

## Лабораторна робота № 2

### З'єднувачі в SolidWorks Simulation та імітація зусилля затягування нарізі

**Мета роботи:** *відпрацювати підходи до імітації зусилля затягування нарізі в SolidWorks Simulation без використання віртуальних болтових з'єднувачів.*

#### **Порядок виконання:**

#### **1. Ознайомлення з теоретичними відомостями**

1.1. Ізотропні та ортотропні матеріали.

1.2. Постановка проблеми. Кріпильні елементи SolidWorks та штучне підвищення жорсткості системи при дії згинальних навантажень на болтові з'єднання.

#### **2. Дослідження температурного розширення ортотропної вставки.**

2.1. Формування нового матеріалу в базі матеріалів. Призначення матеріалу деталі.

2.2. Виконання статичного аналізу термопружної вставки

#### **3. Статичний аналіз збірки з віртуальним болтовим з'єднанням.**

3.1. Створення збірки

3.2. Створення статичного дослідження. Призначення матеріалів і граничних умов. Призначення болтових з'єднань.

3.3. Запуск дослідження. Оцінка результатів дослідження. Визначення сили контакту

#### **4. Статичний аналіз збірки з «реальним» болтовим з'єднанням.**

4.1. Створення збірки. Створення статичного дослідження. Призначення матеріалів і граничних умов. Призначення навантаження.

4.2. Запуск дослідження. Оцінка результатів дослідження. Порівняння результатів переміщення та напруження в збірці з віртуальним болтом та «реальним»

# 1. ОЗНАЙОМЛЕННЯ З ТЕОРЕТИЧНИМИ ВІДОМОСТЯМИ

## 1.1. Ізотропні та ортотропні властивості матеріалів

### Ізотропні матеріали

Матеріал вважається ізотропним, якщо його властивості (термічні, механічні) однакові уздовж всіх напрямків. Ізотропні матеріали можуть мати гомогенну або негомогенну мікроструктуру [1]. Наприклад, сталь має ізотропні властивості (властивості сталевих виробів після обробки тиском потребують окремого розгляду), незважаючи на негомогенну мікроструктуру [1].

### Ортотропні матеріали

Ортотропні матеріали мають властивості, що різняться уздовж трьох взаємно-ортогональних осей оберткової симетрії. Вони є підмножиною анізотропічних матеріалів, оскільки їх властивості змінюються зі зміною напрямку [2].

Ортотропними матеріалами є дерево, більшість мінералів і металопрокат [1].

Наприклад, механічні властивості дерева (рис.1) в зазначеній точці характеризуються уздовж поздовжнього, радіального і тангенціального напрямку. Поздовжня вісь (1) є паралельною напрямку текстури (волокон); радіальна вісь (2) є перпендикулярній кільцям зростання; і тангенціальна вісь (3) є дотичною до кілець зростання [1]

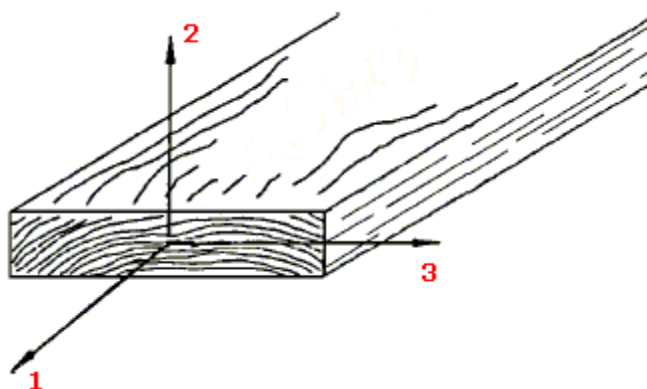


Рис.1. Приклад ортотропного матеріалу [1]

В Simulation напрямок ортотропного матеріалу задається довідковою геометрією – площиною чи віссю.

## 1.2. Постановка проблеми. Кріпильні елементи SolidWorks та штучне підвищення жорсткості системи.

По-перше слід сказати, що дана практична (лабораторна) робота є першою частиною лабораторної роботи в котрі аналізується жорсткість різних варіантів виконання конічного хвостовика фрези (рис.2.)

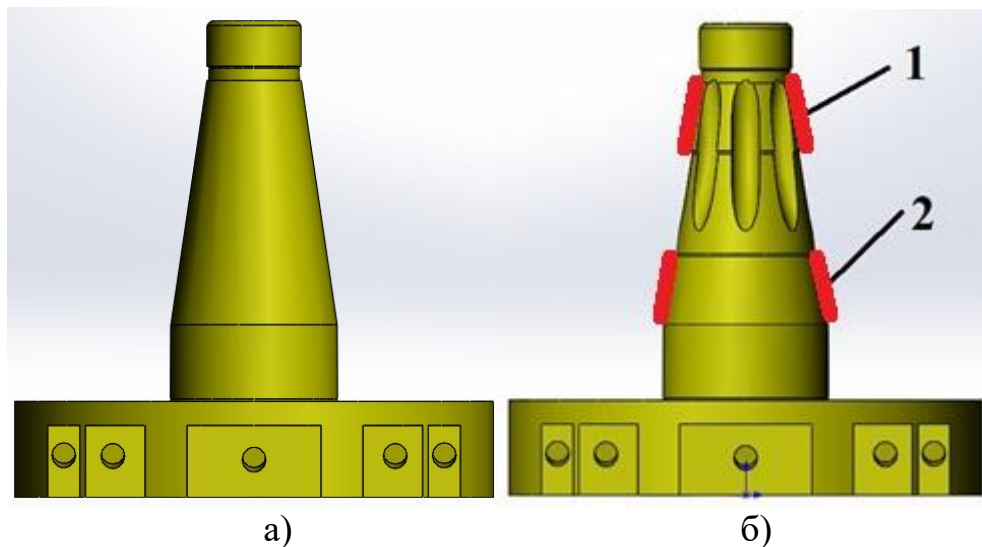


Рис. 2. Загальний вигляд твердотілої моделі стандартного хвостовика (а) та удосконаленого хвостовика (б), де 1 – малий поясок; 2 – великий поясок.

Особливістю удосконаленого хвостовика (такий хвостовик запропоновано в роботах [3,4]) є те, що він має з'єднання за двома контактними поясками, при чому менший поясок пропонується виконувати пустотілим зі зниженою радіальною жорсткістю. Для подолання похибок виготовлення конічних твірних хвостовиків в роботах [3,4] запропоновано виконувати серединну проточку з залишенням двох посадочних поясків. Але й в цій ситуації можливим є контакт по одному з них. Для цього різьбове

з'єднання хвостовика з шомполом перенесено в бік великого пояска, а малий поясок виконано зі зменшеною площею контакту (рис.2,б).

Для більш повного опису проблеми розглянемо рисунок збірки фрези, частини шпинделя верстата та шомпола (рис.3).

Фреза 3 з'єднується з шпинделем верстата за рахунок затягування шомпола 1, котрий має різьбову частину. Напрямок дії сили від дії шомпола (закручування різі) показаний стрілкою 4. Врешті сутність проблеми дослідження радіальної жорсткості (перпендикулярно вісі обертання) від дії складових сил різання полягає у імітації зусилля затягування шомпола.

