężarka tłokowa.

Przebieg ćwiczenia – budowa modelu:

- a) zapoznać się z budową wielocylindrowego silnika spalinowego,
- b) wybór konfiguracji podstawowych elementów składowych, tzn. liczby cylindrów i ich ustawienia (rzędowy, widlasty), dobór średnicy i skoku tłoka na podstawie dokumentacji znanych samochodów osobowych,
- c) omówienie podstawowych zależności wymiarowych elementów silnika spalinowego.

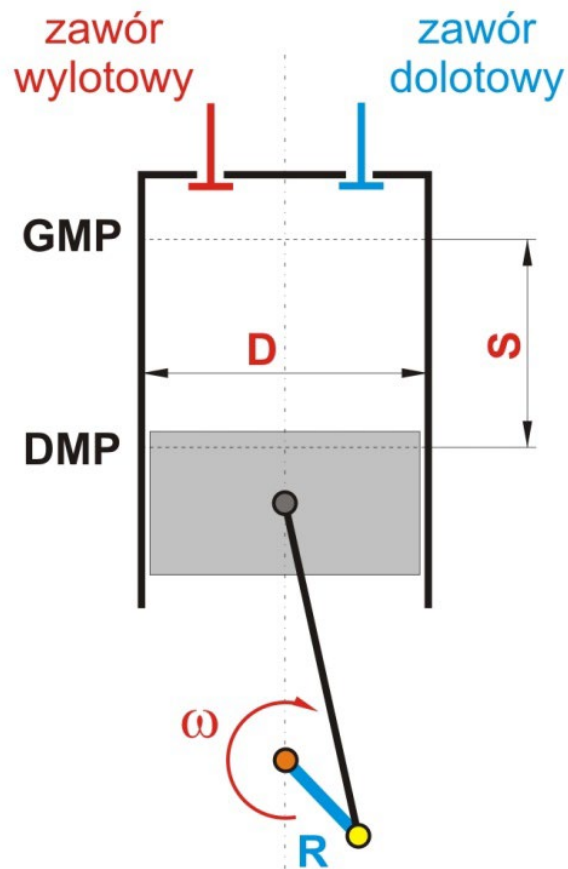
Silnik spalinowy – główne wymiary i założenia

Skok tłoka – droga, jaką tłok przebywa podczas obrotu wału korbowego o kąt wynoszący 180 stopni.

Podstawowe oznaczenia:

- skok tłoka – **S**,
- średnica otworu cylindra – **D**,
- promień korby wału korbowego – **R**,
- średnica czopa głównego – **d_G**,
- długość czopa głównego – **l_G**,
- średnica czopa korbowego – **d_K**,
- długość czopa korbowego – **l_K**,
- długość korbowodu – **L**.

Schemat jednocylindrowego silnika spalinowego przedstawiono na rys. 128.



Rys. 128. Uproszczony schemat jednocylindrowego silnika tłokowego
 Fig. 128. Simplified diagram of a single-cylinder piston engine

$$S = 2 \cdot R$$

$$S/D = 0,7 \div 1,1$$

Czop główny

$$d_G = 0,65 \cdot D$$

$$l_G = 0,55 \cdot d_G$$

Czop korbowy

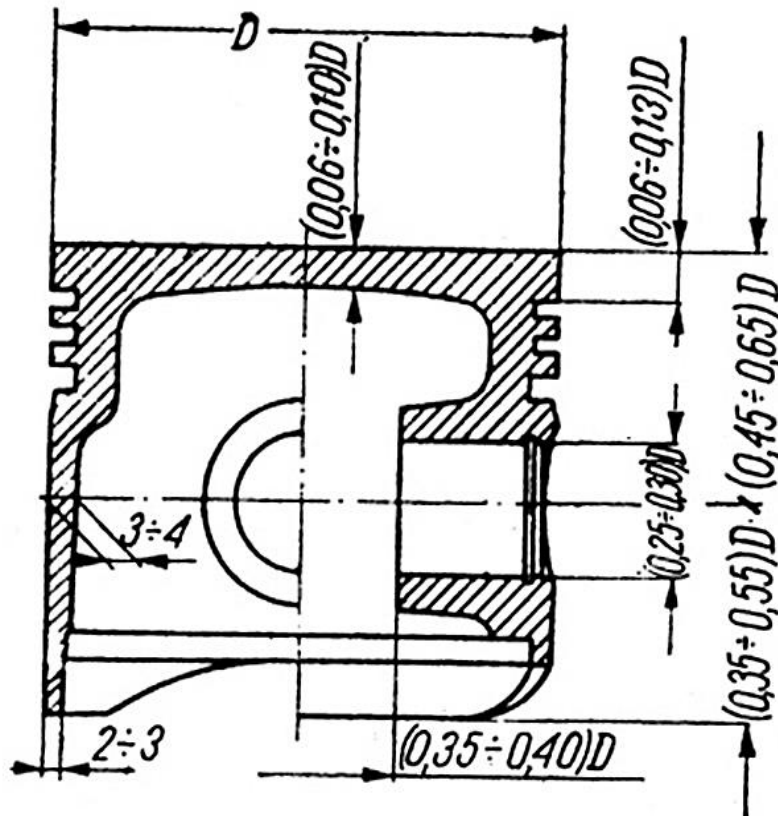
$$d_K = 0,75 \cdot D$$

$$l_K = 0,55 \cdot d_K$$

Korbowód

$$L = 3,6 \cdot R = 3,6 \cdot S/2$$

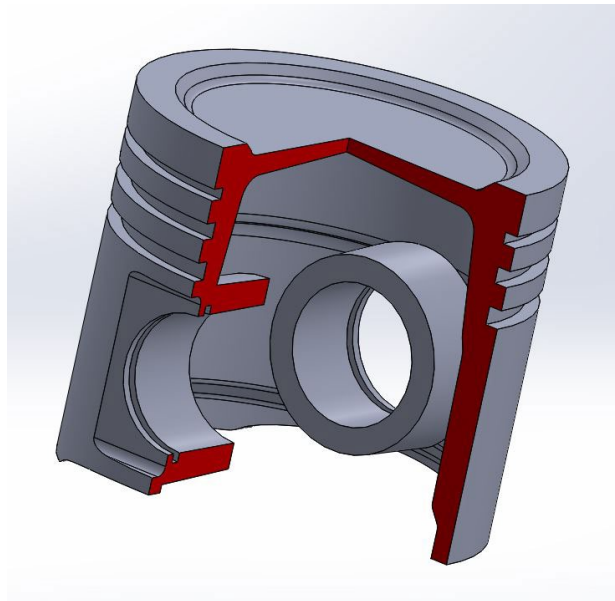
d) budowa i podstawowe zależności wymiarowe tłoka (rys. 129)



Rys. 129. Tłok silnika spalinowego o zapłonie iskrowym [2]

Fig. 129. Spark ignition internal combustion engine piston [2]

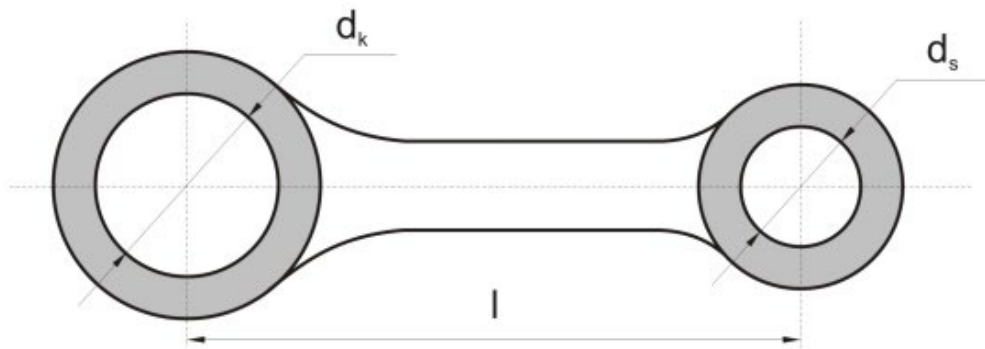
Przykładowy model tłoka silnika spalinowego (wraz z przekrojem) przedstawiono na rys. 130.



Rys. 130. Przykładowy model tłoka silnika spalinowego

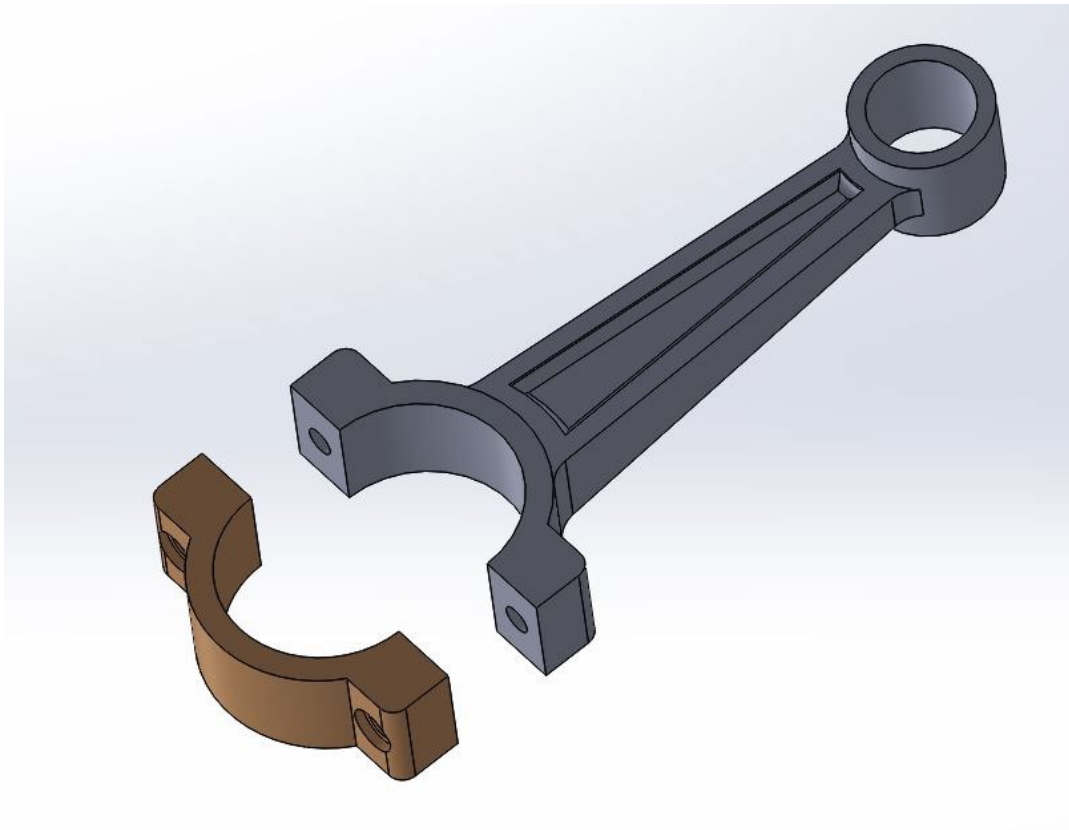
Fig. 130. An example of an internal combustion engine piston

e) budowa korbowodu (rys. 131)



Rys. 131. Schematyczny rysunek korbowodu
Fig. 131. Schematic drawing of the connecting rod

Przykładowy model korbowodu przedstawiono na rys. 132.



Rys. 132. Przykładowy model korbowodu
Fig. 132. An exemplary model of the connecting rod

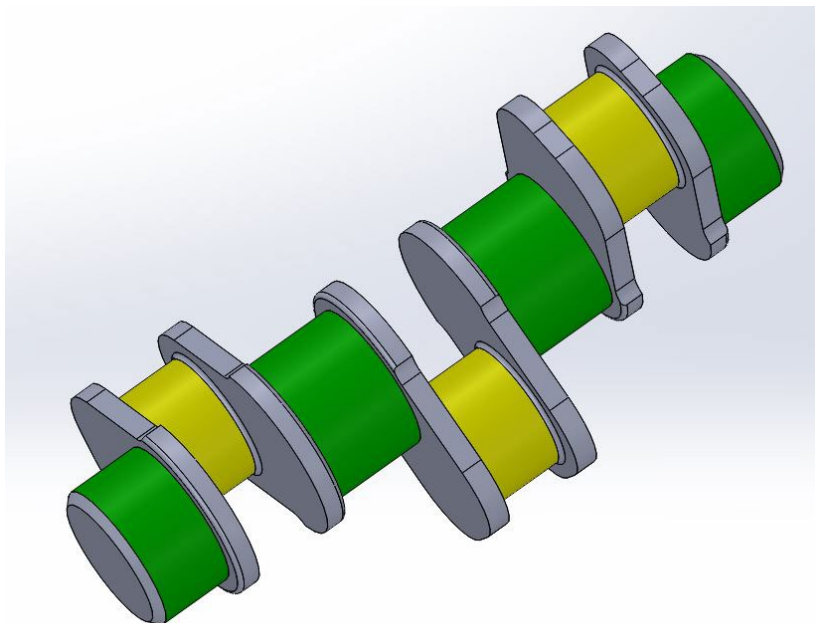
f) budowa wału korbowego

Wał korbowy jest jednym z podstawowych elementów silnika spalinowego. Jego zadaniem jest zamiana ruchu posuwisto-zwrotnego na ruch obrotowy. W budowie wału korbowego możemy wyróżnić czopy główne znajdujące się w osi wału oraz czopy korbowe, na których osadzone są korbowody. Kształt wału korbowego uzależniony jest ściśle od układu tłoków, liczby cylindrów w silniku oraz kolejności zapłonu.

Poniżej przedstawiono rzeczywisty wygląd wału korbowego (rys. 133) oraz model rysunkowy 3D (rys. 134).



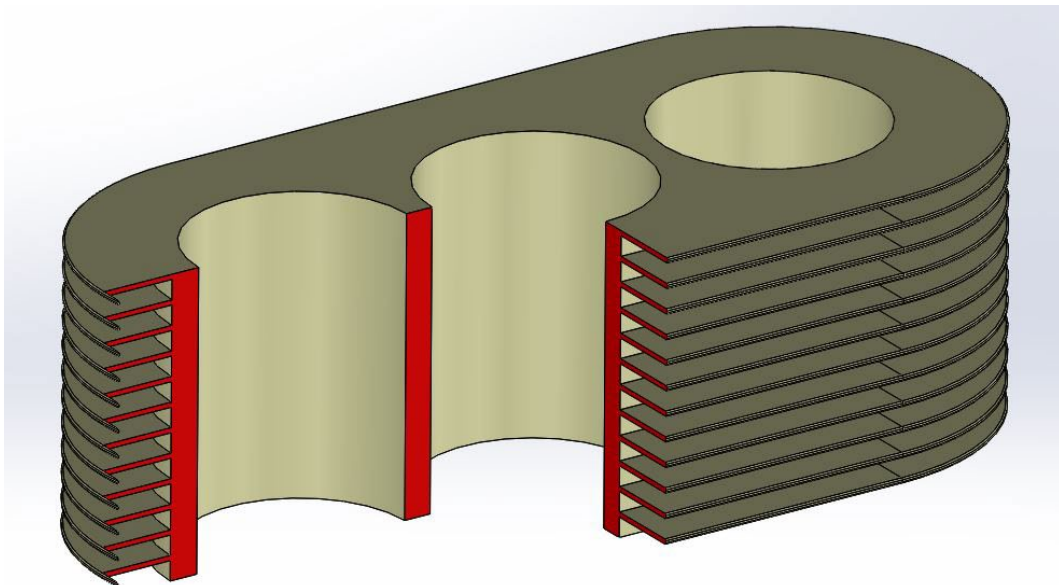
Rys. 133. Wał korbowy silnika spalinowego czterocylindrowego
Fig. 133. The crankshaft of a four-cylinder internal combustion engine



Rys. 134. Przykładowy model wału korbowego silnika spalinowego trzycylindrowego
Fig. 134. An example model of the crankshaft of a three-cylinder internal combustion engine

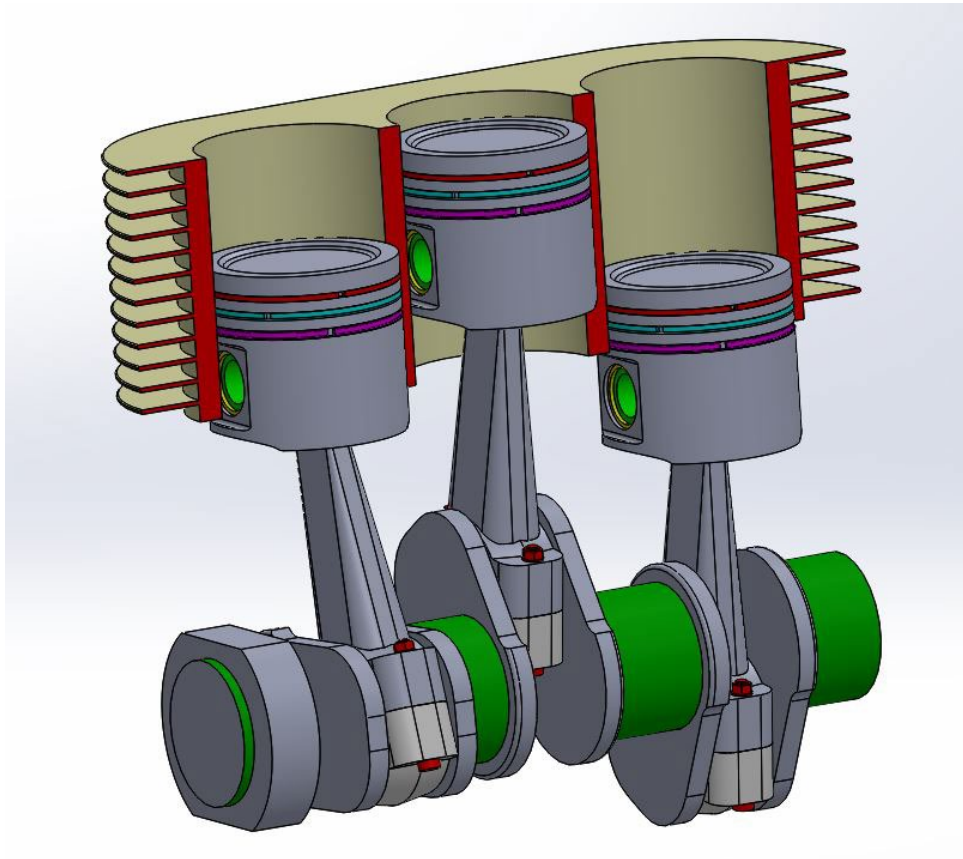
g) budowa bloku silnika

Blok jest głównym elementem silnika spalinowego. Mogą być w nim bezpośrednio wytoczone tuleje cylindrów lub wstawione jako dodatkowe elementy w odpowiednio przygotowane gniazda. Bloki silnika przeważnie są budowane dwuczęściowo. Najczęściej bloki silnika wykonuje się z żeliwa lub stopu aluminium i krzemu. Blok silnika wraz z głowicą stanowi obudowę układu korbowego i rozrządu. Przykładowy model bloku silnika spalinowego trzycylindrowego przedstawiono na rys. 135.