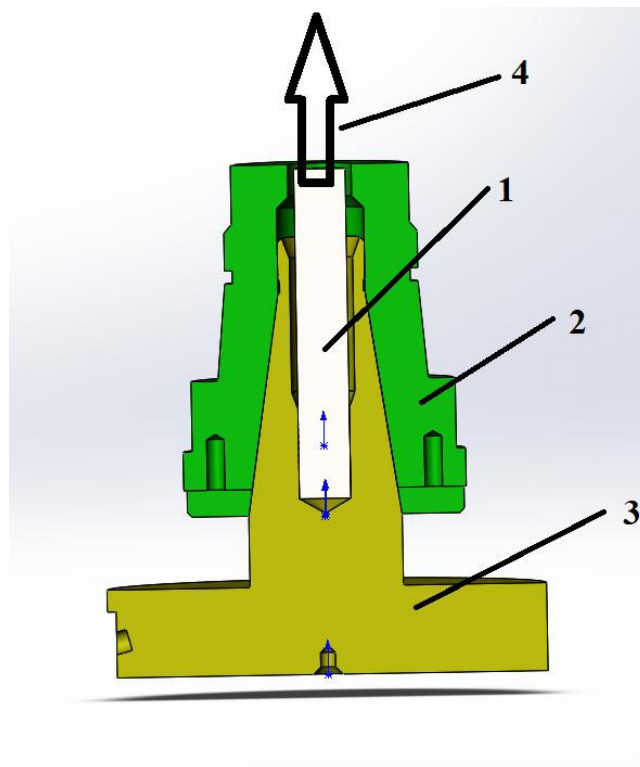


Рис.3. Конічне з'єднання фрези та шпинделя верстата, де 1 – шомпол; 2 – частина шпинделя верстата; 3 – фреза; 4 – напрямок дії зусилля від затягування (закручування різі) шомпола.

Зусилля від затягування шомпола, на нашу думку, можливо реалізувати наступними способами:

- з'єднувачем «Болт», котрий не вимагає формування геометричної моделі;

- прикладанням осьового зусилля, котре буде імітувати дію шомпола при його затягуванні, та одночасно формуванням кривих прикладання сил, котрі передбачають прикладання радіальної сили, котра імітує навантаження на фрезу, після прикладання зусилля від затягування шомпола;
- формування попереднього зусилля від затягування шомпола за допомогою термопружної вставки в шомпол.

При використанні з'єднувача «Болт» вирішуюча програма Simulation програма вводить абсолютно жорсткі кінематичні зв'язки між вузлами сітки (для граней, на котрих визначений з'єднувач) [5]. Але при цьому має місце податливість такого з'єднувача лише в осьовому напрямку або при обертанні.

Використання віртуальних болтових з'єднань Simulation штучно підвищує жорсткість системи. Причому в літературі [5] існують суперечливі твердження щодо того, як **Simulation** імітує болтові з'єднання: в вказується, що стержень віртуального болта замінюється балкою, котра може працювати на згин та розтяг, кінці балки з'єднуються абсолютно жорсткими стержнями з всіма вузлами скінченних елементів, котрі належать умовній головці болта; в інших джерелах вказується, що система створює віртуальний штифт через введення абсолютно жорстких кінематичних зв'язків між вибраними користувачем гранями, після чого утворюються взаємозв'язки котрі керують податливістю в осьовому напрямку та при обертанні (тобто, така система не може працювати на згин).

Так як в даній задачі один з двох зовнішніх силових факторів є зусиллям затягування шомпола (різеве з'єднання шомпола і хвостовика) то імітація даного силового фактору віртуальним болтом буде призводити до **підвищення жорсткості системи.**

Використання прикладання осьової сили зі зміною кривих прикладання як осьової сили (імітує затягування шомпола) так і сили радіальної сили вимагає використання значних ресурсів ЕОМ та часу.

Тому в даній роботі пропонується формування попереднього зусилля від зтягування шомпола за допомогою термопружної вставки в шомпол. Параметри термопружної вставки обиралися по рекомендаціях на основі 5].

## **2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РОЗШИРЕННЯ ОРТОТРОПНОЇ ВСТАВКИ.**

### **2.1. Формування нового матеріалу в базі матеріалів. Призначення матеріалу.**

Як вже було сказано, потрібно створити новий матеріал (ортотропний) в базі даних SolidWorks.

В нашому випадку ортотропні властивості матиме циліндрична частина «реального» болта, що зображена на рис.4.

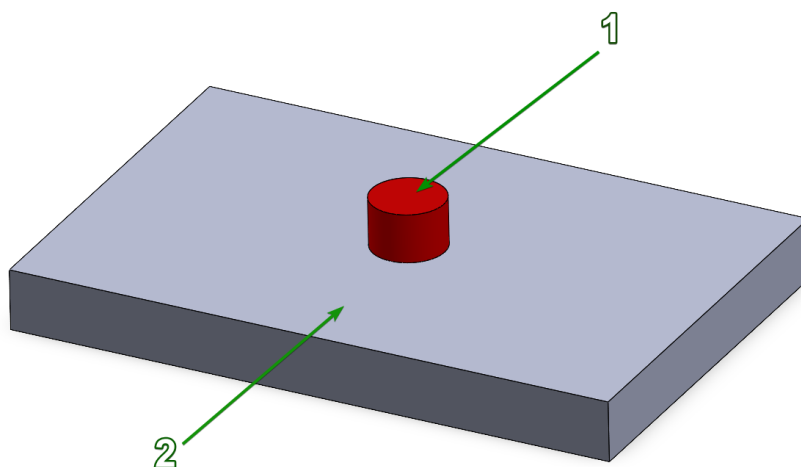


Рис.4. Тестова збірка циліндричної термопружної ортотропної вставки:  
1- prostavka; 2- Base

**2.1.1. Створити новий документ – збірку.** Створите збірку, як це показано на рис.4. Для створення такої збірки потрібно створити 2 деталі, як це показано на рис.4

#### ***Підготовка збірки***

2.1.2. Створити новий документ – деталь;

2.1.3. У даному вікні перейти до вкладки **Властивості документа** →

### Одиниці вимірювання;

2.1.3. Вибрати систему одиниць вимірювань – **ММГС (міліметр, грам, секунда)** (рис.5)

2.1.4 створити циліндричну деталь з розмірами як показано на рис.6;