Rys. 135. Uproszczony model bloku silnika. Część cylindrowa
Fig. 135. A simplified model of the engine block. Cylinder part

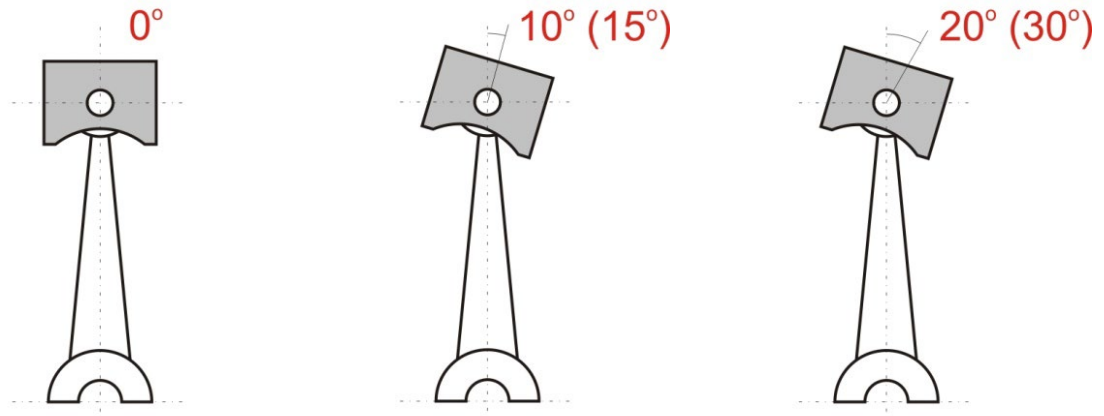
Pełny uproszczony model silnika spalinowego trzycylindrowego przedstawiono na rys. 136.



Rys. 136. Uproszczony model silnika spalinowego trzycylindrowego
 Fig. 136. A simplified model of a three-cylinder internal combustion engine

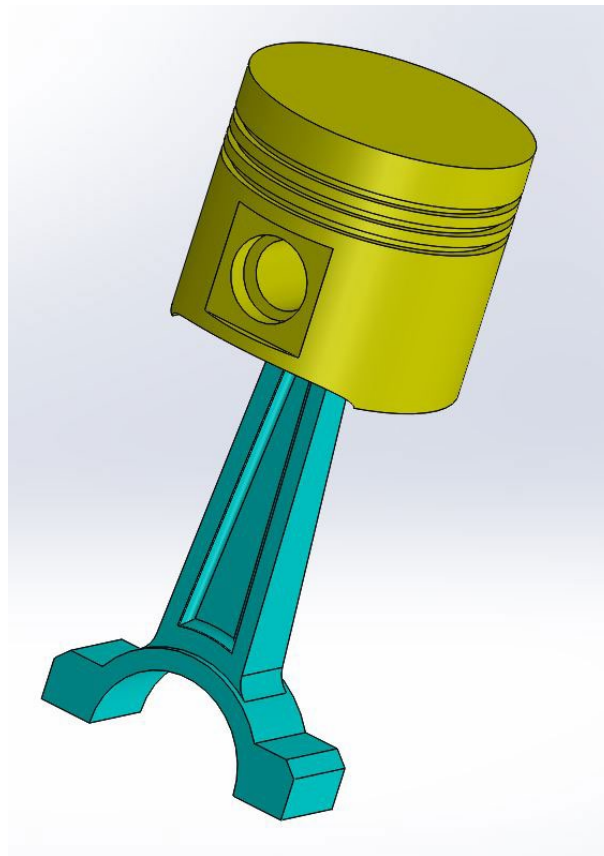
Przebieg ćwiczenia – analiza stanu naprężenia i deformacji:

- a) omówienie podstawowych operacji w module SolidWorks Simulation,
- b) zbudowanie modelu układu korbowego,
 - analiza stanu naprężenia,
 - analiza deformacji,
 - wyznaczenie współczynnika bezpieczeństwa korbowodu,
- c) przeprowadzenie symulacji MES dla trzech wybranych położań tłoka w stosunku do osi korbowodu – rys. 137 (symulacja uproszczona, w wersji rozbudowanej można dodać obliczenia na ściskanie, wyboczenie):
 - 0°, 10°, 20°
 - 0°, 15°, 30°



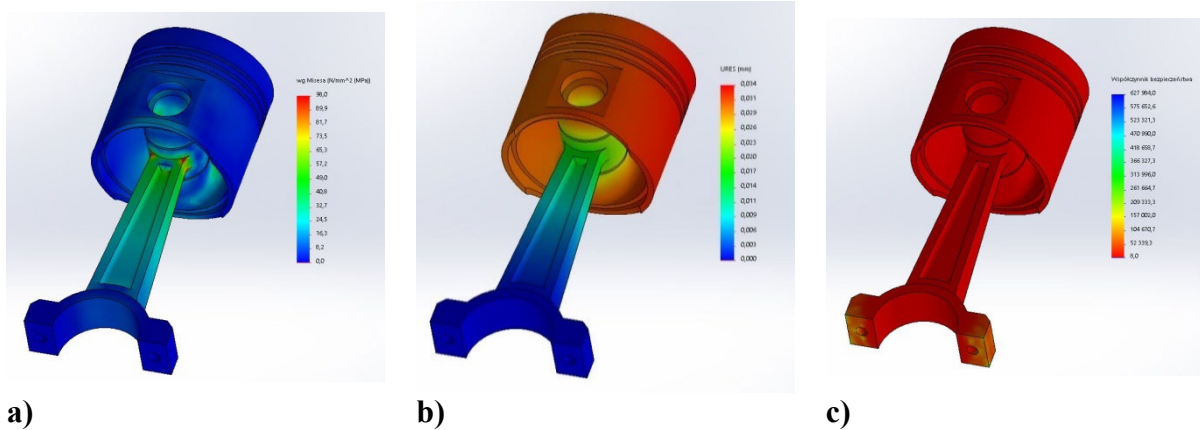
Rys. 137. Sposób ustawienia tłoka i korbowodu do przeprowadzenia symulacji numerycznej
Fig. 137. The way of setting the piston and connecting-rod for numerical simulation

Układ poddawany analizie w poniższych symulacjach numerycznych przedstawiono na rys. 138.



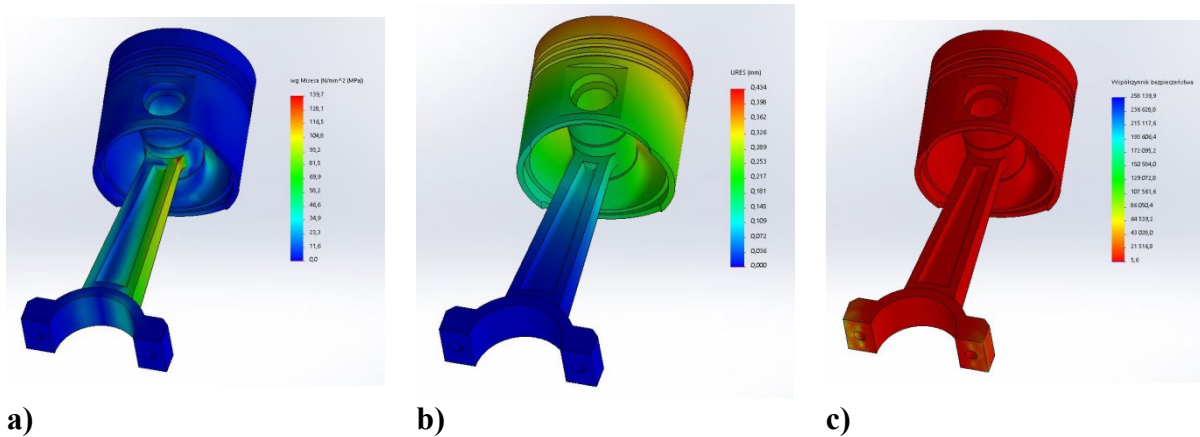
Rys. 138. Przykładowy model układu korbowego
Fig. 138. An exemplary model of the crank system

Na rys. 139–141 pokazano wyniki symulacji numerycznych dla poszczególnych rozpatrywanych przypadków.



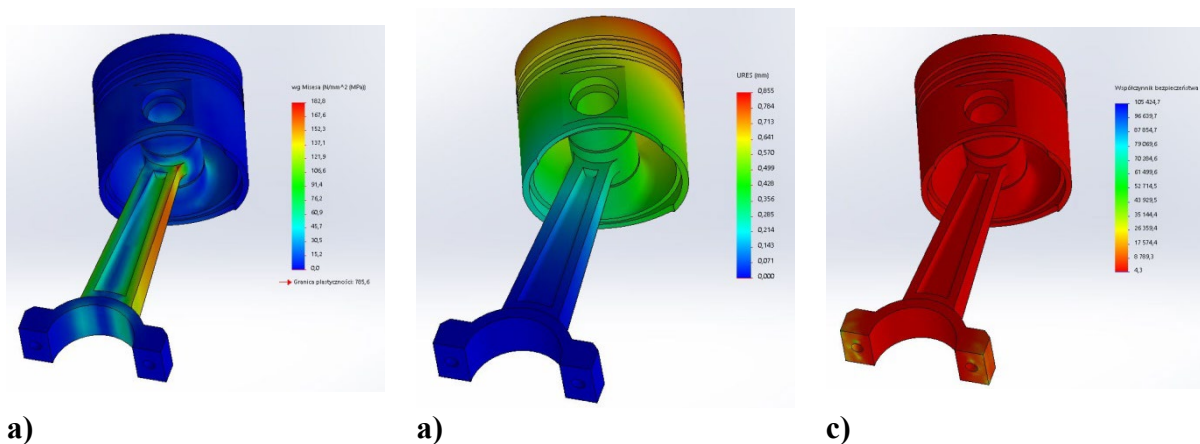
Rys. 139. Analiza numeryczna MES dla układu korbowo-tłokowego: rozkład naprężeń (a), deformacja modelu (b), współczynnik bezpieczeństwa (c). Kąt pochylenia 0°

Fig. 139. FEM numerical analysis for the crank-piston system: stress distribution (a), deformation of the model (b), safety factor (c). Tilt angle 0°



Rys. 140. Analiza numeryczna MES dla układu korbowo-tłokowego: rozkład naprężeń (a), deformacja modelu (b), współczynnik bezpieczeństwa (c). Kąt pochylenia 10°

Fig. 140. FEM numerical analysis for the crank-piston system: stress distribution (a), deformation of the model (b), safety factor (c). Tilt angle 10°

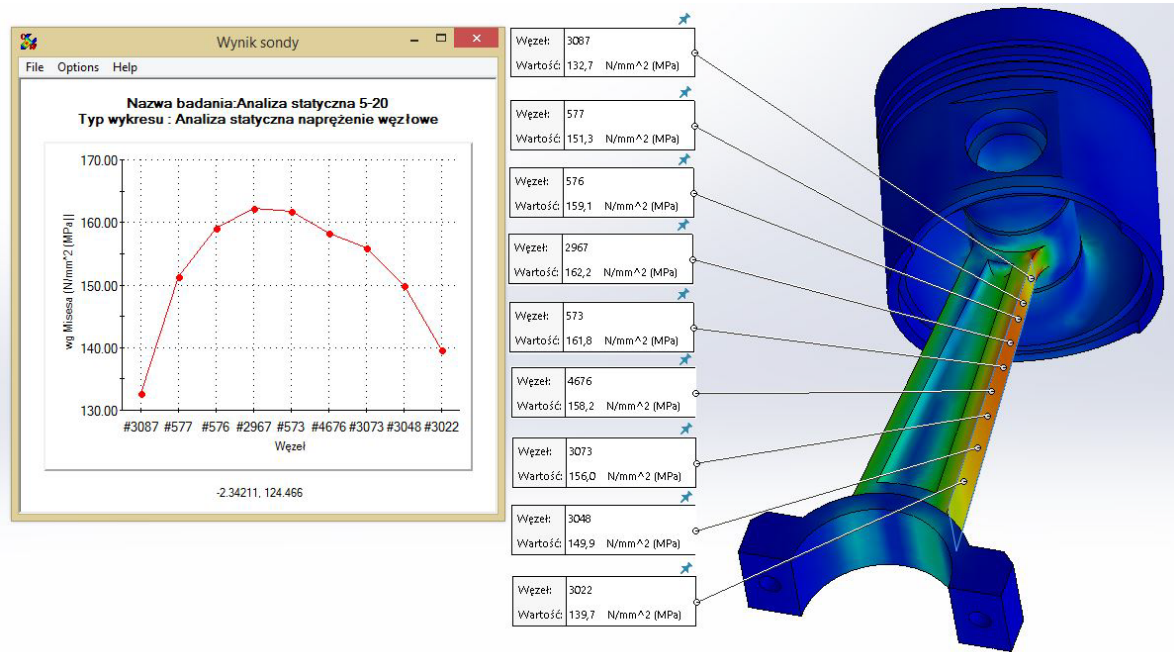


Rys. 141. Analiza numeryczna MES dla układu korbowo-tłokowego: rozkład naprężeń (a), przemieszczenia (b), współczynnik bezpieczeństwa (c). Kąt pochylenia 20°

Fig. 141. FEM numerical analysis for the crank-piston system: stress distribution (a), displacements (b), safety factor (c). Tilt angle 20°

d) przeprowadzić dyskusję na temat różnic w zachowaniu się układu korbowo-tłokowego przy różnych kątach pochylenia tłoka.

Na rys. 142 przedstawiono jeden z przykładów analizy stanu naprężenia układu korbowego z zaznaczonymi węzłami, dla których sporządzono wykres rozkładu naprężeń.



Rys. 142. Przykładowa analiza stanu naprężenia układu korbowo-tłokowego dla kąta pochylenia 20°
 Fig. 142. An exemplary analysis of the stress state of the crank-piston system for the inclination angle of 20°

16. MODELOWANIE PRZEKŁADNI OBIEGOWEJ PLANETARNEJ

W tym ćwiczeniu wykonany zostanie model przekładni obiegowej, planetarnej.

Cel główny ćwiczenia: przygotowanie złożenia i wykonanie jego analizy kinematycznej, obliczenie przełożenia przekładni w zależności od przyjętego wariantu działania.

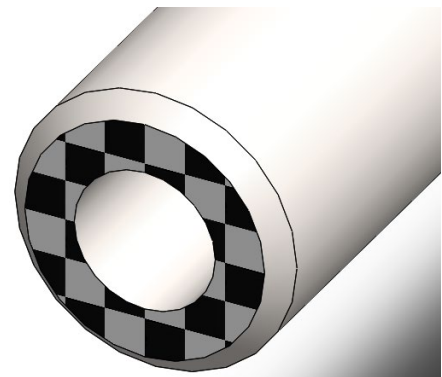
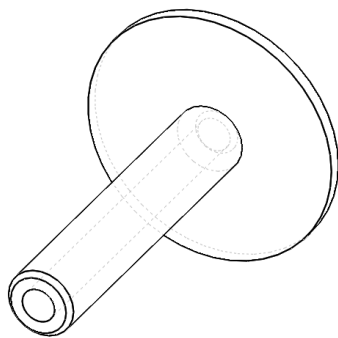
Cel pomocniczy ćwiczenia: zapoznanie się z wiązaniem mechanicznym typu „przekładnia zębata”.

Wiadomości z innych dziedzin nauki pomocne przy wykonaniu tego zadania: fizyka – kinematyka ruchu obrotowego bryły.

Założenia: zestawienie 4 elementów tworzących przekładnię planetarną z 3 satelitami.

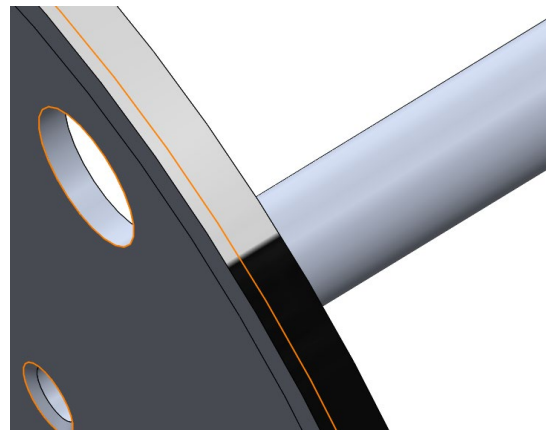
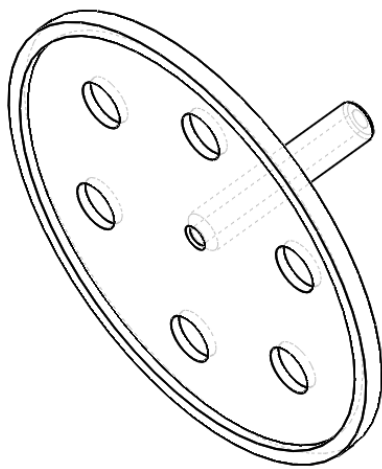
Elementy

- koło centralne, wał główny – walec o średnicy 40 mm i długości 200 mm; na końcu koło „zębate” – walec o średnicy 150 mm i wysokości 8 mm; wszystkie elementy symetryczne względem wspólnej osi obrotu, uzyskiwane przez wyciągnięcie okręgów (rys. 143), w środku otwór o średnicy 20 mm przez cały element; dodatkowo można wykonać sfazowanie, np. 3 x 45°, na krawędziach walca o mniejszej średnicy ($\phi 40$) i otworu ($\phi 20$); poleca się również wprowadzić teksturę wybranych powierzchni, aby ułatwić obserwację ruchu elementów;



Rys. 143. Wał główny (koło centralne), zastosowana tekstura
Fig. 143. Shaft with sun, central gear, used texture

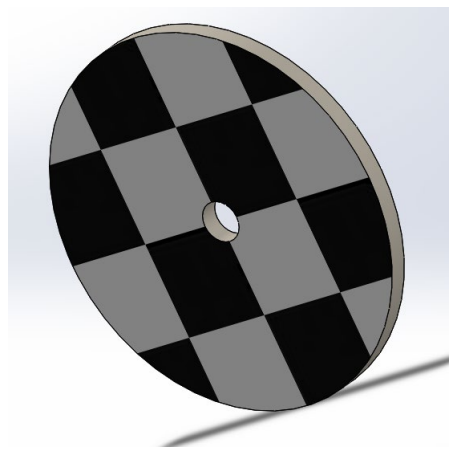
- koło zewnętrzne – walec o średnicy zewnętrznej 470 mm i wysokości 20 mm oraz walec o średnicy 40 mm i długości 200 mm, większy walec ma wydrążony otwór o średnicy 450 mm na głębokość 11 mm; wszystkie elementy symetryczne względem wspólnej osi obrotu, uzyskiwane przez wyciągnięcie okręgów + wyciąganie wycięcia (rys. 144); w środku wydrążony (rura) o średnicy wewnętrznej 20 mm; dodatkowo można wykonać sfazowanie, np. 3 x 45°, na krawędziach walca o mniejszej średnicy ($\phi 40$) i otworu ($\phi 20$); poleca się również wprowadzić teksturę wybranych powierzchni, aby ułatwić obserwację ruchu elementów;



Rys. 144. Wał zewnętrzny, zastosowana tekstura

Fig. 144. Shaft with internal (ring) gear, used texture

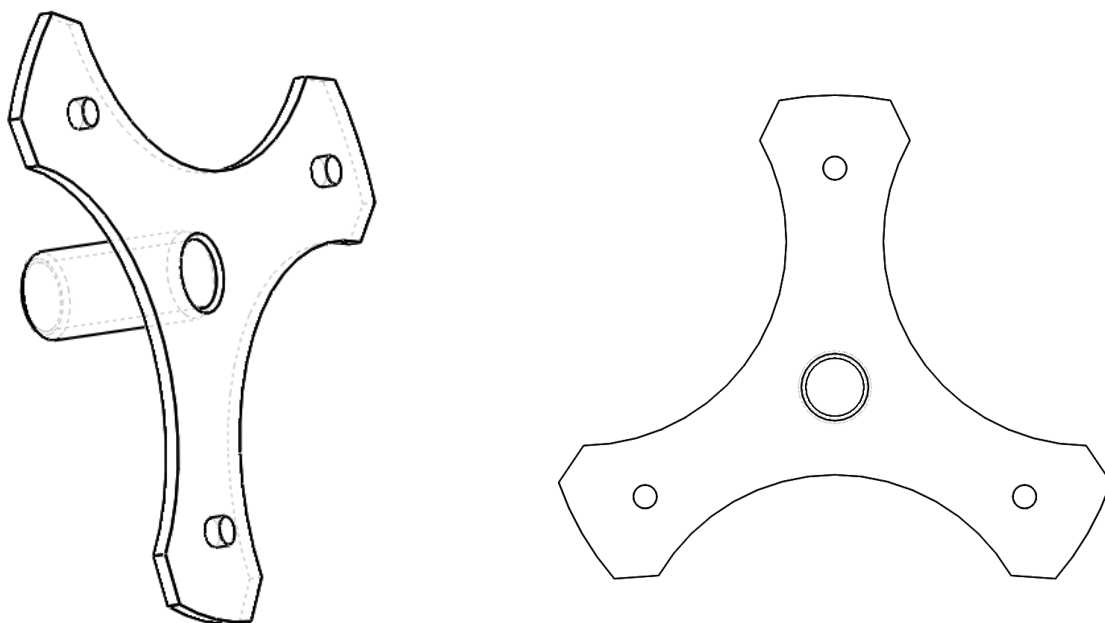
- koło satelitarne (1 sztuka) - walec o średnicy zewnętrznej 150 mm i wysokości 8 mm; wydrążony otwór o średnicy 16 mm (rys. 145); poleca się również wprowadzić teksturę wybranych powierzchni, aby ułatwić obserwację ruchu elementów;



Rys. 145. Koło satelitarne, zastosowana tekstura

Fig. 145. Planet, used texture

- wał od kół satelitarnych (jarzmo) – walec o średnicy zewnętrznej 50 mm i wysokości 100 mm; na jego końcu walec o średnicy zewnętrznej 400 mm i wysokości 8 mm, oba walce koncentryczne, wzdłuż osi walców wydrążenie o średnicy 40 mm; na stronie czołowej większego walca rozmieścić 3 walce o średnicy 16 mm i wysokości 10 mm rozstawione co 120° na promieniu 150 mm (rys. 146);



Rys. 146. Jarzmo

Fig. 146. Planetary carrier

Materiały – zaproponować na podstawie literatury.

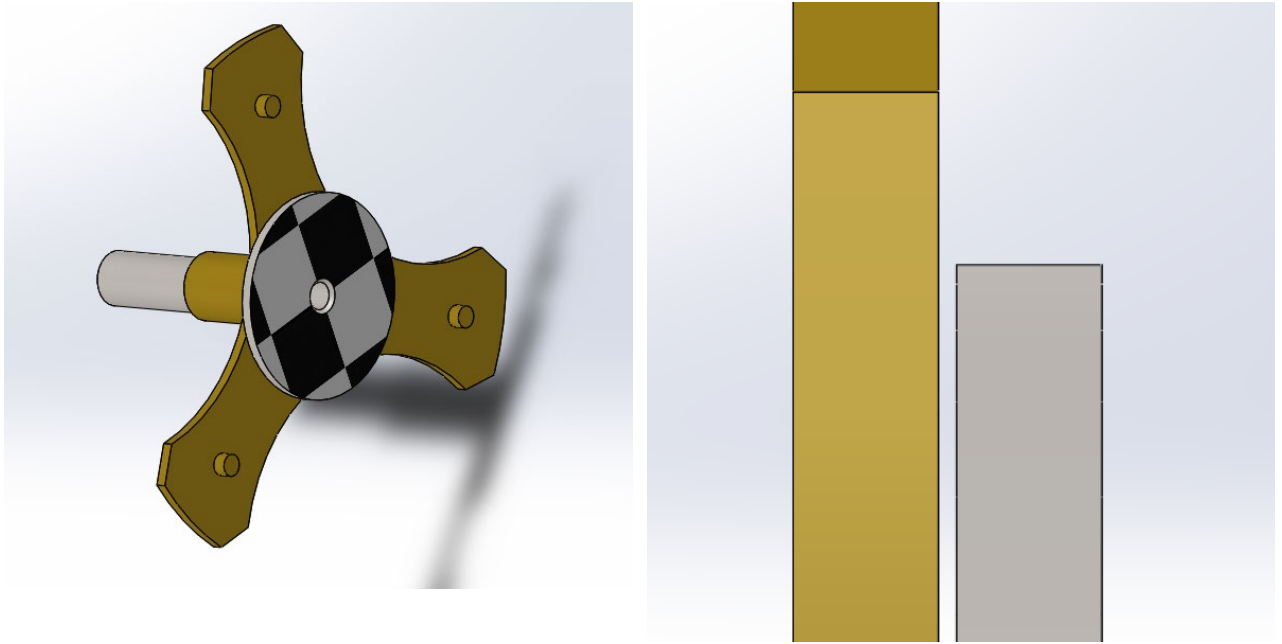
Złożenie

W złożeniu wystarczy umieścić 1 koło satelitarne, co zwiększa czytelność symulacji.

Wiązania do pewnego stopnia można przyjmować dowolne. Dotyczy to w szczególności wiązania odległości, niektóre zaproponowane zilustrowano na rys. 147–149.

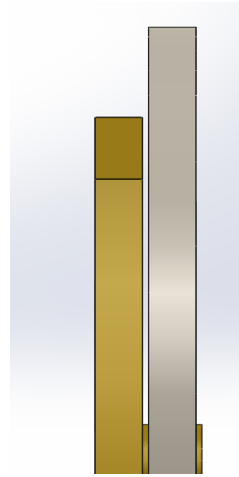
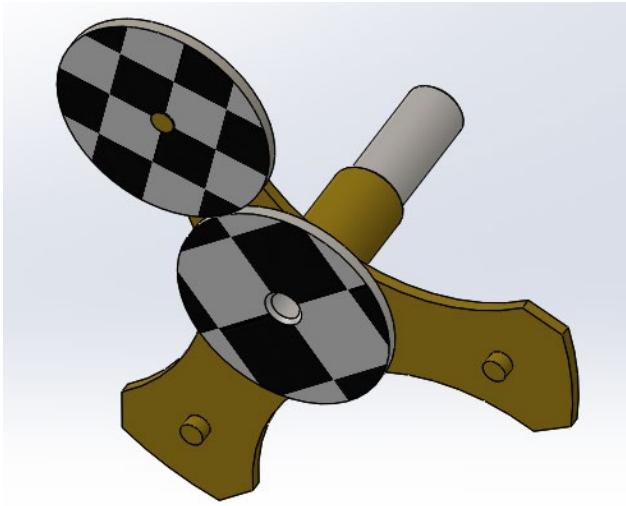
Wykorzystane wiązania:

- koncentryczne – powierzchnia wewnętrzna jarzma i odpowiednia zewnętrzna wału centralnego (ϕ 40 mm);
- odległość – powierzchnia „koła zębatego” wału głównego i powierzchnia dowolnego z 3 walców o średnicy 16 mm mają być w odległości 1 mm (rys. 147);

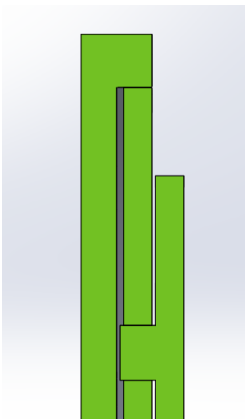
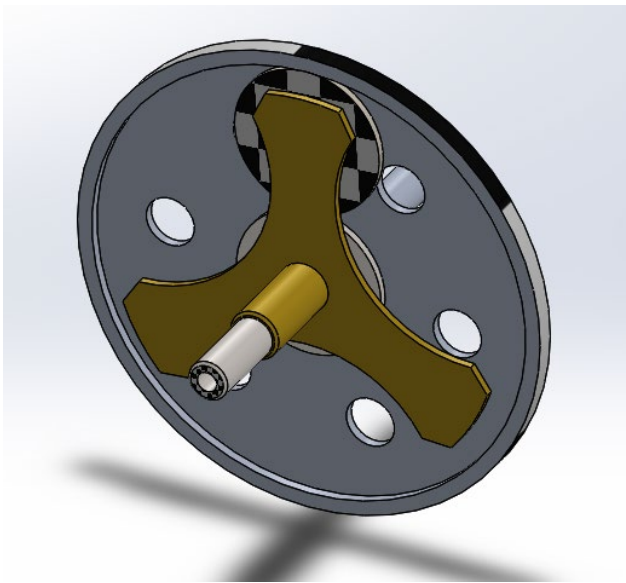


Rys. 147. Wał centralny z jarzmem, szerokość szczeliny pomiędzy elementami wynosi 1 mm
 Fig. 147. Central gear with planetary carrier, gap between them is 1 mm wide

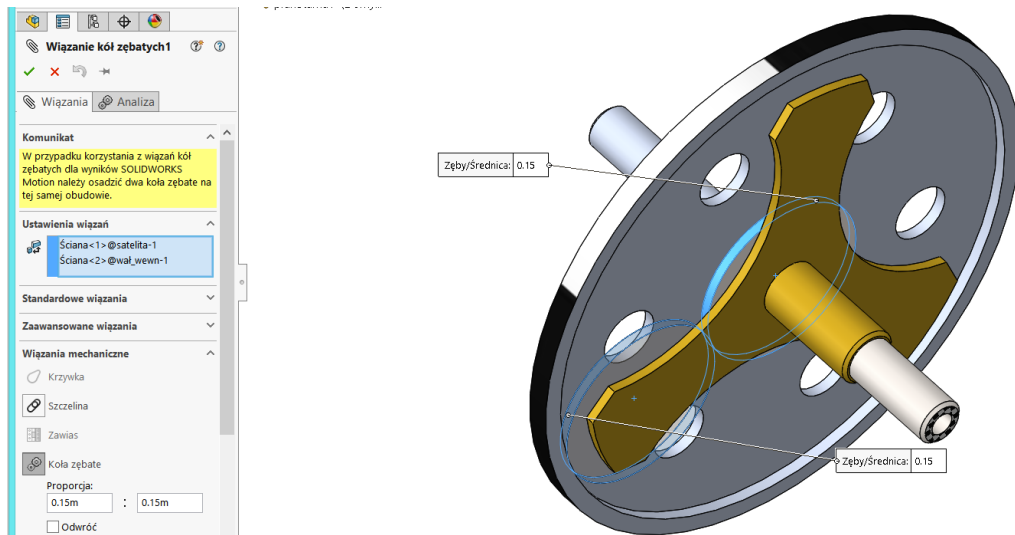
- koncentryczne – powierzchnia walca $\phi 16$ mm jarzma i odpowiednia wewnętrzna satelity $\phi 16$ mm;
- odległość – powierzchnia czołowa satelity i powierzchnia dowolnego z 3 walców o średnicy 16 mm jarzma mają być w odległości 1 mm (rys. 148);
- koncentryczne – powierzchnia zewnętrzna wału centralnego ($\phi 40$ mm) i odpowiednia zewnętrzna wału zewnętrznego ($\phi 40$ mm);
- odległość – czołowa powierzchnia walca $\phi 16$ mm jarzma i powierzchnia wewnętrzna otworu $\phi 450$ mm wału zewnętrznego mają być w odległości 1 mm (rys. 150);
- wiązanie kół zębatach – powierzchnie pobocznic walców koła centralnego $\phi 150$ mm i satelity (rys. 150);
- koło zębata – pobocznica walca satelity i pobocznica walca $\phi 450$ mm koła zewnętrznego (rys. 151).



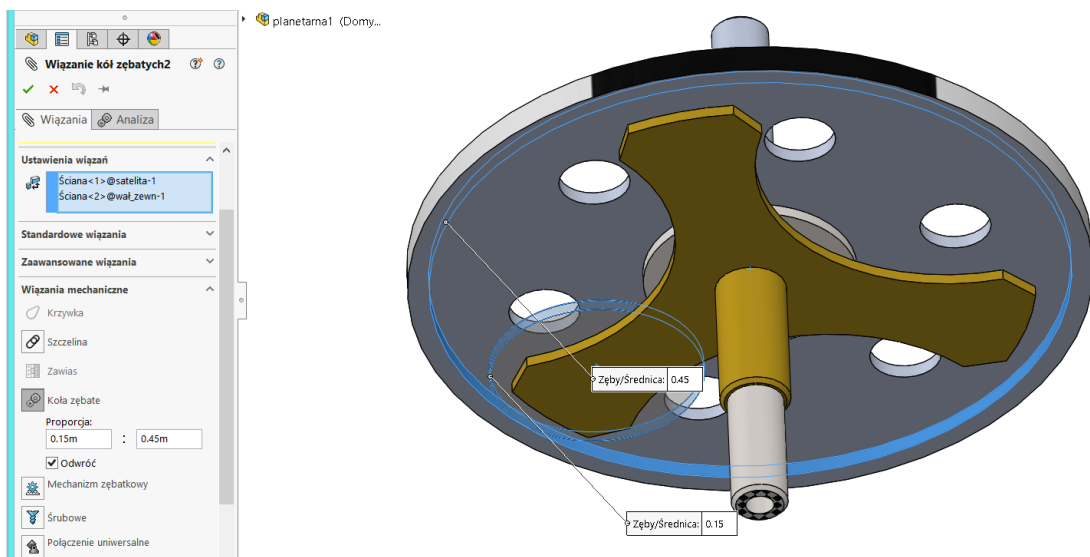
Rys. 148. Satelita na jarzmie, szerokość szczeliny pomiędzy elementami wynosi 1 mm
 Fig. 148. Planet on planetary carrier, gap between them is 1 mm wide



Rys. 149. Wał centralny i wał zewnętrzny, szerokość szczeliny pomiędzy elementami wynosi 1 mm
 (najwęższy odcinek pola w kolorze szarym)
 Fig. 149. Central gear and internal gear, gap between them is 1 mm wide (the narrowest seen gap)



Rys. 150. Wiązanie kół zębatach koła centralnego i satelity
Fig. 150. Mate of gear used for central gear and planet



Rys. 151. Wiązanie kół zębatach wału zewnętrznego i satelity
Fig. 151. Mate of gear used for internal gear and planet

Analiza ruchu

Przekładnia planetarna może pracować przy 3 wariantach napędu, uzyskując inne wartości przełożenia. Przebieg symulacji:

- zdefiniowanie napędu obrotowego wybranego elementu ruchomego – wał centralny, koło zewnętrzne lub jarzmo (kierunek i zwrot) o prędkości obrotowej 60 obr/min, co odpowiada $1 \text{ obr/s} = 360^\circ/\text{s}$; można zdefiniować wszystkie, a potem je wygasić, zostawiając tylko aktualnie badany!;

- wybór wykresu prędkości kątowej wału centralnego, jarzma i wału zewnętrznego; wyboru dokonuje się w ikonie „Wyniki i wykresy”, wybierając prędkość kątową danego elementu („Przemieszczenie.../Prędkość kątowa/Wielkość”); w zależności od badanego wariantu element nieruchomy będzie miał prędkość równą 0, element napędowy 360°/s, a element napędzany prędkość wynikającą z przełożenia przekładni!;
- włączenie analizy ruchu.

Analiza wyników

3 warianty napędu z różną wartością przełożenia $i = n_1/n_2$ (gdzie n_1 – prędkość obrotowa wału napędowego, czynnego, n_2 – prędkość obrotowa wału napędzanego, biernego) oraz ze zmianą kierunku obrotów:

- nieruchomy wał główny oraz ruchome wał satelitów i koło zewnętrzne; gdy napędowy jest wał satelitów (jarzmo), wtedy $i = 0,5D_z / (D_w + D_s) < 1$ (redukcyjne), ten sam kierunek obrotów; w analizowanym przypadku $i = 0,5 \times 450 / (150 + 150) = 0,75$;
- nieruchomy wał satelitów (jarzmo) oraz ruchome wał główny i koło zewnętrzne; gdy napędowy jest wał zewnętrzny, wtedy $i = D_w / D_z < 1$ (redukcyjne), przeciwny kierunek obrotów; w analizowanym przypadku $i = 150/450 = 0,333$;
- nieruchome koło zewnętrzne oraz ruchomy wał satelitów i wał główny; gdy napędowy jest wał główny, wtedy $i = 0,5D_w / (D_w + D_s) > 1$ (przyspieszające, multiplikacyjne), ten sam kierunek obrotów; w analizowanym przypadku $i = (0,5 \times 450) / (150 + 150) = 4$.

W zależności od analizowanego wariantu UNIERUCHOMIĆ odpowiednie obiekty! Zmianę tę uzyskuje się, klikając prawym przyciskiem myszy nazwę elementu na liście elementów złożenia i wybierając odpowiednie opcje „Ruchomy lub Nieruchomy”.