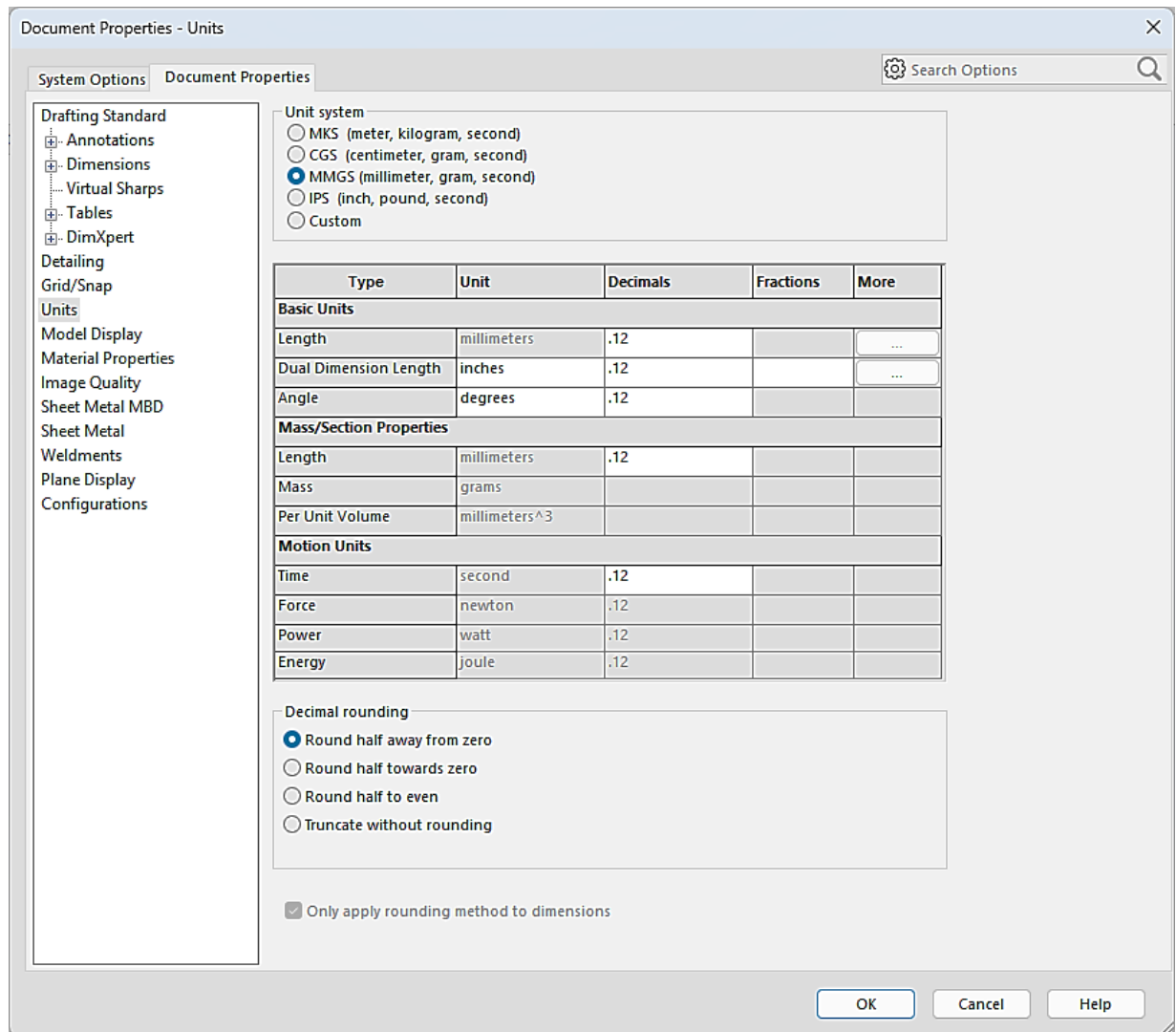


Рис.5. Одиниці вимірювання

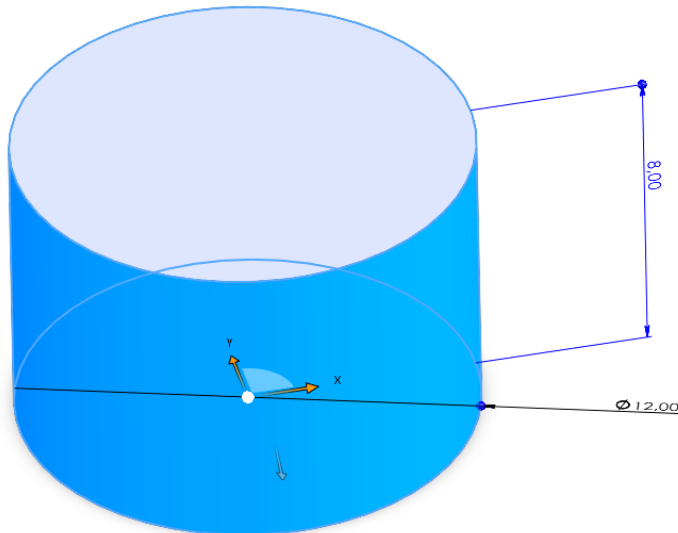


Рис.6. Геометрична модель термопружної вставки (**prostavka**).

2.1.5. аналогічним чином створити деталь «Base» (поз.2, рис.4);

2.1.6. створити збірку, як це показано на рис.4.

2.1.7. запусти модуль **Simulation**. - Натиснути кнопку виклику меню «**SolidWorks**», та перейти у меню **Tools** →**Add-Ins**;

2.1.8. У вікні, що відкрилося, активувати **SolidWorks Simulation**:

2.1.9. Перейти у вкладку **Simulation** та запустити **New Study**;

2.1.10. Задайте ім'я дослідження – **Тест**, та тип – **Static analys**:

2.1.11. Натиснути кнопку виклику меню «**SolidWorks**», перейти у меню **Simulation** →**Settings**;

2.1.12. У вікні, що відкрилося, перейти у вкладку **by default**:

2.1.13. Система одиниць вимірювання – **SI (МКС)**;

2.1.14. Довжина – **mm**;

2.1.15. Тиск/напруження – **N/mm<sup>2</sup> (МПа)**.

#### **Створення нового матеріалу**

2.1.16. в дереві дослідження **FeatureManager** натиснути правою кнопкою на деталі «**prostavka**» і обрати «**Apply/Edit mesh**» (рис.7, а);

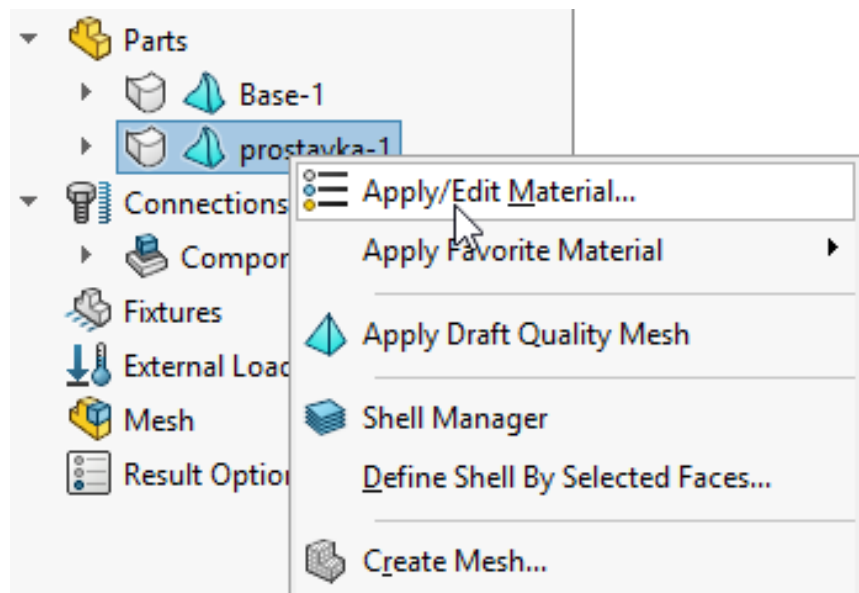
2.1.17. в дереві матеріалів необхідно вибрати матеріал на основі якого буде створений новий користувацький матеріал, для цього підійде будь-яка сталь;