Odczytać z wyników symulacji wynikową prędkość kątową elementu wyprowadzenia obrotów oraz innych elementów pośredniczących. Jako utrudnienie należy pokazać te wszystkie prędkości na wspólnym wykresie. Analizę wykonać dla 3 wariantów działania przekładni planetarnej.

Tabela 7

Zestawienie poszukiwanych wartości

Prędkość kątowna wałów przekładni planetarnej			Przełożenie
Koło centralne	Jarzmo	Koło zewnętrzne	$i = n_1/n_2$
0	360	? – 480	0,75
? – 1080	0	360	0,333
360	? – 90	0	4

Końcowy wynik (tabela 7) stanowi potwierdzenie uzyskanych zmian prędkości obrotowej i przełożenia przekładni w zależności od wariantu pracy.

17. ANALIZA WIELOWARIANTOWA PROSTEGO ELEMENTU KONSTRUKCYJNEGO

Cel główny ćwiczenia: celem ćwiczenia jest przeprowadzenie analizy prostego elementu konstrukcyjnego. Przeprowadzenie analizy wyboczeniowej. Wykonanie optymalizacji elementu pod kątem ustalonych kryteriów. Sporządzenie raportu z przeprowadzonej optymalizacji.

Cel pomocniczy ćwiczenia: analiza obiektu poddanego oddziaływaniom czynników (obciążeń) zewnętrznych. Przebudowa połączona z optymalizacją. Analiza różnych rozwiązań konstrukcyjnych pod kątem narzuconych kryteriów.

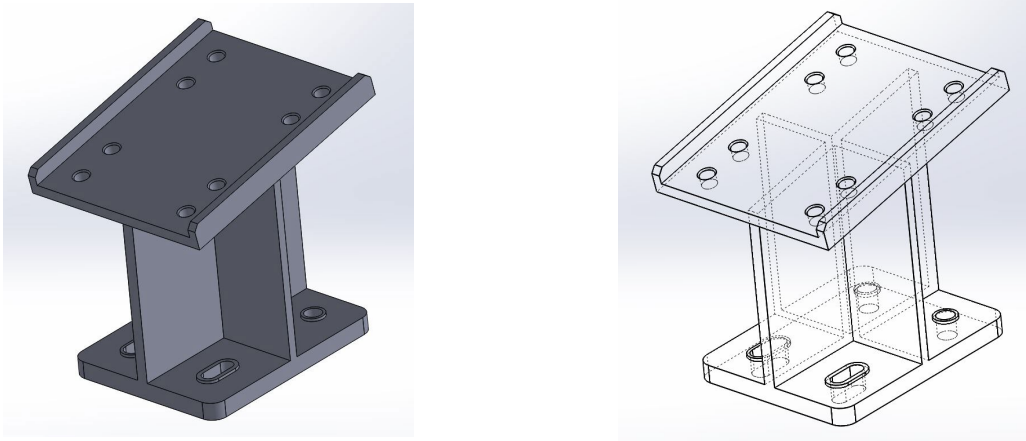
Zakres ćwiczenia:

- a) zbudowanie modelu elementu na podstawie otrzymanej dokumentacji,
- b) obciążenie elementu według wytycznych,
- c) przeprowadzenie analizy naprężenia i przemieszczenia,
- d) przeprowadzenie analizy wyboczenia,
- e) dobór odpowiedniego materiału spełniającego narzucone kryteria,
- f) przeprowadzenie optymalizacji elementu – Badanie Projektu, dla warunków geometrycznych oraz poziomu naprężenia pozwalającego na bezpieczną pracę elementu,
- g) sporządzenie raportu z przeprowadzonych badań.

Optymalizacja – jest to wykonanie zadania w najlepszy możliwy sposób i może być stosowana w różnych obszarach. Jest to więc działanie lub rozwiązanie, które prowadzi do osiągnięcia najlepszych i najkorzystniejszych w danych warunkach wyników. Metoda wyznaczania najlepszego (optymalnego) rozwiązania (poszukiwanie ekstremum funkcji) z punktu widzenia określonego kryterium. Stosuje się optymalizacje jedno- i wielokryterialne [11].

Przebieg zadania:

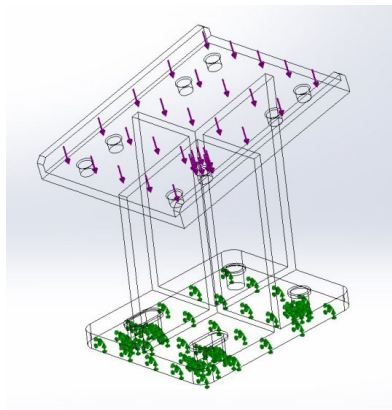
- A. Zbudować geometrię elementu – rys. 152 (opcjonalnie – przygotować indywidualnie model dowolnego pojedynczego elementu konstrukcyjnego).



Rys. 152. Rysunek poglądowy analizowanego elementu konstrukcyjnego
Fig. 152. Overview drawing of the analyzed structural element

Zbudować element uchwytu na podstawie powyższego rysunku. Jest to element odlewany, podstawa o wymiarach 150 mm na 100 mm, grubość 8 mm. Element środkowy usztywniający grubość 8 mm i 6 mm. Maksymalna wysokość uchwytu – 180 mm. Ława mocująca – kąt nachylenia ok. 10°. Pozostałe wymiary przyjąć indywidualnie.

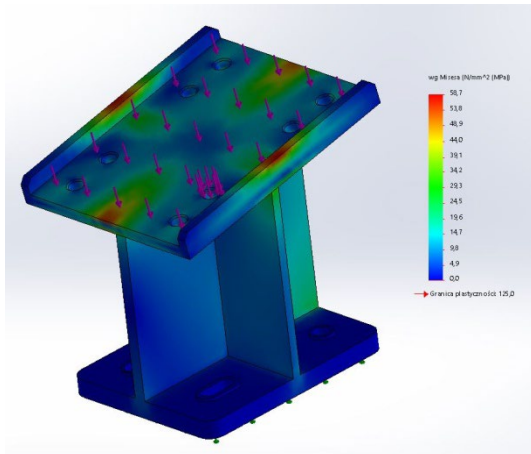
- B. Element uchwytu umocować przy podstawie – nieruchoma geometria (rys. 153). Ławę mocującą obciążyć siłą równomiernie rozłożoną – 15 kN. Materiał – dowolny stop aluminium.



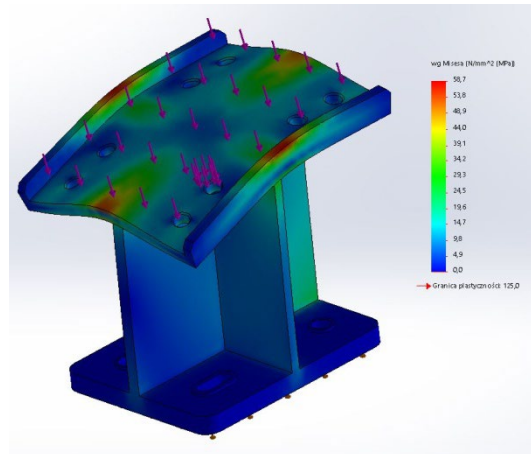
Rys. 153. Sposób zamocowania oraz obciążenia uchwytu
Fig. 153. The method of mounting and loading the handle

C. Przeprowadzamy analizę statyczną. Jako materiał uchwyty wybrano stop aluminium 1060-H18 o granicy plastyczności na poziomie 125 MPa. Wygenerowano siatkę automatyczną. Po przeprowadzeniu analizy otrzymano rozkłady: naprężeń, przemieszczeń, odkształceń oraz wyznaczono wartość współczynnika bezpieczeństwa. Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 154–157.

a) skala deformacji 1:1



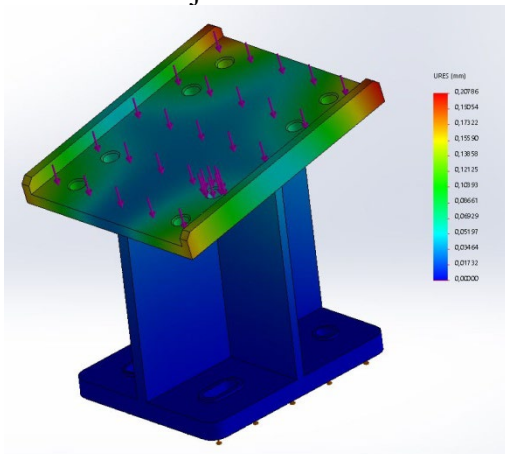
b) powiększona skala deformacji



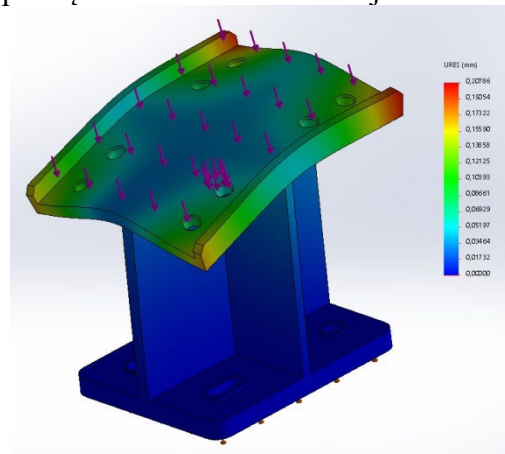
Rys. 154. Analiza numeryczna – rozkład naprężenia: obraz (a), obraz w skali zwracającej uwagę na sposób „zdeformowania” (b).

Fig. 154. Numerical analysis – stress distribution: image (a), image on a scale that draws attention to the manner of „deformation” (b).

a) skala deformacji 1:1

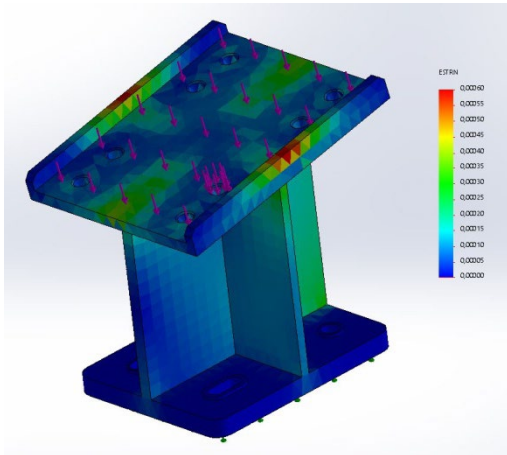


b) powiększona skala deformacji

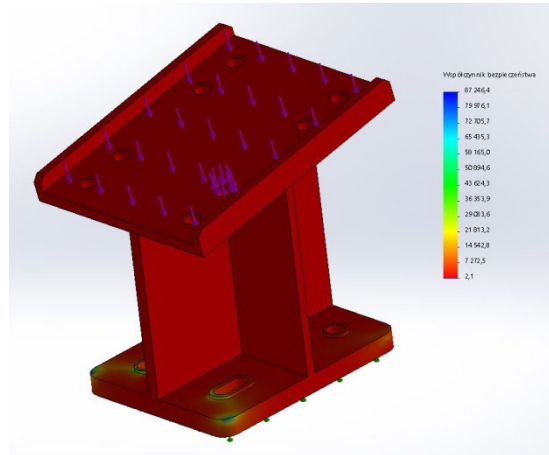


Rys. 155. Analiza numeryczna – rozkład przemieszczenia: obraz (a), obraz w skali zwracającej uwagę na sposób „zdeformowania” (b)

Fig. 155. Numerical analysis – displacement distribution: image (a), image on a scale that draws attention to the manner of „deformation” (b)



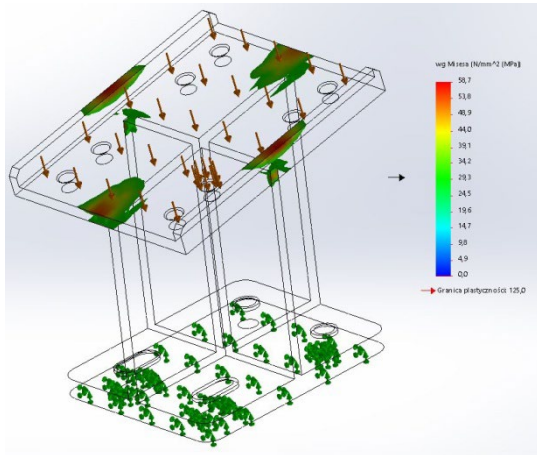
Rys. 156. Analiza numeryczna – rozkład odkształceń
Fig. 156. Numerical analysis – strain distribution



Rys. 157. Analiza numeryczna – rozkład współczynnika bezpieczeństwa
Fig. 157. Numerical analysis – distribution of the safety factor

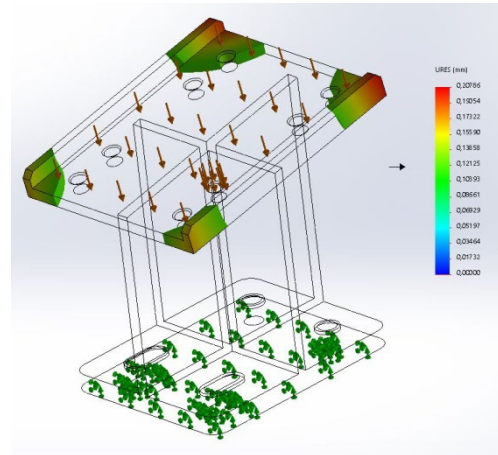
Po przeprowadzeniu analizy metodą elementów skończonych możemy stwierdzić, że w żadnym z obszarów elementu uchwytu nie została przekroczona granica plastyczności (125 MPa). Maksymalne występujące w obiekcie naprężenia są na poziomie ok. 60 MPa. Można wobec tego zastosować materiał o znacznie niższej granicy plastyczności, jeżeli uchwyt będzie obciążany statycznie i nie mamy narzuconych dodatkowych obostrzeń odnośnie do warunków użytkowania. Maksymalne przemieszczenia koncentrują się w narożach ławy mocującej i są na poziomie ok. 0,2 mm. W całym obiekcie występują niewielkie odkształcenia. Współczynnik bezpieczeństwa jest na poziomie 2,1.

Aby lepiej zobrazować obszary o największym poziomie naprężenia oraz największych przemieszczeniach, skorzystamy z funkcji **przecinania izo** (rys. 158 i rys. 159) pozwalającej na precyzyjne ustalenie analizowanej wartości oraz wyodrębnienie obszarów, gdzie zostały one przekroczone.



Rys. 158. Analiza numeryczna – rozkład naprężenia z wyodrębnieniem obszarów gdzie nastąpiło przekroczenie naprężenia powyżej 30 MPa

Fig. 158. Numerical analysis – stress distribution with the identification of areas where the stress exceeded 30 MPa

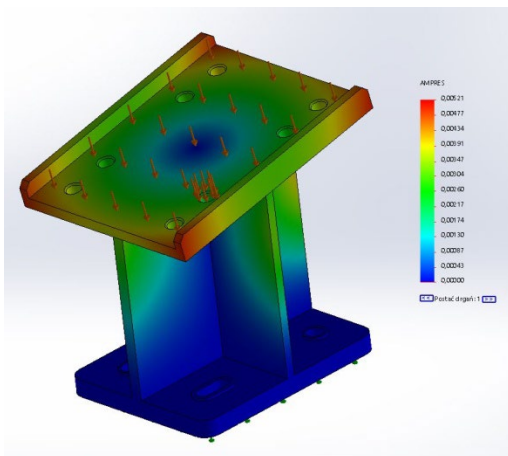


Rys. 159. Analiza numeryczna – rozkład przemieszczenia z wyodrębnieniem obszarów, gdzie nastąpiło przekroczenie przemieszczenia powyżej 0,12 mm

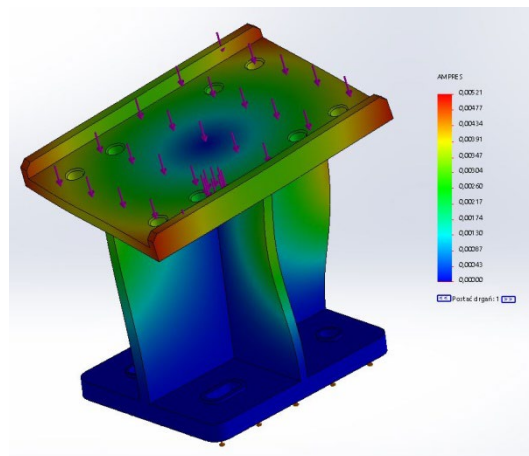
Fig. 159. Numerical analysis – displacement distribution with the identification of areas where the displacement exceeded 0.12 mm

D. Przeprowadzamy analizę wyboczenia. Ponieważ uchwyt jest elementem mocującym, istotny w analizie jest również poziom wyboczenia. Przeprowadzimy analizę wyboczeniową dla ustalonych wcześniej warunków zamocowania oraz obciążenia (rys. 160).

a.



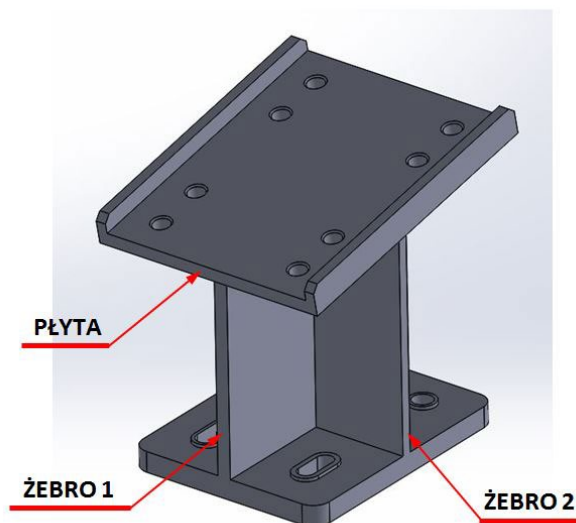
b.



Rys. 160. Analiza numeryczna – wyboczenie, amplituda wypadkowa: obraz (a), obraz w skali zwracającej uwagę na sposób „zdeformowania” (b)

Fig. 160. Numerical analysis – buckling, resultant amplitude: image (a), image on a scale that draws attention to the manner of „deformation” (b)

- E.** Dobór materiału. Jeżeli nie występują jakieś specjalne wytyczne odnośnie do charakteru pracy naszego uchwytu, zastosowany materiał stop aluminium 1060-H18 można zastąpić materiałem o znacznie niższej granicy plastyczności. Może to być np. stop aluminium 1060-H14. Wytrzymałość na rozciąganie 95 MPa, granica plastyczności 90 MPa – pozostałe właściwości jak 1060-H18.
- F.** Przeprowadzenie analizy wielowariantowej elementu uchwytu. W celu optymalizacji elementu uchwytu skorzystamy z analizy – Badanie projektu. Na początku postaramy się dokonać optymalizacji geometrii. W tym celu musimy określić, które wymiary będą miały możliwość modyfikacji, czyli będą zmiennymi w naszym projekcie. Ustalmy trzy zmienne: ŻEBRO 1, ŻEBRO 2 i PŁYTA (rys. 161). Dla każdej zmiennej musimy ustalić, w jaki sposób będzie przeprowadzana optymalizacja. W naszym przypadku zdefiniujemy zakres, w jakim będzie zmieniał się każdy z wymiarów, oraz krok, z jakim te zmiany będą następowały.