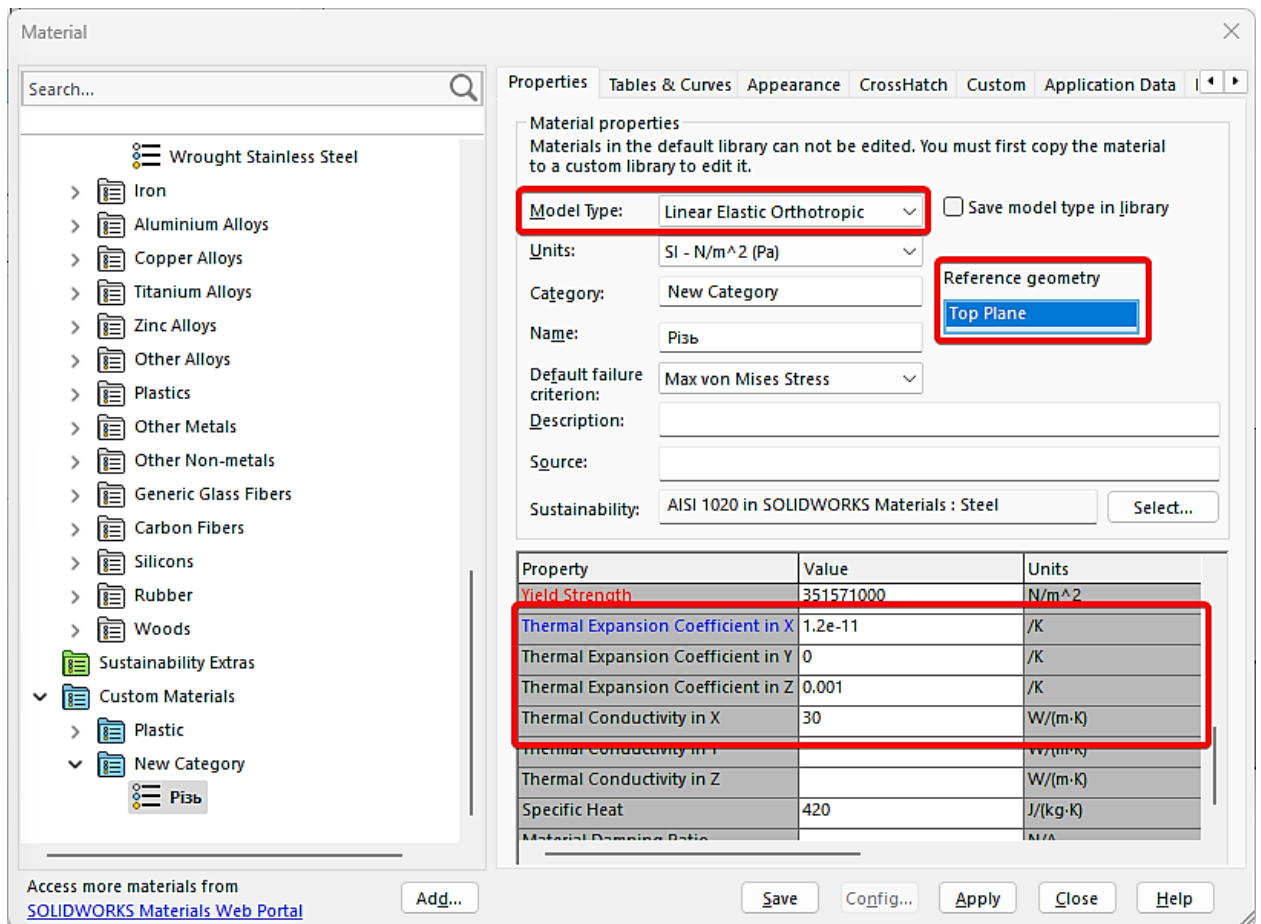
2.1.18. натиснути правою кнопкою миші на будь-яку сталь і вибрати **Copy**;

2.1.19. в дереві матеріалів обрати **Custom Material** і натиснути правою кнопкою миші, обрати **New Category**, натиснути правою кнопкою миші на **New Category** та вибрати **Paste**;

2.1.20. після цього перейменувати матеріал та редагувати значення властивостей, котрі відображені на рис. 7. Фактично потрібно змінити значення коефіцієнту теплового розширення та коефіцієнту теплопровідності. Всі інші властивості залишити такими як були в первинному матеріалі (рис.8)



a



6

Рис.7. Термічні властивості ортотропного матеріалу

Отже, в базі даних SolidWork був сформований новий матеріал з ортотропними властивостями, а саме: температурні коефіцієнти лінійного розширення (ТКЛР) в радіальному напрямку (відносно осі шомпола) такі, що в поперечному перерізі проставки деформації фактично будуть відсутні при зміні температури (рис.7,8). ТКЛР в радіальному напрямку становить  $1,2 \cdot 10^{-11} \text{ K}^{-1}$ , в осьовому  $0,001 \text{ K}^{-1}$ . Решта властивостей аналогічні властивостям матеріалу вуглецевої сталі (рис.8).

В якості довідкової геометрії ортотропного матеріалу вибрана площина «Зверху» збірки деталей, котра є ортогональною осі симетрії «реального» болта (рис.9).

Property	Value	Units
Elastic Modulus in X	2e+11	N/m <sup>2</sup>
Elastic Modulus in Y	2e+11	N/m <sup>2</sup>
Elastic Modulus in Z	2e+11	N/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio in XY	0.29	N/A
Poisson's Ratio in YZ	0.29	N/A
Poisson's Ratio in XZ	0.29	N/A
Shear Modulus in XY	7.6e+10	N/m <sup>2</sup>
Shear Modulus in YZ	7.6e+10	N/m <sup>2</sup>
Shear Modulus in XZ	7.6e+10	N/m <sup>2</sup>
Mass Density	7900	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength in X	420507000	N/m <sup>2</sup>
Tensile Strength in Y		N/m <sup>2</sup>
Compressive Strength in X		N/m <sup>2</sup>
Compressive Strength in Y		N/m <sup>2</sup>
Shear Strength in XY		N/m <sup>2</sup>
Yield Strength	351571000	N/m <sup>2</sup>

Рис.8 Механічні властивості ортотропного матеріалу

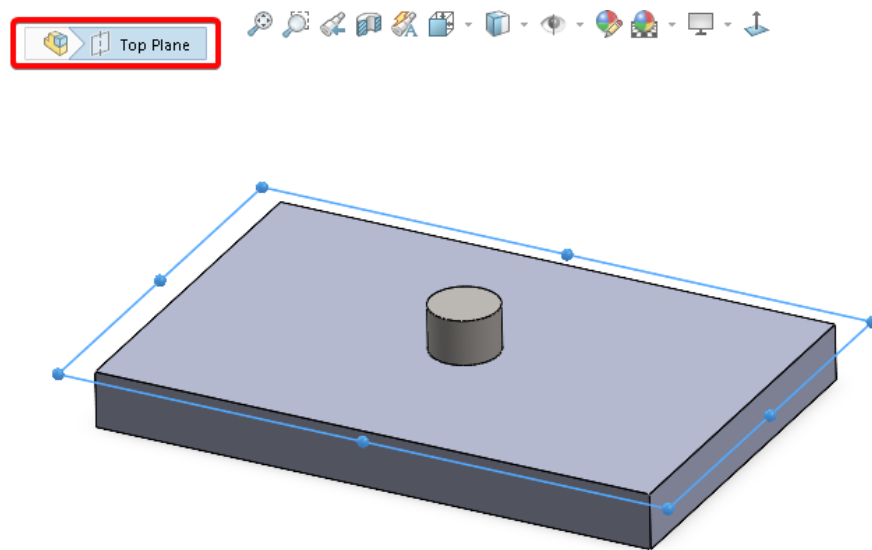


Рис.9. Вибір довідкової геометрії матеріалу

## 2.2. Виконання статичного аналізу термопружної вставки

### *Запуск дослідження та аналіз результатів*

2.2.1. Натиснувши правою кнопкою миші на **Fixtures Advisor**, обрати пункт **Fixture** та зафіксувати грань, як показано на рис.10

2.2.2. Натиснувши правою кнопкою миші на **External Loads**, обрати пункт **Force\*** та прикласти навантаження до зубів фрези, як це показано на рис. 10;

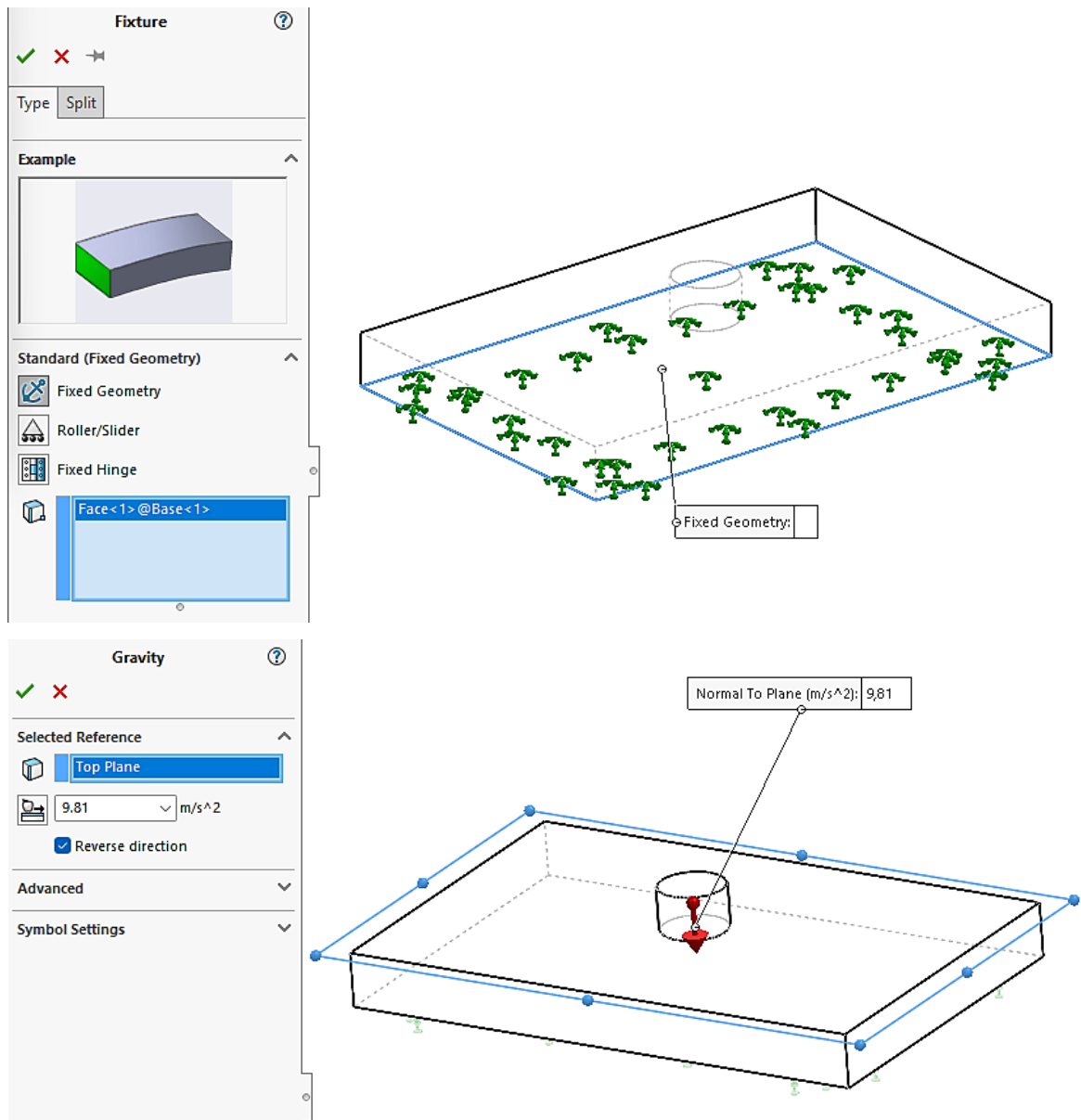


Рис.10. Закріплення деталі **Base** та зовнішні наваначення.

2.2.3. Натиснувши правою кнопкою миші на **Connections**, обрати пункт **Component Interactions**;

2.2.4. Сформуванати контактні умови як показано на рис.11. а,б

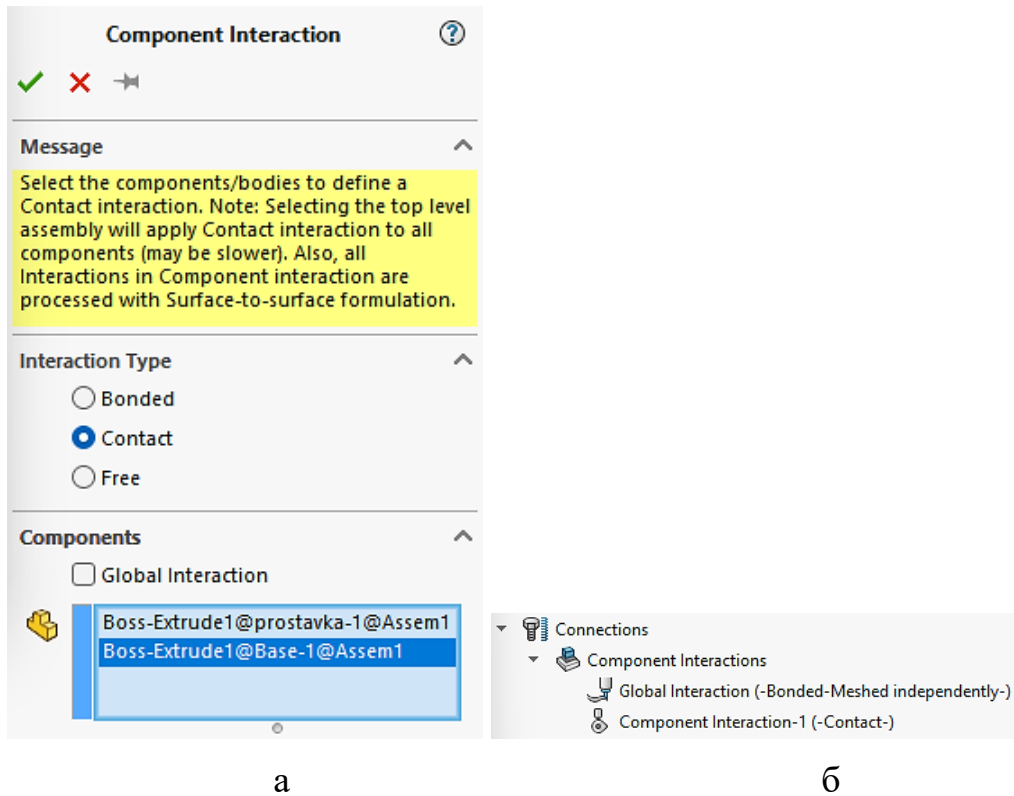


Рис.11. Контактні умови

2.2.5. Натиснувши правою кнопкою миші на **External Loads**, обрати пункт **Temperature** та прикласти навантаження до всієї деталі, як це показано на рис. 12;