Rys. 161. Elementy uchwytu, które będą zmieniane w celu optymalizacji
Fig. 161. The elements of the handle that will be changed for optimization

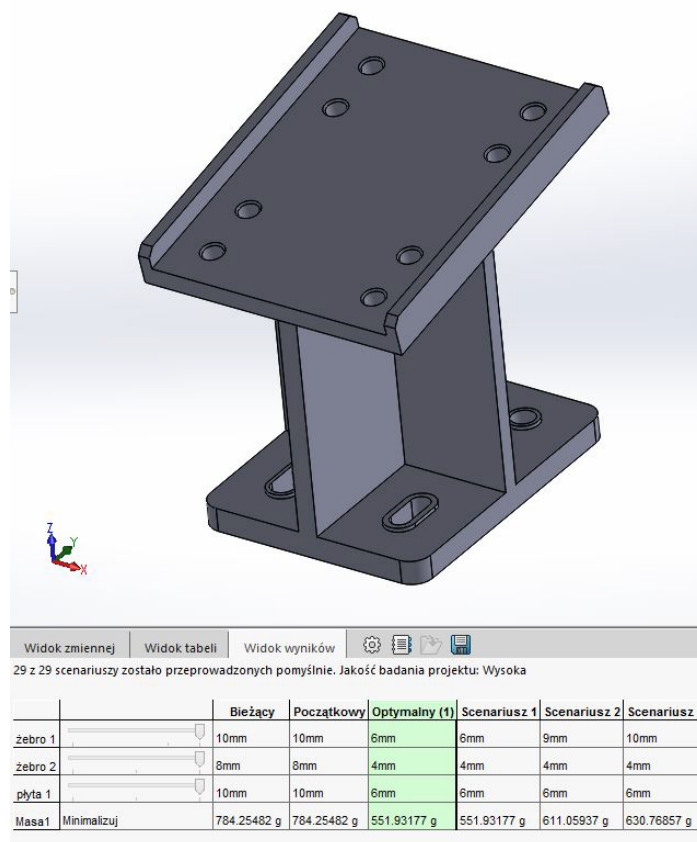
W tabeli 8 pokazano wartości zmiennych oraz zakresy zmian dla poszczególnych wymiarów.

Tabela przedstawiająca zakresy oraz kroki zmian dla poszczególnych wymiarów

Lp.	nazwa elementu	wymiar nominalny mm	wymiar min. mm	wymiar max. mm	krok mm
1	ŻEBRO 1	8	6	10	2
2	ŻEBRO 2	6	4	8	2
3	PŁYTA	8	6	10	2

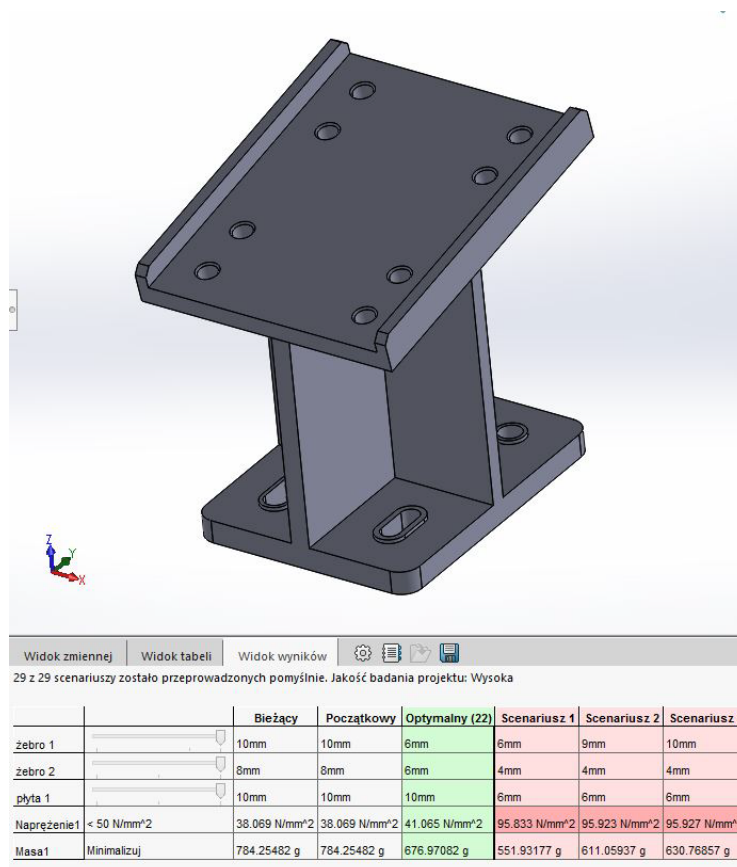
Następnie musimy ustalić kryterium, względem jakiego będzie przeprowadzana optymalizacja. Na początku ustalmy, że interesuje nas funkcja celu – minimalna masa naszego uchwytu. Dla tak zdefiniowanych parametrów będziemy rozpatrywali 27 scenariuszy.

Po przeprowadzeniu analizy optymalnym scenariuszem okazał się **Scenariusz 1** (rys. 162).



Rys. 162. Optymalizacja dla ustalonych warunków geometrycznych
Fig. 162. Optimization for certain geometric conditions

W kolejnym kroku wstawimy dodatkowe ograniczenie optymalizacyjne, a mianowicie naprężenia w naszym uchwycie nie mogą przekroczyć poziomu 50 MPa. Po przeprowadzeniu analizy widzimy, że przy sumowaniu dwóch ustalonych przez nas kryteriów optymalny okazuje się **Scenariusz 22** (rys. 163). Ustalając pierwsze kryterium, przeanalizowaliśmy wszystkie scenariusze, otrzymując wyniki dla każdego z wariantów. W kolejnym przypadku, narzucając ograniczenia co do maksymalnych naprężeń, widzimy, że tylko sześć scenariuszy (Scenariusze 22÷27) spełnia nasze wymagania. W pozostałych przypadkach nastąpiło przekroczenie poziomu naprężeń. Analizując głębiej nasz projekt, musielibyśmy prześledzić pozostałe scenariusze pod kątem obszarów, gdzie nastąpiło przekroczenie zdefiniowanej przez nas wielkości. Może zdarzyć się bowiem przypadek, że przekroczenie określonego poziomu naprężenia następuje w obszarze, który nie jest newralgiczny z punktu widzenia zastosowania lub warunków użytkowania naszego uchwytu.



Rys. 163. Optymalizacja dla ustalonych warunków geometrycznych w powiązaniu z poziomem naprężenia

Fig. 163. Optimization for fixed geometric conditions in relation to the stress level

G. Program SolidWorks daje nam również możliwość sporządzenia raportu z przeprowadzonych przez nas symulacji.

18. ANALIZA STANU NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA ELEMENTU KONSTRUKCYJNEGO – WSPORNIK

Cel główny ćwiczenia: celem ćwiczenia jest przeprowadzenie analizy naprężeniowo-odkształceniowej metodą elementów skończonych. Zoptymalizowanie geometrii elementu pod kątem przyjętego kryterium.

Cel pomocniczy ćwiczenia: doskonalenie umiejętności budowania prostych elementów konstrukcyjnych. Umiejętność doboru materiałów oraz analiza ich przydatności i możliwości wykorzystania. Ocena stanu obiektu poddanego zewnętrznym oddziaływaniom.

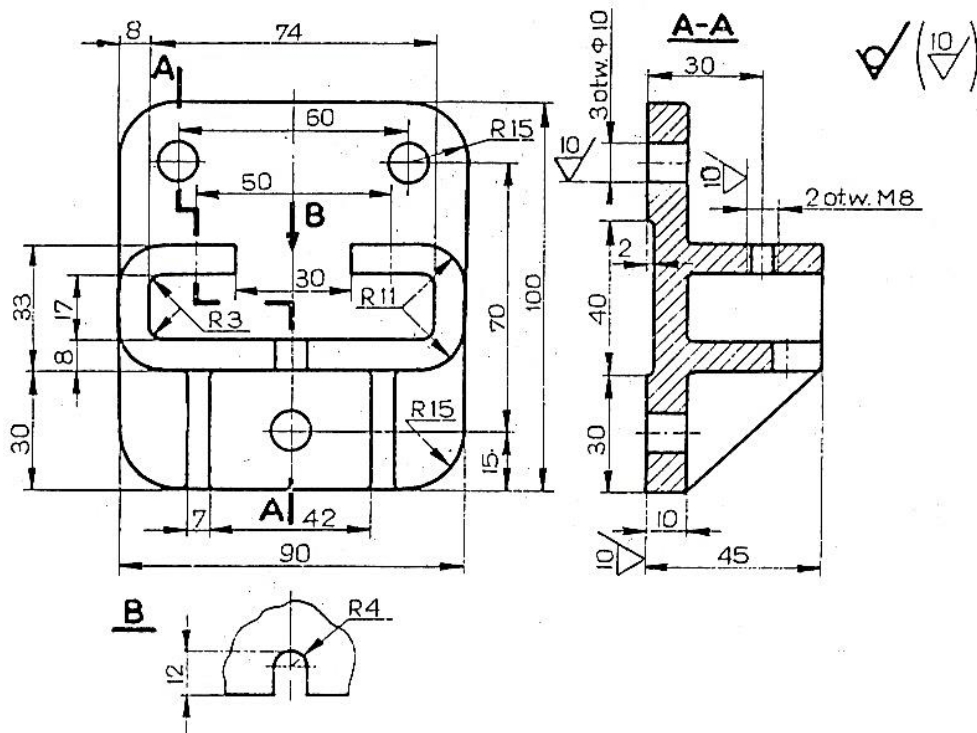
Zakres ćwiczenia:

- a) zbudowanie modelu wspornika według otrzymanej dokumentacji,
- b) przeprowadzenie analizy metodą elementów skończonych,
- c) przebudowa obiektu według narzuconych wytycznych,
- d) przeprowadzenie analizy MES i sprawdzenie poprawności rozkładu i wartości naprężenia,
- e) sporządzenie dokumentacji wykonawczej wspornika.

Wspornik jest elementem konstrukcyjnym pełniącym funkcję podpierającą. Jego głównym zadaniem jest podtrzymanie innego elementu konstrukcyjnego.

Przebieg zadania:

- a) zbudować model wspornika według poniższej dokumentacji (rys. 164),

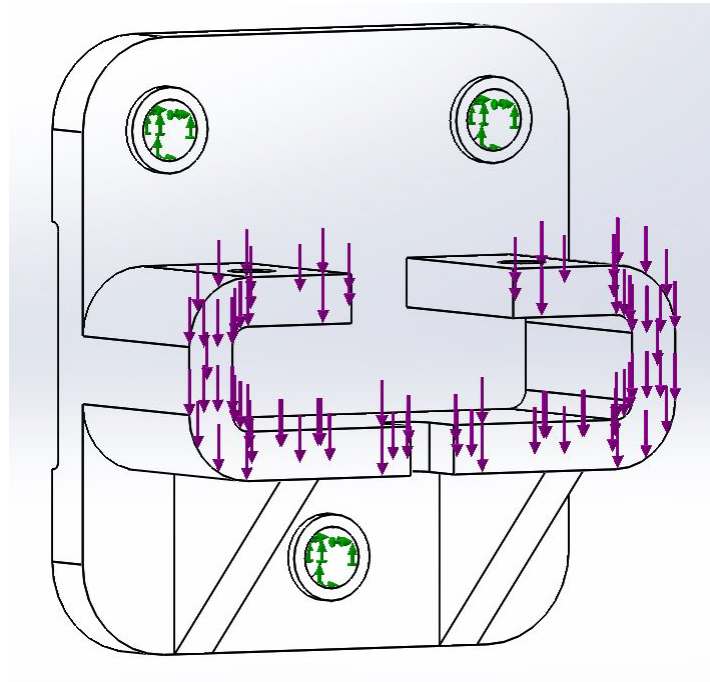


Rys. 164. Rysunek techniczny – wykonawczy wspornika [6]

Fig. 164. Technical drawing – working drawing of the bracket [6]

- b) dla zbudowanego obiektu przyjąć następujące założenia:
- c) materiał: stal konstrukcyjna o granicy plastyczności 170 ± 20 MPa,
- d) obiekt utwierdzić (podeprzeć), a następnie obciążyć siłą 6000 N,
- e) przeprowadzenie analizy numerycznej metodą elementów skończonych.

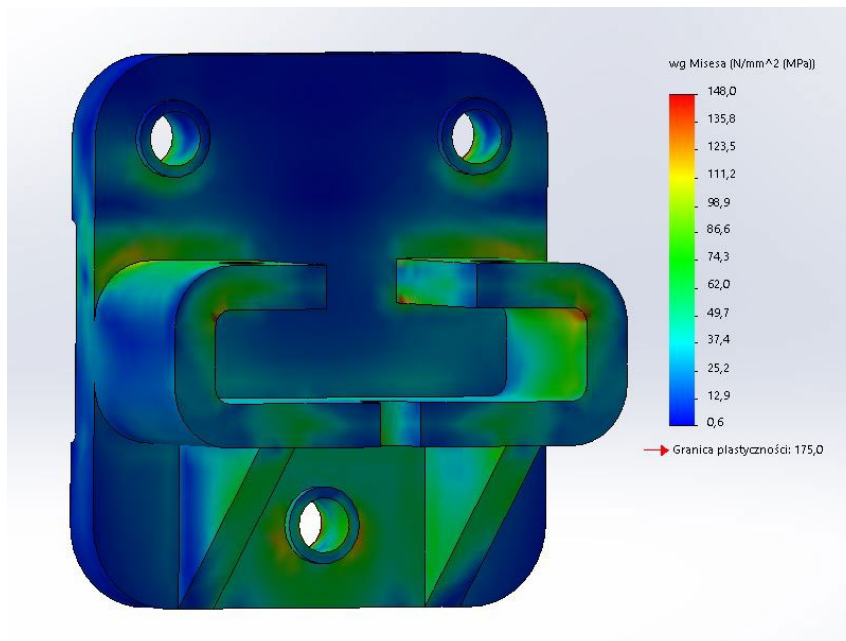
Warunki brzegowe oraz sposób obciążenia przyjąć według poniższego schematu: utwierdzenie nieruchome (odebranie wszystkich stopni swobody), siłę przyłożono na końcu półki pionowo w dół. Sposób utwierdzenia oraz przyłożenia obciążenia zewnętrznego przedstawiono na rys. 165.



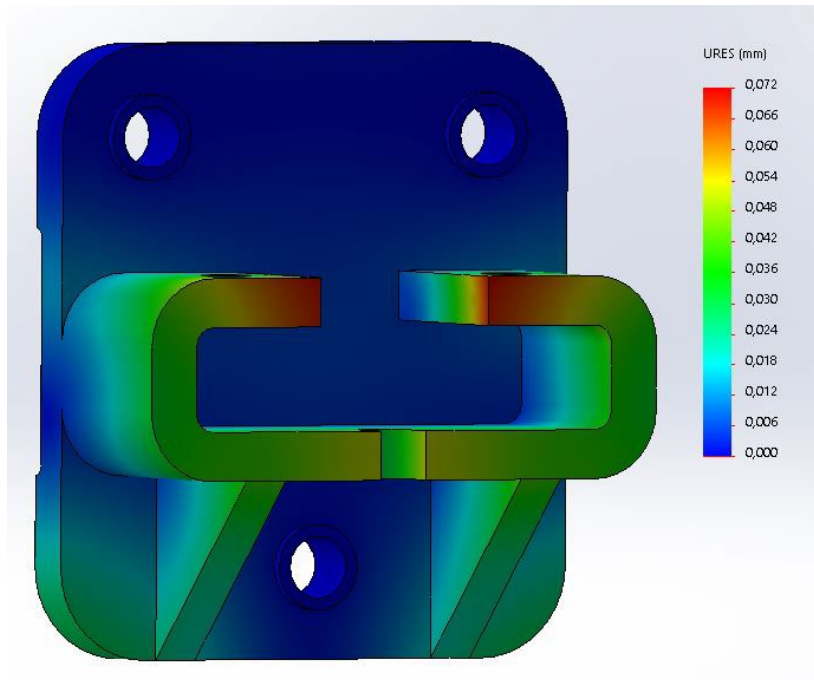
Rys. 165. Schemat utwierdzenia oraz obciążenia elementu wspornika
 Fig. 165. Diagram of restraint and load on the cantilever element

Przeprowadzenie analizy naprężeniowo-odkształceniowej.

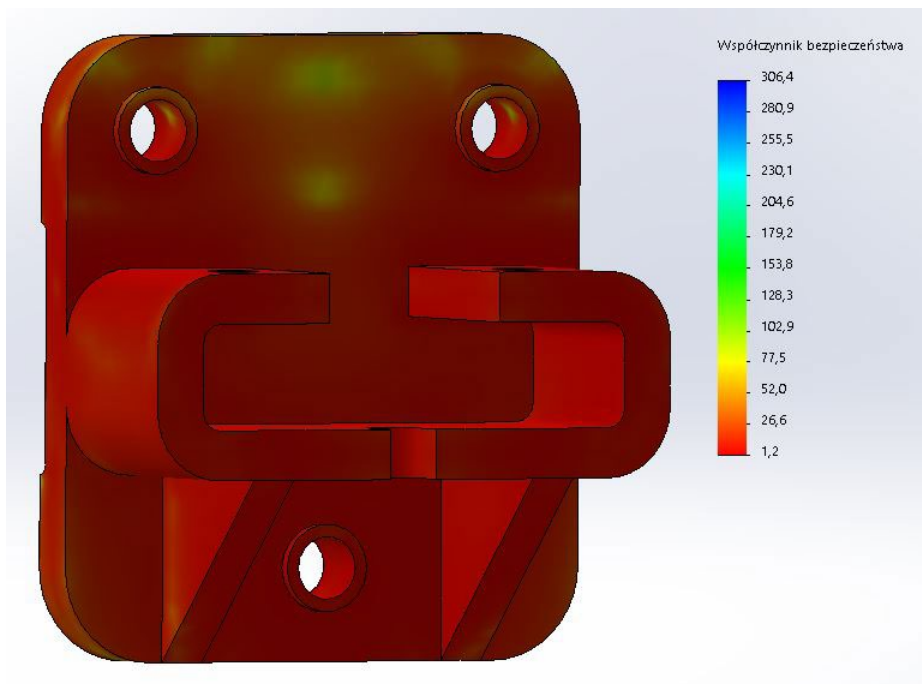
Na rys. 166–168 przedstawiono wyniki analiz numerycznych analizowanego wspornika.



Rys. 166. Analiza MES – rozkład naprężeń von Missesa
 Fig. 166. FEM analysis – stress distribution von Misses



Rys. 167. Analiza MES – rozkład przemieszczeń
 Fig. 167. FEM analysis – displacement distribution

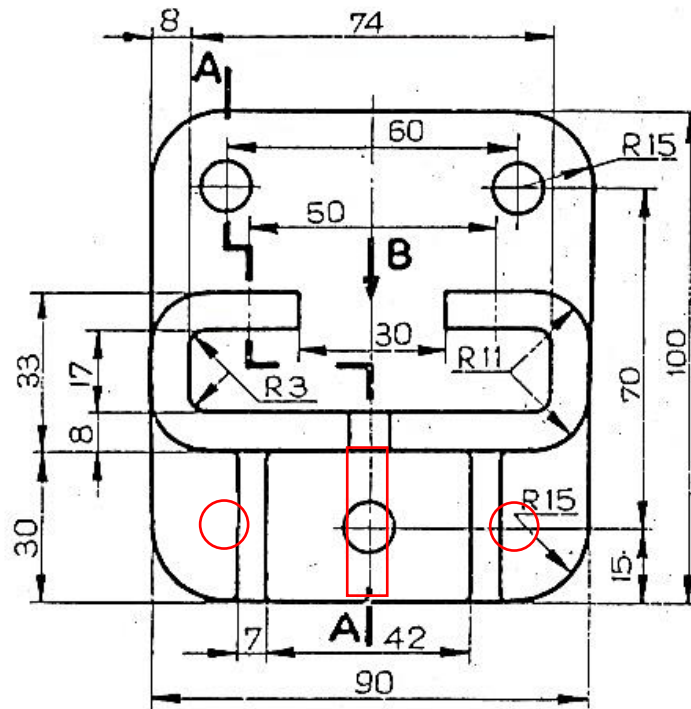


Rys. 168. Analiza MES – współczynnik bezpieczeństwa
 Fig. 168. FEM analysis – safety factor

f) ze względu na ograniczenia montażowe należy przekonstruować wspornik według poniższych wskazówek (rys. 169):

- nowy wspornik będzie montowany na czterech śrubach rozmieszczonych symetrycznie,

- z uwagi na nowe rozmieszczenie otworów mocujących należy zastosować jedno żebro usztywniające.



Rys. 169. Wytyczne dla nowej konstrukcji wspornika [6]
 Fig. 169. Guidelines for the new design of the bracket [6]

- dla nowej konstrukcji wspornika przeprowadzić ponownie analizę numeryczną MES, przeanalizować wartość oraz rozkład naprężeń. Za kryterium przyjąć brak możliwości przekroczenia poziomu granicy plastyczności (w zależności od zastosowanego materiału). Jeżeli to konieczne, dokonać zmiany geometrii wspornika, tak aby powyższy warunek był spełniony,
- przeprowadzić dyskusję na temat rozkładu naprężenia wspornika wyjściowego oraz po przebudowie – zwrócić uwagę na różnice,
- sporządzić dokumentację wykonawczą nowego rozwiązania konstrukcyjnego wspornika,
- sporządzić raport z badań dla dwóch analizowanych geometrii układu wspornika.

19. ANALIZA TERMICZNA OBIEKTU ZŁOŻONEGO – TARCZA HAMULCOWA

Cel główny ćwiczenia: celem ćwiczenia jest przeprowadzenie analizy termicznej metodą elementów skończonych. Wykazanie różnic w rozkładzie temperatury obiektu o zwartej geometrii (geometrii pełnej) oraz obiektu o dużym rozwinięciu powierzchni zewnętrznej.

Cel pomocniczy ćwiczenia: doskonalenie umiejętności budowy złożonego zespołu elementów oraz nadawania relacji. Nabycie umiejętności doboru parametrów w termicznej analizie obiektu.

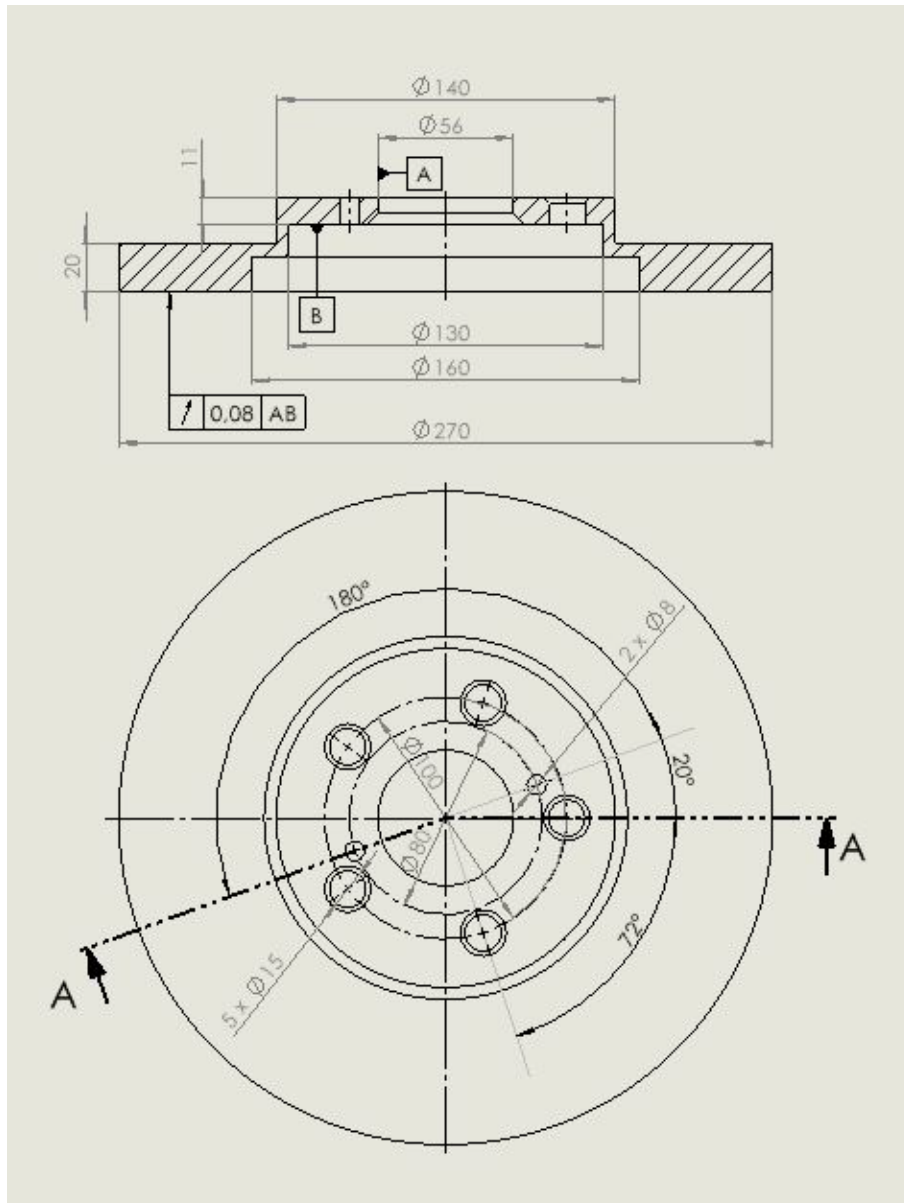
Zakres ćwiczenia:

- a) zbudowanie modelu złożonego tarczy hamulcowej według otrzymanej dokumentacji,
- b) przeprowadzenie analizy termicznej metodą elementów skończonych,
- c) przebudowa obiektu według narzuconych wytycznych,
- d) przeprowadzenie analizy termicznej MES nowego rozwiązania konstrukcyjnego tarczy hamulcowej,
- e) wykazanie różnic w rozkładzie temperatury dla poszczególnych analizowanych obiektów (tarcza pełna i tarcza wentylowana).

Tarcza hamulcowa jest zasadniczym elementem hamulca tarczowego. Najczęściej konwencjonalne tarcze hamulcowe wykonywane są z żeliwa, co zapewnia dobre zachowanie obiektu pod wpływem wysokich temperatur (niezmiennosc geometrii).

Przebieg ćwiczenia:

- a) zbudować model tarczy hamulcowej według poniższego rysunku (rys. 170). Ze względu na prawidłowość zadawania późniejszych obciążeń termicznych obiekt należy zbudować jako złożenie.

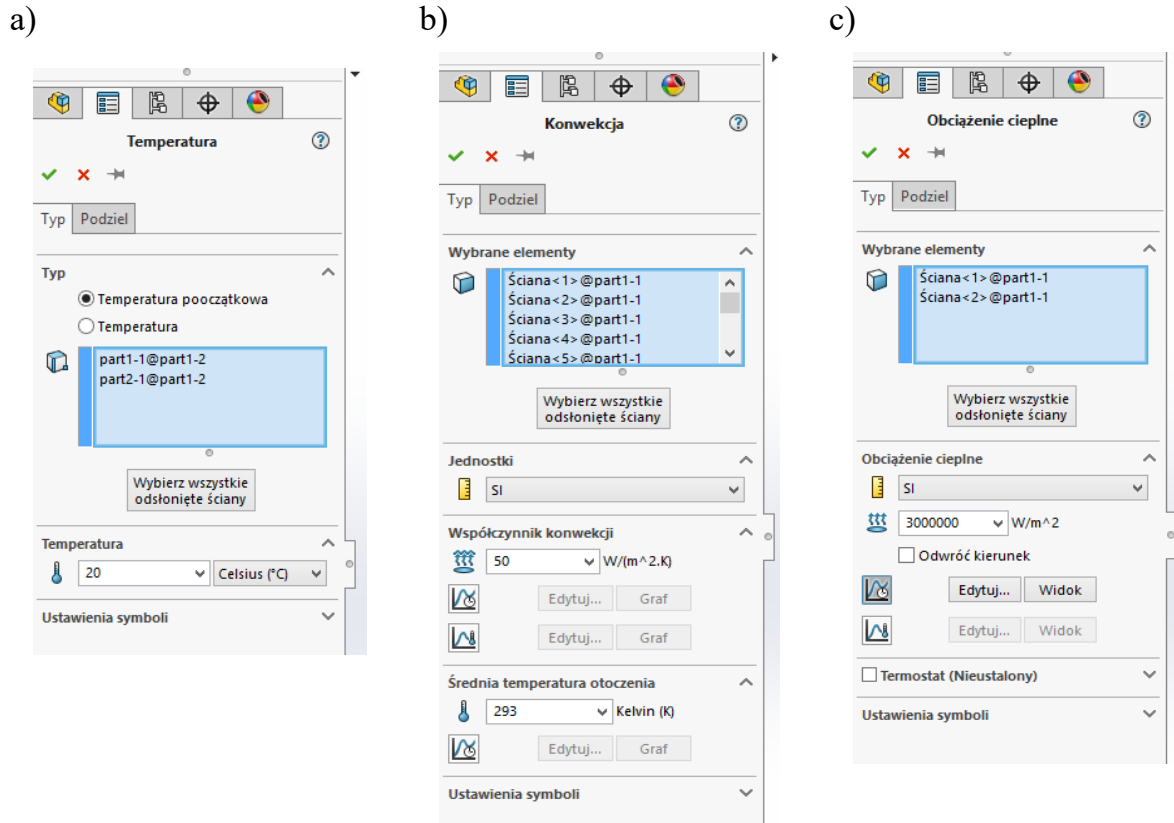


Rys. 170. Przykładowy rysunek tarczy hamulcowej
 Fig. 170. Example drawing of the brake disc

b) dla zbudowanego modelu tarczy hamulcowej przeprowadzić analizę termiczną, zakładając następujące rodzaje obciążeń:

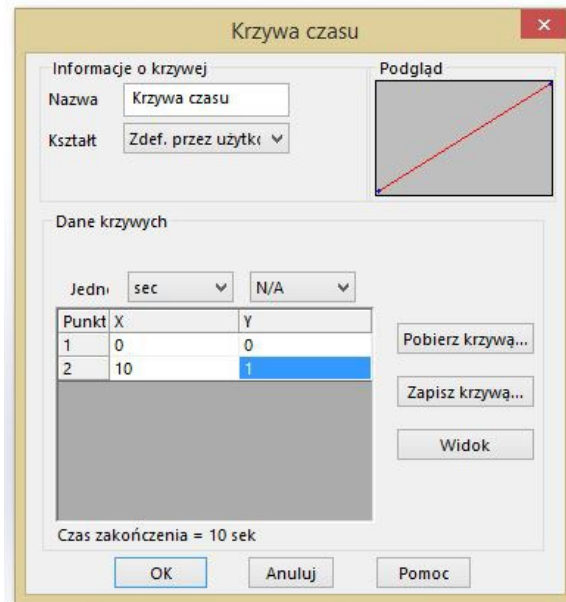
- temperatura początkowa 24°C,
- konwekcja na poziomie 50 W/(m²·K),
- obciążenie cieplne na poziomie 3 000 000 W/m²,

Analizę przeprowadzić dla stanu nieustalonego. Czas badania 10 s. Badania podstawowe wykonać dla liniowego monotonicznego narastania temperatury (rys. 171 i rys. 172). Dla przypadku bardziej zaawansowanego wprowadzić krzywą narastania temperatury.



Rys. 171. Obciążenia termiczne zastosowane w zadaniu: temperatura początkowa (a), konwekcja (b), i obciążenie cieplne (c)

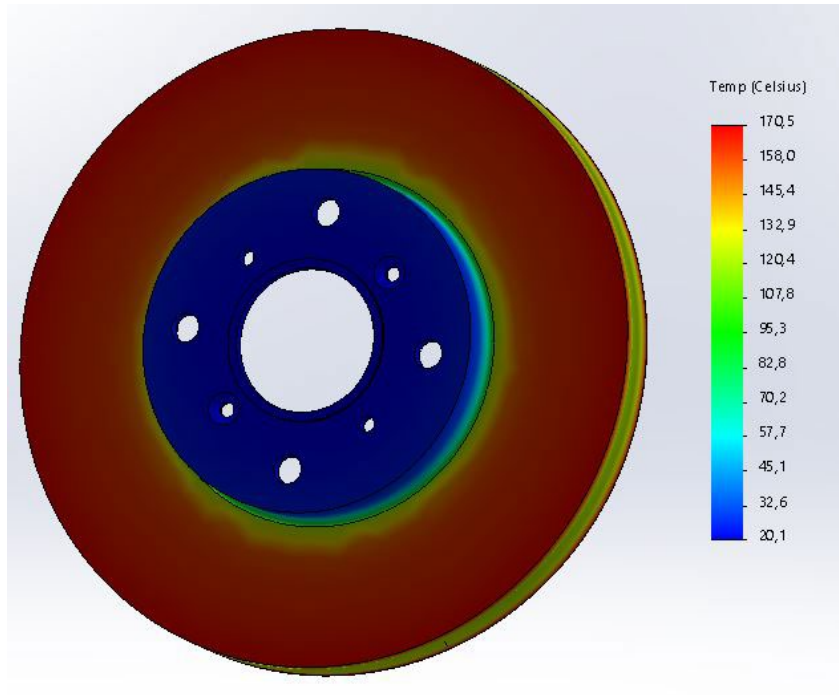
Fig. 171. Thermal loads used in the task: initial temperature (a), convection (b) and heat load (c)



Rys. 172. Parametry krzywej czasu dla obciążenia cieplnego, przyjętej w obliczeniach analizy termicznej

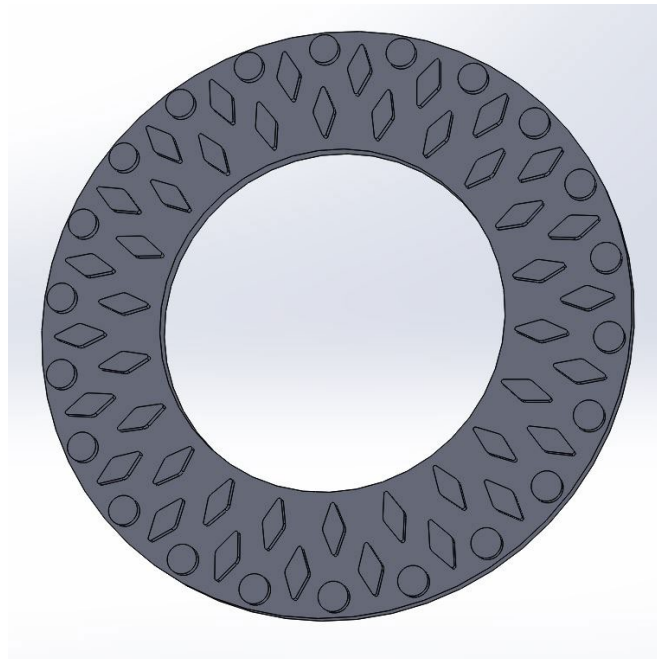
Fig. 172. Parameters of the time curve for the thermal load adopted in the calculation of the thermal analysis

Wyniki analizy termicznej przedstawiono na rys. 173.



Rys. 173. Przykładowy rozkład temperatury dla tarczy pełnej
Fig. 173. Exemplary temperature distribution for a full disc

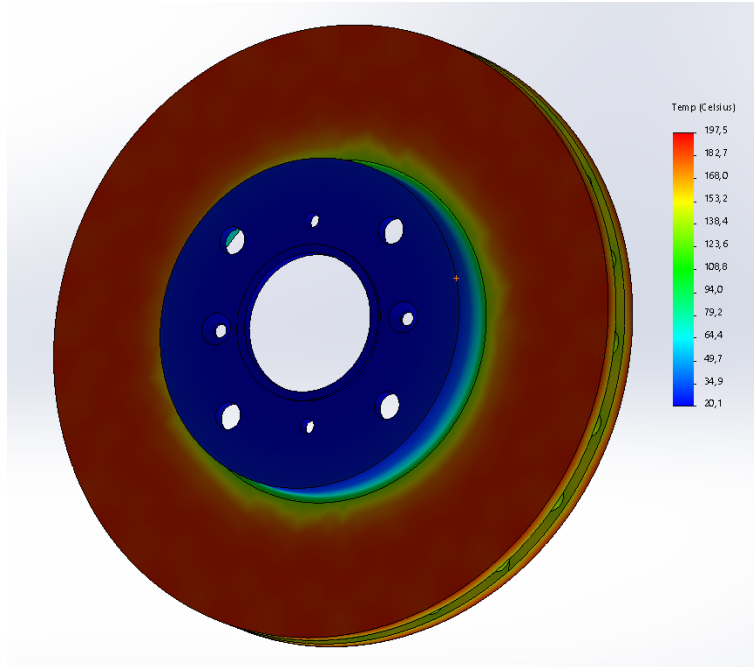
- c) przebudować model tarczy hamulcowej pełnej na tarczę wentylowaną (rys. 174). Zastosować własny model labiryntu wewnętrznego. Przyjąć założenie, że wzór powinien być powtarzalny ze względu na prawidłowość rozkładu temperatury.