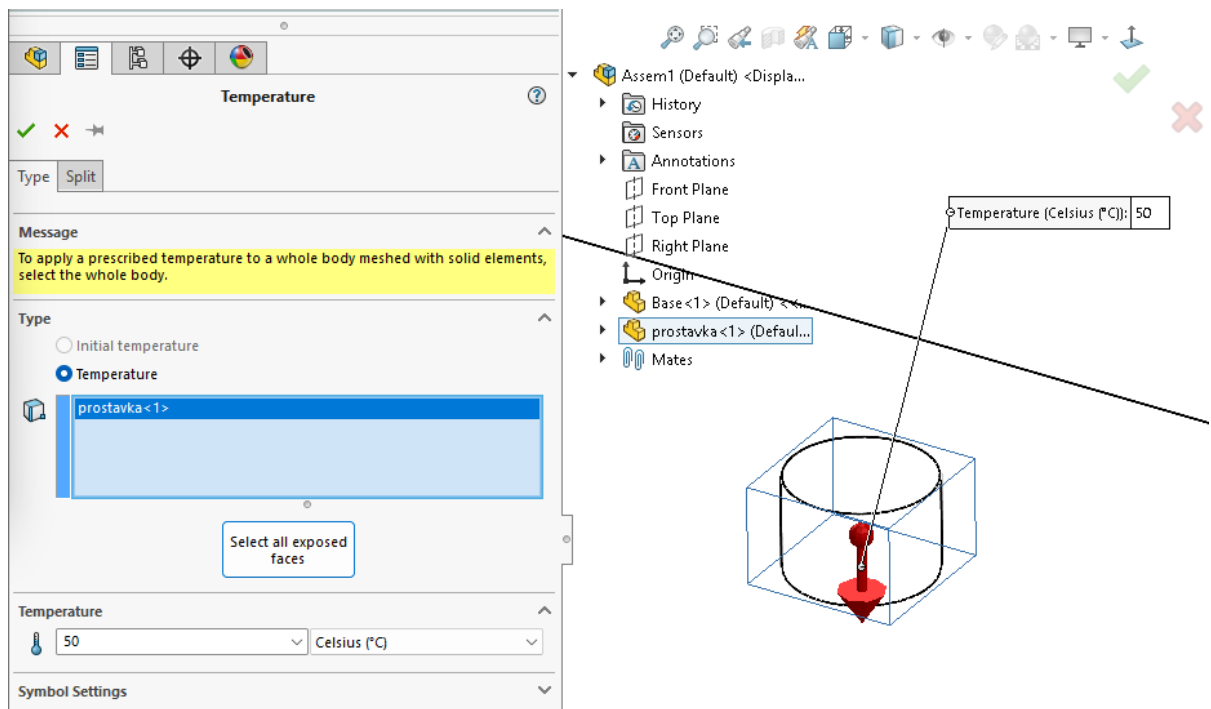


Рис.12. Прикладення термічного навантаження до деталі **prostavka**

2.2.6. Налаштувати дослідження Simulation. Натиснувши правою кнопкою миші на **Static Analys (назва дослідження)**, обрати пункт **Properties**, у вікні, що відкриється (рис.13) обрати тип вирішуючої програми Direct Sparse та активізувати опцію

**Использовать податливую пружину для стабилизации модели**

2.2.7. Запустити дослідження.

2.2.8. Проаналізувати результати переміщення. Результати мають співпадати з даними на рис.14.

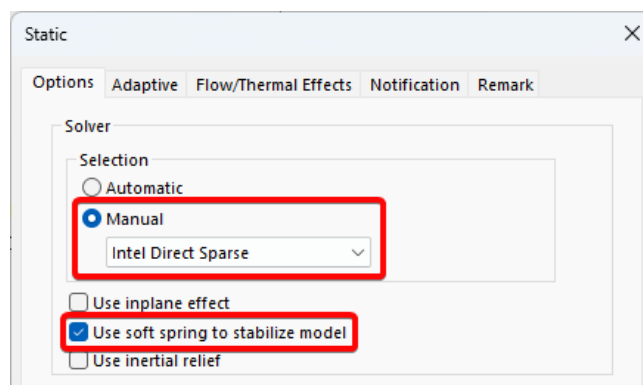


Рис.13. Параметри обчислюваного процесу

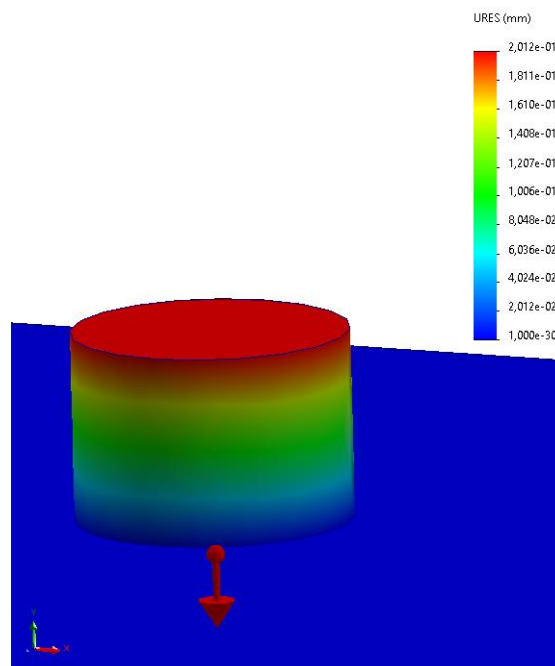


Рис. 14. Результати дослідження.

Для кращої візуалізації епюру переміщення варто відобразити з певним масштабом.

### **3. СТАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЗБІРКИ З ВІРТУАЛЬНИМ БОЛТОВИМ З'ЄДНАННЯМ.**

3.1. Створення збірки.

3.1.1. **Збірку деталей отримати у викладача.**

3.1.2. Якщо збірку не можливо відкрити через те, що вона створена у більш новій версії програми – **створити збірку самостійно** за розмірами деталей, котрі подані в Додатку А.

В результаті має бути збірка, котра зображена на рис.14 а.