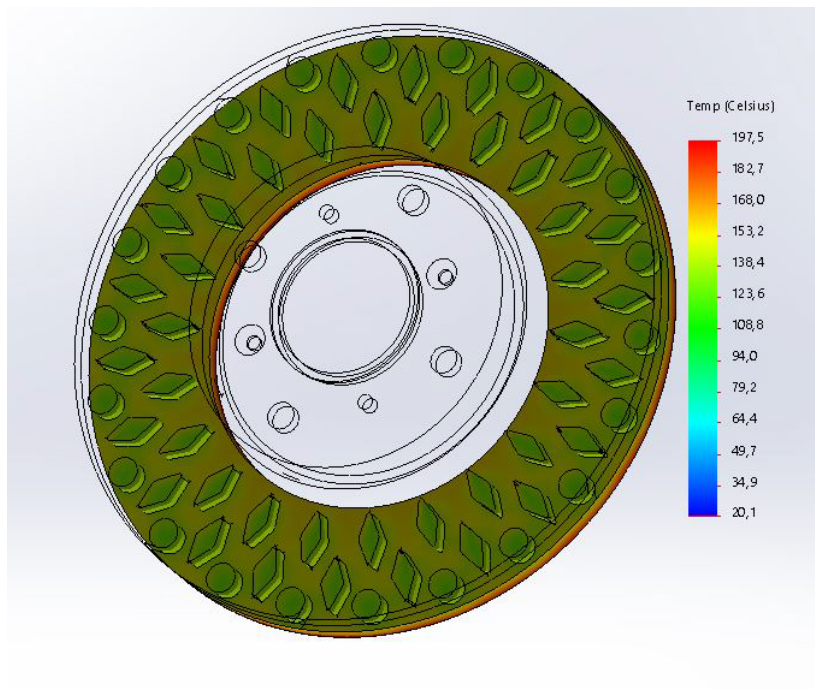
Rys. 174. Przykładowy labirynt tarczy wentylowanej
Fig. 174. An example of a ventilated disc labyrinth

- d) dla nowego modelu tarczy hamulcowej – wentylowanej przeprowadzić obliczenia analogiczne do tarczy pełnej. Zwrócić uwagę na rozkład i wartość temperatury dla analizowanego obiektu.

Wyniki uzyskane w analizie numerycznej przedstawiono na rys. 175 oraz rys. 176.



Rys. 175. Przykładowy rozkład temperatury dla tarczy wentylowanej
Fig. 175. Exemplary temperature distribution for a ventilated disc



Rys. 176. Przykładowy rozkład temperatury w labiryncie dla tarczy wentylowanej
Fig. 176. An example of temperature distribution in a labyrinth for a ventilated disc

20. WSTĘP DO SOLIDWORKS FLOWSIMULATION

Oprogramowanie SolidWorks zawiera wiele pakietów umożliwiających obliczenia procesów fizycznych. Większość zawartych jest w zakładce „Symulacje”. Odrębnym pakietem jest opisany poniżej, jako jedyny dostępny jest jedynie w języku angielskim.

Cel symulacji: poszukiwanie rozkładu prędkości płynu wzdłuż wielodrogowego kanału. Dodatkowo można pokazać rozkład temperatury płynu w przypadku wymienników ciepła.

Uwaga: Opisano przepływ cieczy. Jeśli symulowany jest przepływ gazów, to w „General settings” należy wybrać w wierszu „Gases” gazy przez wskazanie „Add”. Wtedy w warunkach brzegowych typu „Inlet...” lub „Outlet” będzie również wiersz „Concentrations”, gdzie należy podać udziały masowe lub objętościowe wybranych składników.

Uwaga: Wyboru cieczy innej niż woda (ta jest domyślna w szablonie „internal_water”) dokonuje się w „General settings”, należy wybrać w wierszu „Liquids” daną ciecz przez wskazanie „Add”.

W „General settings” należy uaktywnić „Heat conduction in solids”; jeśli badamy przepływ ciepła przez ściany, wówczas również należy wybrać materiał ściany w „General settings” w opcji „Solids”.

Kroki symulacji:

- Narysowanie modelowanego obiektu jako pojedynczej bryły lub kilku brył (obiektów bryłowych) – typowo jak SolidWorksie. NIE definiować materiału!
- Najczęściej (ze względu na obciążenie pamięci komputera) dodatek SolidWorks Flow Simulation nie jest aktywny – w grupie „Narzędzia” nie ma tego modułu.
- Jeśli nie ma, należy przejść do okienka „Opcje” (w górnym pasku programu), w „Dodatkach” uaktywnić i załadować moduł SolidWorks Flow Simulation – może to trwać kilkadziesiąt sekund.
- Pojawia się zakładka „Flow Simulation” na ekranie oraz w grupie „Narzędzia”.

- Uwaga: od tej pory opisy są po angielsku!
- Otworzyć „New”. Zatwierdzić.
- Program wyświetli komunikat, że należy stworzyć „pokrywy” Lids w otworach modelu, gdzie dopływa lub wypływa płyn albo styka się z otoczeniem. Potwierdzić.
- Zgodnie z opisem tego kroku („Create Lids”) należy wskazać płaską powierzchnię „otaczającą, najbliższą otworom przepływowym”. Program narysuje w tych miejscach pokrywy – „Lids”. Obiekty te pojawią się również w pierwotnym modelu, w wierszu „Obiekty bryłowe”!
- Należy teraz zdefiniować warunki brzegowe „Boundary conditions”. Prawym klawiszem wybrać opcję „Insert...”. Są 3 rodzaje warunków brzegowych (Type): „Flow openings” – dotyczy wlotów lub wylotów, dla których znane są strumienie masowe, objętościowe lub prędkość przepływu; „Pressure openings” – opisane ciśnieniem oraz „Walls” – ściany.

Warunki brzegowe

- Jeśli znane są warunki dopływu cieczy, wybiera się jeden z warunków: Inlet Mass Flow (strumień masowy w kg/s), Inlet Volume Flow (strumień objętościowy w m³/s) lub Inlet Velocity (prędkość przepływu w m/s). Zawsze należy wskazać utworzoną pokrywę. Zaznaczenie MUSI nastąpić od strony wewnętrznej pokrywy, tzn. tam, gdzie występuje płyn! W innym przypadku pojawia się komunikat błędu. Ponieważ bryła rurociągu zasłania pokrywę, należy wrócić, przejść do „Modelu” (tam, gdzie go rysowano), rozwinąć wiersz „Obiekty bryłowe”, prawym klawiszem myszy „Ukryć” rzeczywisty model! Jeśli znane są warunki dotyczące jakiegoś wylotu – definiuje się odpowiednio Outlet Mass Flow (strumień masowy w kg/s), Outlet Volume Flow (strumień objętościowy w m³/s) lub Outlet Velocity (prędkość przepływu w m/s). Należy podać temperaturę płynu w wierszu „Thermodynamics parameters”, chyba że obliczenia dotyczą jedynie przepływu, bez zmiany wymiany ciepła z otoczeniem.
- Pozostałe, nieznanne co do parametrów przepływowych wyloty (lub wloty), tam, gdzie poszukuje się rozwiązania, definiuje się przez podanie panującego tam ciśnienia – „Pressure openings”. Jeśli nie są znane warunki rzeczywiste, można wybrać „Environment pressure”. Oznacza to, że płyn wypłynie do otoczenia.

- Definiowanie warunków ścian zewnętrznych modelu odbywa się trzecim sposobem „Walls”. Najczęściej wybiera się konwekcję do otoczenia, czyli „Heat transfer coefficient” – podając współczynnik wnikania ciepła „alfa”, np. $20 \text{ W/m}^2\text{K}$, oraz temperaturę otoczenia („Ambient temperature”), np. 25°C (298 K).
- Uruchamianie obliczeń następuje przyciskiem „Run”. Następuje zapytanie o warunki obliczeń: czy nowe, czy kontynuacja. Potwierdzić, że „New”.
- Pojawia się w dolnym pasku dodatkowe okienko. Po otwarciu widać informację o przebiegu obliczeń, ostrzeżeniach lub błędach. Jeśli obliczenia są poprawne, po zakończeniu pojawi się komunikat „Solver is finished”.
- Wyniki ogląda się w wierszu „Results”. Po rozwinięciu wiersza należy obejrzeć wykresy w „Cut Plots” oraz „Flow Trajectories”.
- Aby obejrzeć wykres (kolorową warstwicę) zmian wybranej wielkości, np. temperatury płynu, wybiera się „Cut Plots”, a potem prawy klawisz „Insert...”. Następnie należy wskazać płaszczyznę, na której będzie pokazana poszukiwana wielkość fizyczna (temperatura, prędkość, ciśnienie). Można wskazać płaszczyznę z zakładki „Model”, np. przednia, górna, prawa.
- Jeśli chcemy obserwować tor ruchu płynu, należy wybrać „Flow Trajectories” i prawym klawiszem „Insert...”. Następnie należy wskazać, skąd rozpocznie się rysowanie poszukiwanego toru. Najczęściej wskazujemy wlot do obiektu, czyli jakiś „Inlet...”, czyli pokrywa „Lid”. Należy pamiętać, aby wskazać powierzchnię pokrywy od strony płynu! Następnie wybrać rodzaj pokazania torów: statyczny („Static”) – narysowane w bezruchu, czy dynamiczny („Dynamic”) – gdzie działa animacja. Dodatkowo należy wybrać, według jakiej wielkości fizycznej, np. prędkości, będą kolorowane przedstawione tory ruchu.

21. OBLICZENIA CIEPLNO-PRZEPLYWOWE WYMIENNIKA CIEPŁA

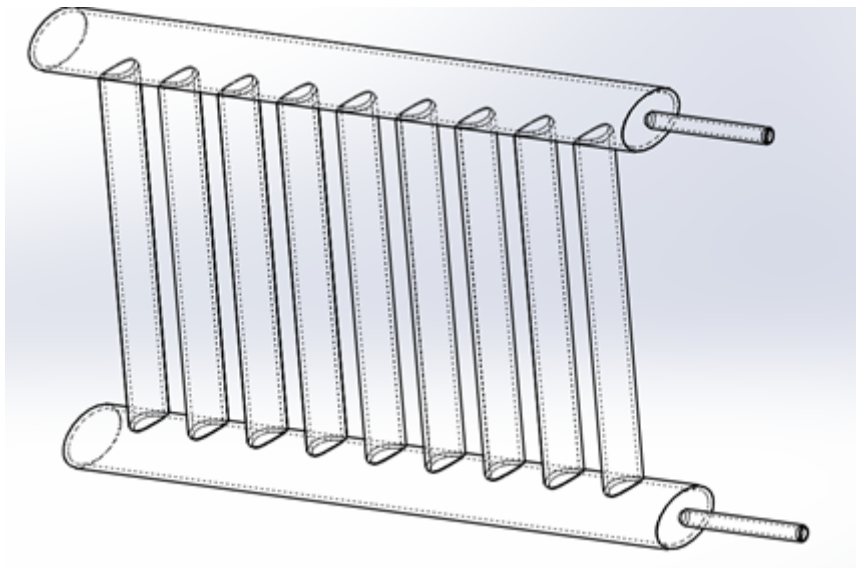
W tym ćwiczeniu narysowany zostanie model tradycyjnego kaloryfera żeberkowego (rys. 177). Następnie wykonane zostaną obliczenia cieplne i przepływowe.

Cel główny ćwiczenia: poszukiwanie rozkładu prędkości płynu wzdłuż wielodrogowego kanału wraz z rozkładem temperatury płynu oraz ścian grzejnika.

Cel pomocniczy ćwiczenia: zapoznanie się z warunkami brzegowymi stosowanymi w symulacjach przepływowych i cieplnych.

Wiadomości z innych dziedzin nauki pomocne przy wykonaniu tego zadania: fizyka – zagadnienia cieplne (jednostki, rodzaje przepływu ciepła).

Model kaloryfera



Rys. 177. Model kaloryfera
Fig. 177. Model of radiator

Założenia do rysunku:

- Rura górna i dolna mają przekrój eliptyczny o średnicach ($D_z/d_z - D_w/d_w$): 150/80 i 140/70 (grubość ścianki 5 mm). Długość zewnętrzna 1 m.
- Rozstaw osi rur górnej i dolnej to 60 cm.

- Do rur górnej i dolnej po jednej stronie dołączone są rurki wlotu i wylotu.
- Rurki wlotu i wylotu są okrągłe o wymiarze (średnica zewnętrzna x grubość ścianki) 22 x 2 mm. Długość rurek to 20 cm.
- Rury pionowe mają przekrój eliptyczny o średnicach ($D_z/d_z - D_w/d_w$): 80/40 i 70/30 (grubość ścianki 5 mm). Rozstaw rur 100 mm. Rur jest 9 sztuk.

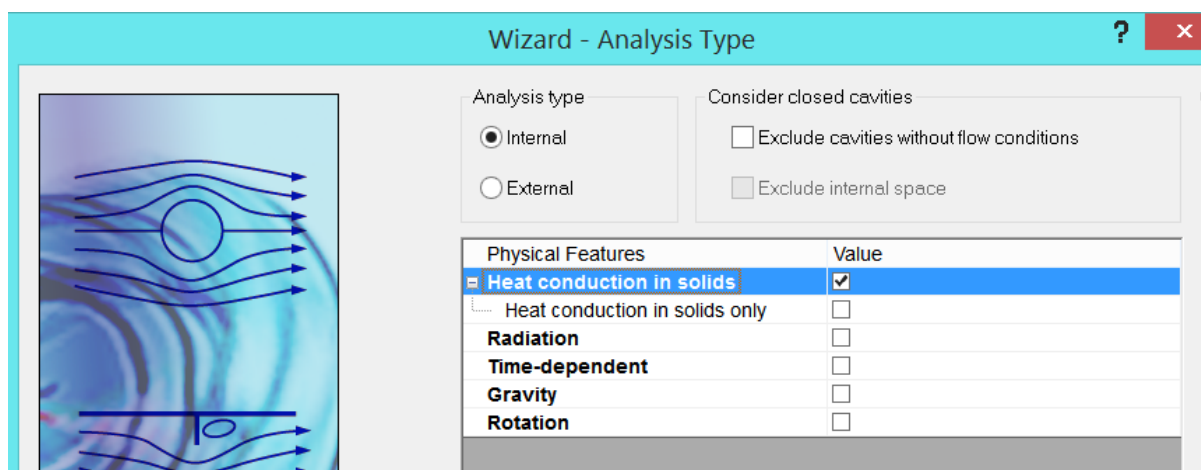
Uwaga! Poleca się:

- ze względu na symetrię rysować połowę górną lub dolną kaloryfera;
- wyciąganie dodania i wyciąganie wycięcia z odsunięciem – do rur górnej i dolnej;
- wyciągnięcie do powierzchni – w przypadku rur pionowych, wtedy ich powierzchnia będzie przylegała do powierzchni rur górnej lub dolnej;
- opcję szyku liniowego dla rur pionowych;
- opcję lustra.

Uwaga! Możliwe jest również wykorzystanie opcji „Skorupa”, co znacznie ułatwia rysowanie modelu. Jednak ze względów dydaktycznych lepsze jest przedstawione podejście, gdyż jest bardziej uniwersalne. Opcję „Skorupy” można stosować, gdy grubość ścianki jest jednakowa.

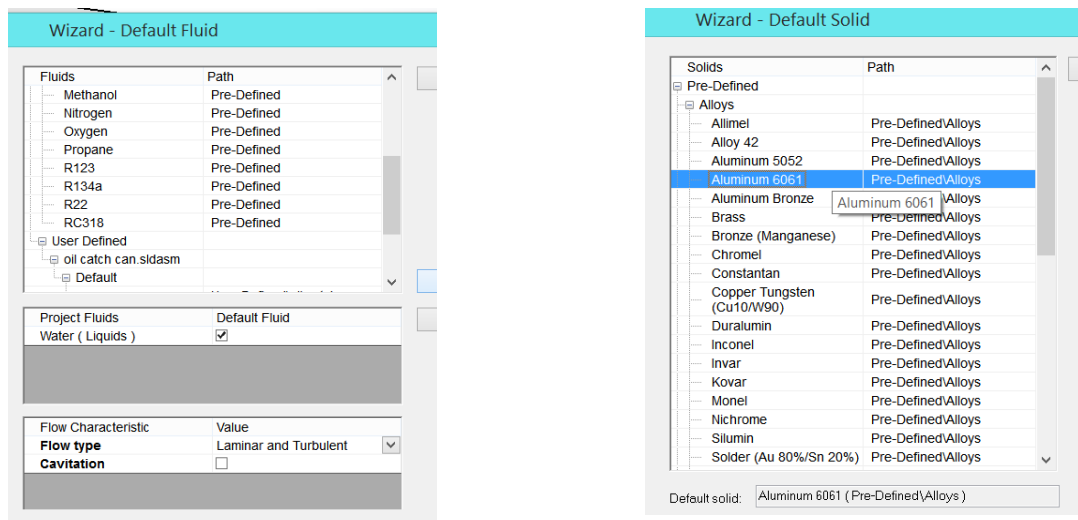
Analiza przepływowa

1. Załadować symulację według przedstawionych we wstępie do analizy przepływowej wskazówek (rozdział 20) (rys. 178).

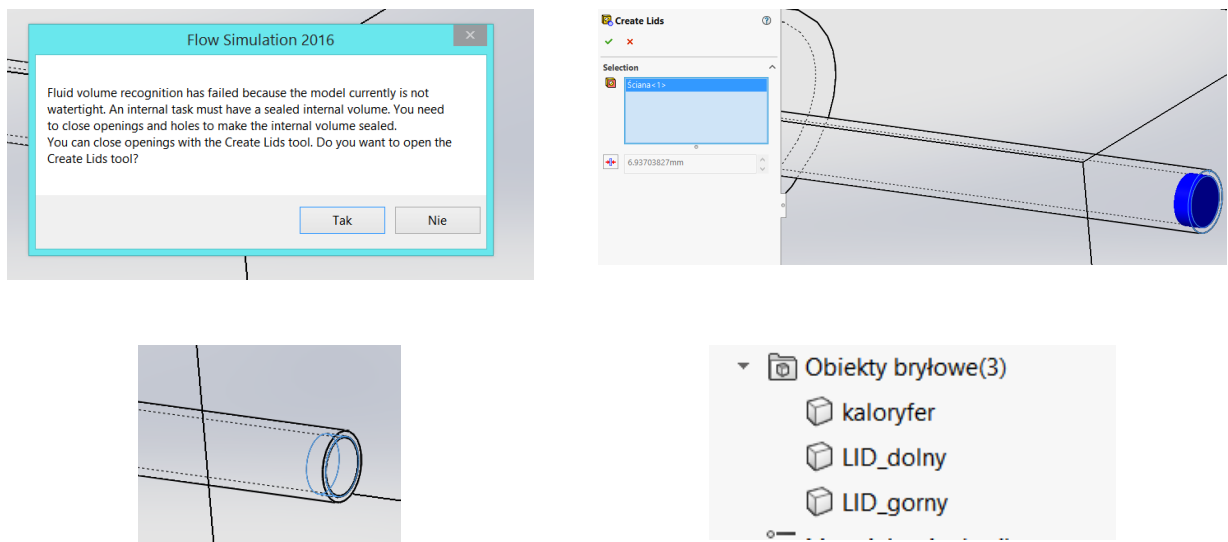


Rys. 178. Zdefiniowanie rodzaju i zakresu symulacji
Fig. 178. Definition of analysis type and scope

- Wybrać wodę jako materiał płynu oraz stop aluminium jako materiał ściany grzejnika (rys. 179).
- Program wyświetli komunikat (rys. 180), że należy stworzyć „pokrywy” Lids w otworach modelu, gdzie dopływa albo wypływa płyn lub styka się z otoczeniem. Zatwierdzić.
- Zgodnie z opisem tego kroku („Create Lids”) należy wskazać powierzchnię płaską, otaczającą zdefiniowany otwór przepływowy. Program narysuje w tych miejscach pokrywy – „Lids”. Obiekty te pojawią się również w pierwotnym modelu, w wierszu „Obiekty bryłowe”!

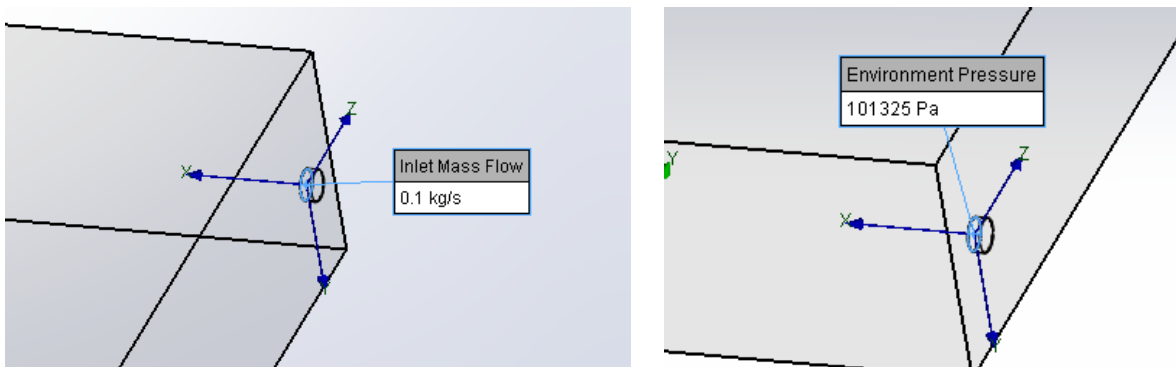
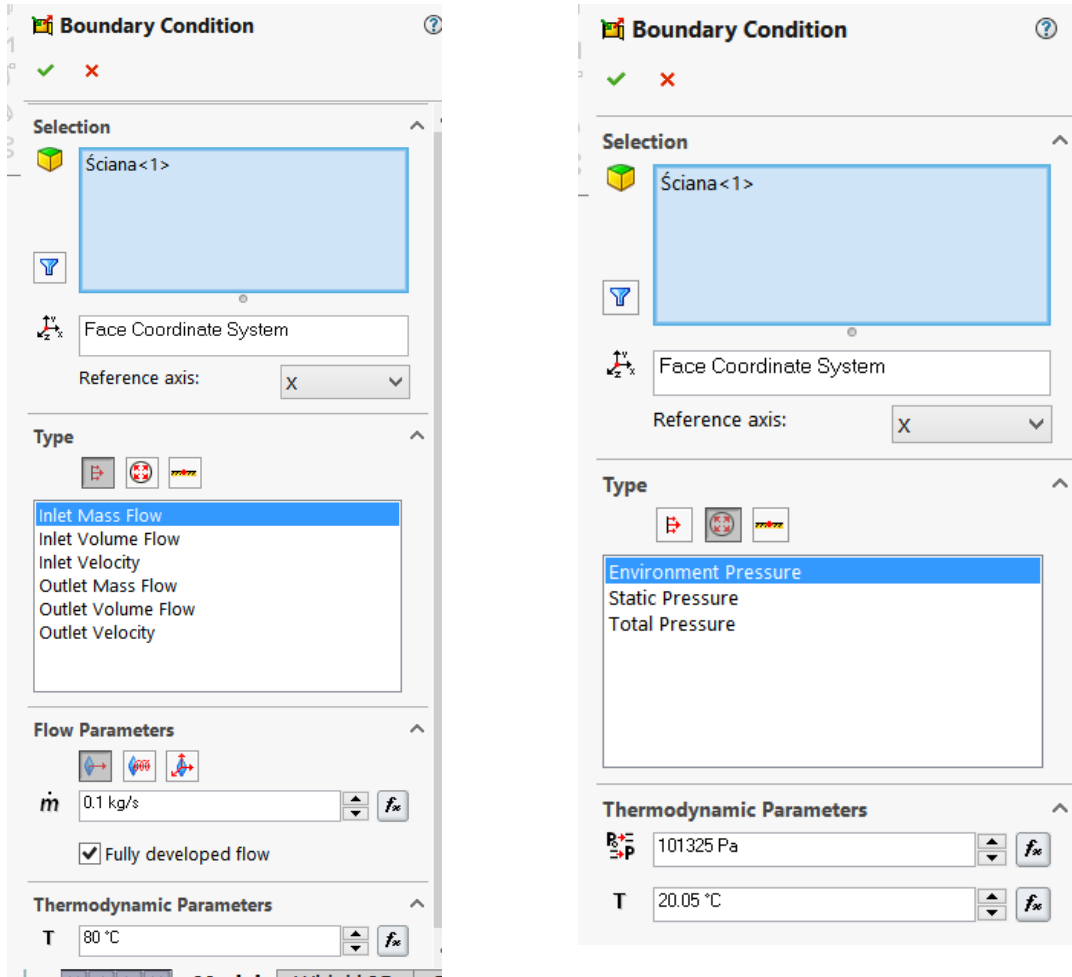


Rys. 179. Wybór płynu i ciała stałego do przygotowywanej symulacji
Fig. 179. Selection of fluid and solid for simulation setup



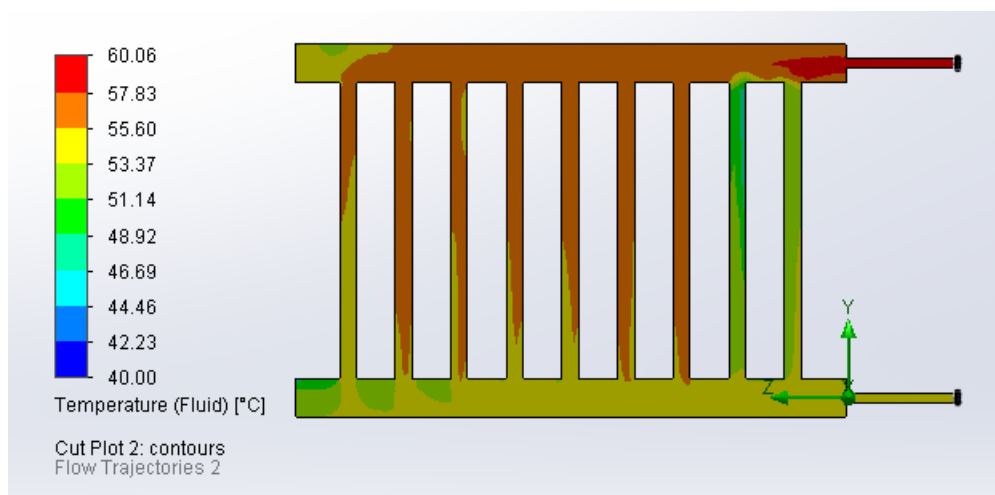
Rys. 180. Komunikat o konieczności zamknięcia obiektu, tworzenie pokryw w górnym i dolnym odcinku rurowym, ostateczny efekt pojawienia się obiektów „Lids” (wprowadzono własne nazwy, domyślnie będzie Lid(numer))
Fig. 180. Message of necessity to close model openings, creating lids at top and bottom pipes, finally „Lids” are created (exemplary names are shown, default is Lid(number))

5. Należy teraz zdefiniować warunki brzegowe „Boundary conditions” (rys. 181). Najpierw wskazać dopływ wody – w tym przypadku rurką górną. Prawym klawiszem myszy wybrać opcję „Insert...”. W przypadku tej symulacji ustawić: Inlet Mass Flow (strumień masy 0,1 kg/s, temperatura 80°C, zaznaczyć opcję „Fully developed flow”).



Rys. 181. Definicja warunków brzegowych wlotu (lewo) i wylotu (prawo) kaloryfera
 Fig. 181. Boundary conditions defined for inlet (left) and outlet (right) of radiator

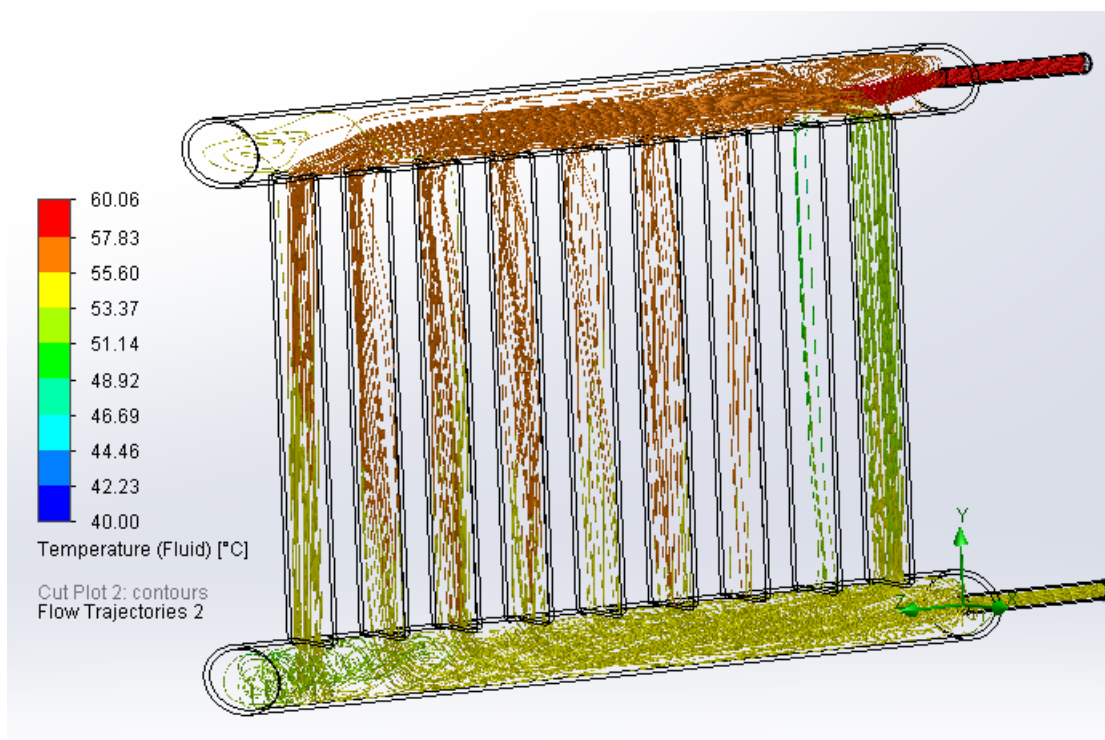
6. Rurka dolna zostaje opisana przez podanie panującego tam ciśnienia – „Pressure openings”. Jeśli nie są znane warunki rzeczywiste, można wybrać „Environment pressure”. Oznacza to, że płyn wypłynie do otoczenia.
7. Definiowanie warunków ścian zewnętrznych modelu odbywa się trzecim sposobem „Walls”. Najczęściej wybiera się konwekcję do otoczenia, czyli „Heat transfer coefficient” – podając współczynnik wnikania ciepła alfa, np. $20 \text{ W/m}^2\text{K}$, oraz temperaturę otoczenia („Ambient temperature”), np. 25°C (298 K).
8. Uruchamianie obliczeń następuje przyciskiem „Run”. Obserwować przebieg obliczeń. Jeśli obliczenia są poprawne, po zakończeniu pojawi się komunikat „Solver is finished”.
9. Wyniki ogląda się w wierszu „Results”. Po rozwinięciu wiersza najciekawsze należy obejrzeć w „Cut Plots” oraz „Flow Trajectories”.
10. Aby obejrzeć kolorową mapę (wykres) zmian wybranej wielkości, np. temperatury płynu (rys. 182), wybiera się „Cut Plots”, a potem prawy klawisz „Insert...”. Następnie należy wskazać płaszczyznę, na której będzie pokazana poszukiwana temperatura płynu. Można wskazać płaszczyzny z zakładki „Model”, np. przednia, górna, prawa.



Rys. 182. Warstwica zmiany temperatury wody w grzejniku
 Fig. 182. Change of water temperature inside radiator

11. Aby obserwować tor ruchu płynu, należy wybrać „Flow Trajectories” (rys. 183) i prawym klawiszem „Insert...”. Następnie należy wskazać, skąd rozpocznie się rysowanie poszukiwanego toru. Najczęściej wskazujemy wlot do obiektu, czyli jakiś „Inlet...”, czyli korek „Lid”. Należy pamiętać, aby wskazać powierzchnię korka od strony płynu! Następnie wybrać rodzaj pokazania torów:

statyczny („Static”) – narysowane w bezruchu, czy dynamiczny („Dynamic”) – gdzie działa animacja. Dodatkowo należy wybrać, według jakiej wielkości fizycznej, np. prędkości, będą kolorowane przedstawione tory ruchu.



Rys. 183. Tory ruchu strug wody w grzejniku
Fig. 183. Trajectories of water inside radiator

Analiza wyników

Proponuje się znaleźć następujące wielkości:

- temperatura wody wylotowej $\sim 54^{\circ}\text{C}$; oznacza spadek temperatury o 6 K;
- prędkość wody na wlocie $\sim 0,42$ m/s;
- strumień ciepła oddany przez wodę w kaloryferze, tzn. moc grzewcza wymiennika ciepła $\sim 2,6$ kW – obliczona jako różnica „Total enthalpy rate” [9] pomiędzy wlotem a wylotem, np. $140,4 - 137,8 = 2,6$ kW.

BIBLIOGRAFIA

1. Bernhardt M., Dobrzyński S., Loth E.: Silniki samochodowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1988.
2. Dobrzański T.: Rysunek techniczny maszynowy. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2021.
3. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z.: Wytrzymałość materiałów. WNT, Warszawa 1996.
4. Filipowicz A., Kowal A., Kuczaj M.: Rysunek techniczny. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016.
5. Leyko J., Szmelter J.: Zbiór zadań z mechaniki ogólnej. PWN, Warszawa 1995.
6. Loska J.: Zbiór zadań ćwiczeniowych z rysunku technicznego. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1982.
7. Misiak J.: Mechanika techniczna. Statyka i wytrzymałość materiałów, tom 1, PWN, Warszawa 2003.
8. Okrajni J.: Podstawy mechaniki technicznej dla materiałoznawców. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
9. Żybertowicz M., Bogucki W.: Tablice do projektowania konstrukcji metalowych. Arkady, Warszawa 1984.
10. www.pkm.edu.pl.
11. Wielki słownik języka polskiego PWN. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018.

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE W MODELOWANIU I OBLICZENIACH INŻYNIERSKICH Z WYKORZYSTANIEM OPROGRAMOWANIA SOLIDWORKS

Streszczenie

Monografia zawiera 21 rozdziałów. W pierwszej części omawiane są podstawy wykorzystania oprogramowania do tworzenia modeli 3D CAD części maszyn. W drugiej pokazano tworzenie dokumentacji 2D technicznej tych części, jak również wykorzystanie tworzonych modeli geometrycznych do obliczeń belek oraz analizy zjawisk fizycznych na przykładzie nagrzewania się tarczy hamulcowej, obciążenia konstrukcji wspornika, konstrukcji koła zębatego, a także tworzenia wariantowej konstrukcji śruby. W trzeciej części przedstawiono przykłady złożenia nieruchomych, przenikających się elementów oraz ruchomych, takich jak wahadło fizyczne, mechanizm korbowo-wodzikowy, przekładnia planetarna, a także trzycylindrowej maszyny tłokowej. Dodano również rozdziały dotyczące zarysu symulacji cieplno-przepływowych modułem FlowSimulation. Jako przykład wybrano wymiennik ciepła typu kaloryfer.

COMPUTER AIDED DESIGN AND ENGINEERING CALCULATIONS USING SOLIDWORKS SOFTWARE

Abstract

The monography contains 21 chapters. The first part discusses the basics of using software to create 3D CAD models of machine parts.

The second part shows the creation of 2D technical documentation of these parts, as well as the use of created geometric models for beam calculations, and the analysis of physical phenomena on the example of brake disc heating, support structure loading, gear wheel construction, and creating a variant screw structure. The third part presents examples of assembling fixed, interpenetrating elements and movable ones, such as a physical pendulum, a crosshead crank mechanism, a planetary gear, and a three-cylinder piston machine. Chapters on the outline of thermal-flow simulations with the FlowSimulation module have also been added. A radiator type heat exchanger was chosen as an example.

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice
tel. (32) 237-13-81
wydawnictwo@polsl.pl
www.wydawnictwopolitechniki.pl

UIW 48600

Sprzedaż i Marketing
tel. (32) 237-18-48
wydawnictwo_mark@polsl.pl

Ark. wyd. 10,55

e-wydanie
Monografia 986

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 5
tel. (32) 237-13-81
www.wydawnictwo.politechniki.pl

Dział Sprzedaży i Reklamy
tel. (32) 237-18-48

e-mail: wydawnictwo_mark@polsl.pl
<http://www.polsl.pl/Jednostki/RJO2-WPS>

ISBN 978-83-7880-904-3