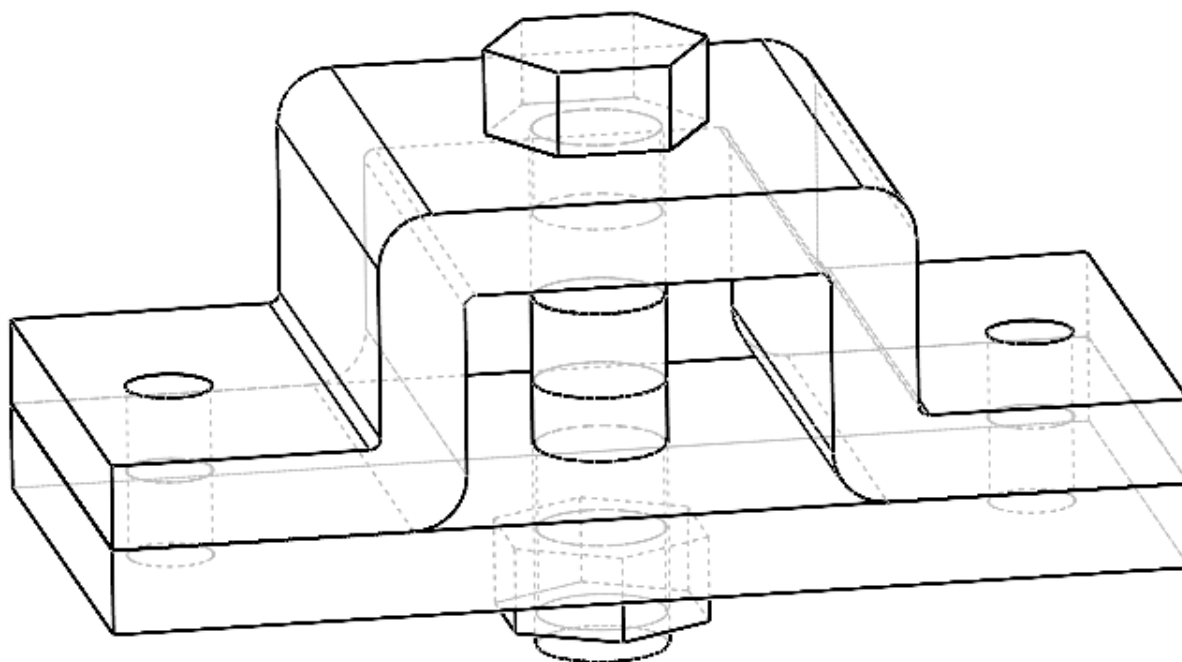


Рис.14. Збірка для дослідження напружено-деформованого стану від дії болтового з'єднання

**3.2. Створення статичного дослідження. Призначення матеріалів і граничних умов. Призначення болтових з'єднань.**

В даному випадку необхідно аби «реальний болт» стягував деталі збірки. Тому до термопружної вставки має бути прикладена така температура, котра призведе до зменшення розмірів проставки.

При охолодженні (прикладання відповідного термічного навантаження) вставка з ортотропного матеріалу (рис.14, поз.2) буде зменшувати свої розміри в напрямку осі.

3.2.1. Повторити пункти 2.1.7- 2.1.15 для збірки без болта.

3.2.2. Натиснувши правою кнопкою миші на **Закріплення**, обрати пункт **Зафіксована геометрія** та зафіксувати грань, як показано на рис.15

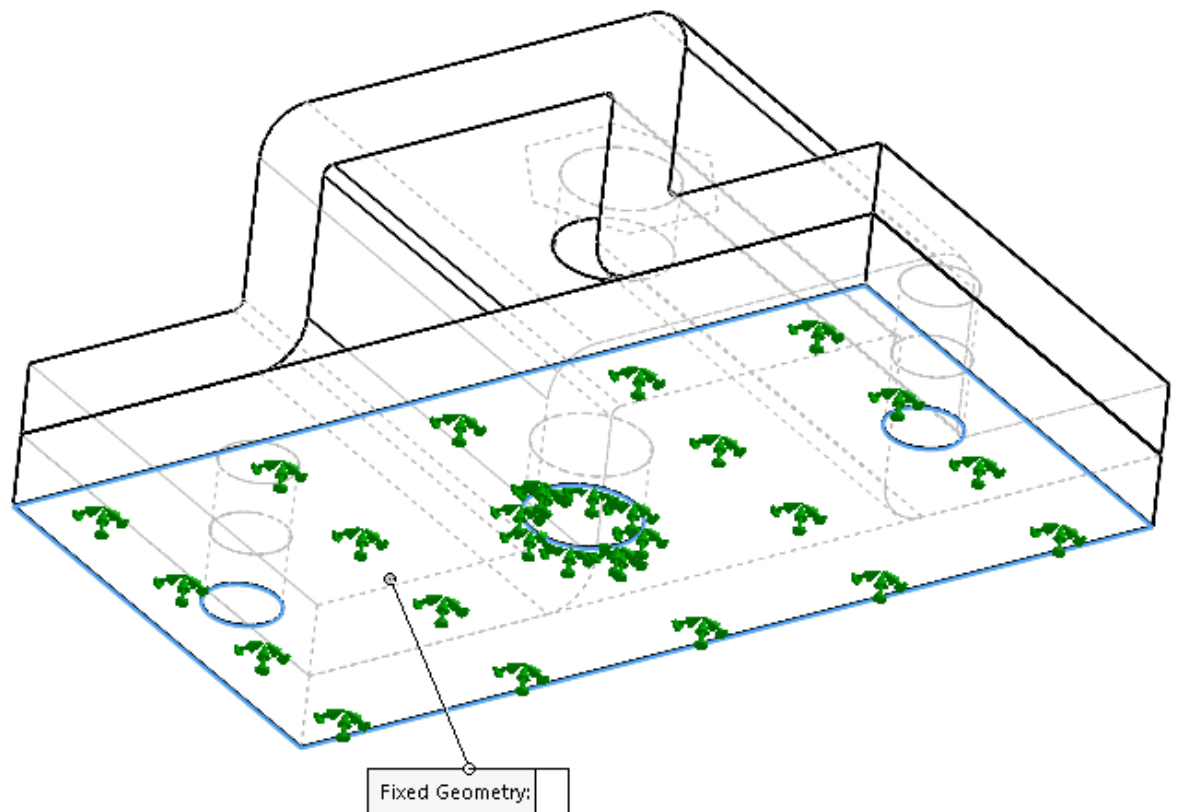


Рис.15. Закріплення моделі

3.2.3. Натиснувши правою кнопкою миші на **Соединения**, обрати пункт **Контакт компонентов**;

3.2.4. Сформуванати контактні умови як показано на рис. 16.



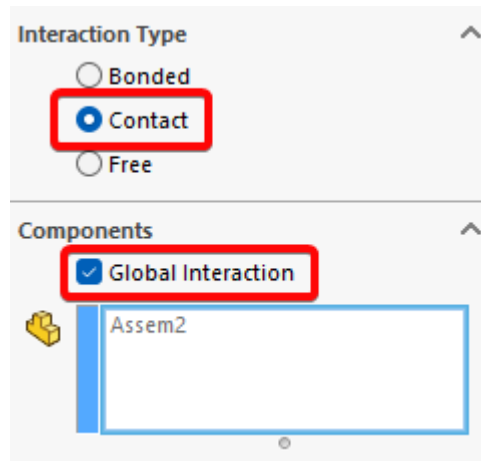


Рис.16. Загальні контактні умови.

3.2.6. Налаштувати дослідження Simulation. Натиснувши правою кнопкою миші на **Static Analys**, обрати пункт **Properties**, у вікні, що відкриється (рис.13) обрати тип вирішуючої програми FFEPlus

3.2.7. Натиснувши правою кнопкою миші на **Connections Advisor**, обрати пункт **Bolt**, у вікні, що відкриється (рис.17) встановити параметри болтового з'єднання як показано в даному вікні

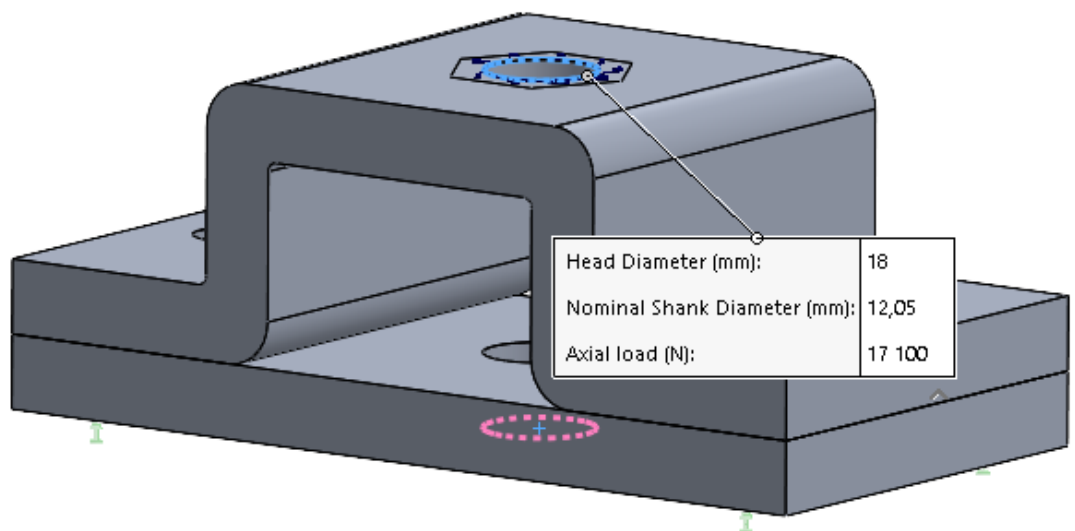
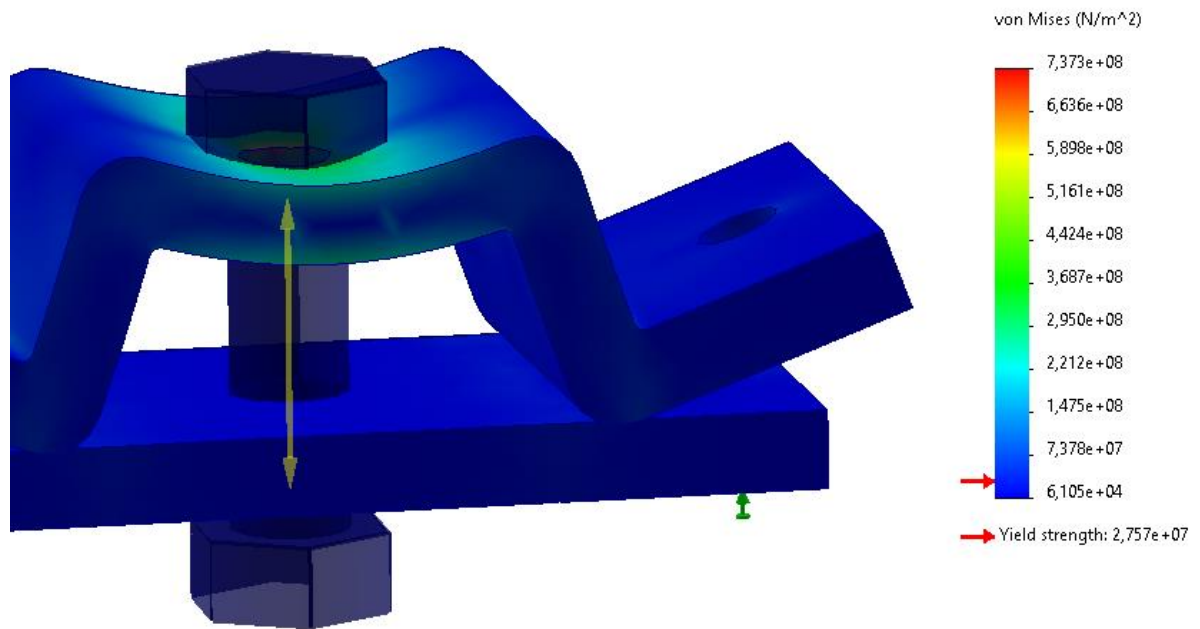


Рис. 17. Параметри болтового з'єднання

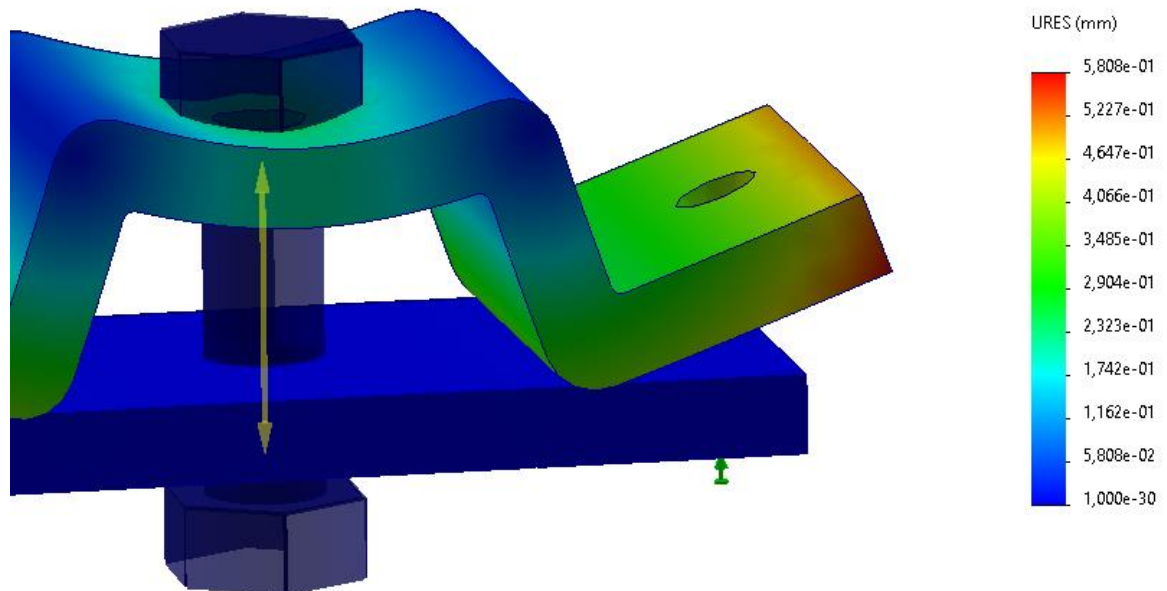
### 3.3. Запуск дослідження. Оцінка результатів дослідження. Визначення сили контакту

3.3.1. Запустити дослідження.

3.3.2. Проаналізувати результати переміщення. Результати мають співпадати з даними на рис.18.



а



б

Рис. 18. Результати аналізу збірки з віртуальним болтом.

## 4. СТАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЗБІРКИ З «РЕАЛЬНИМ» БОЛТОВИМ З'ЄДНАННЯМ.

4.1. Створення збірки. Створення статичного дослідження. Призначення матеріалів і граничних умов. Призначення болтових з'єднань.

4.1.1. Активізувати збірку з «реальним» болтом (рис.19, а) або створити нову збірку шляхом додавання деталей до існуючої. Перший варіант є пріоритетним

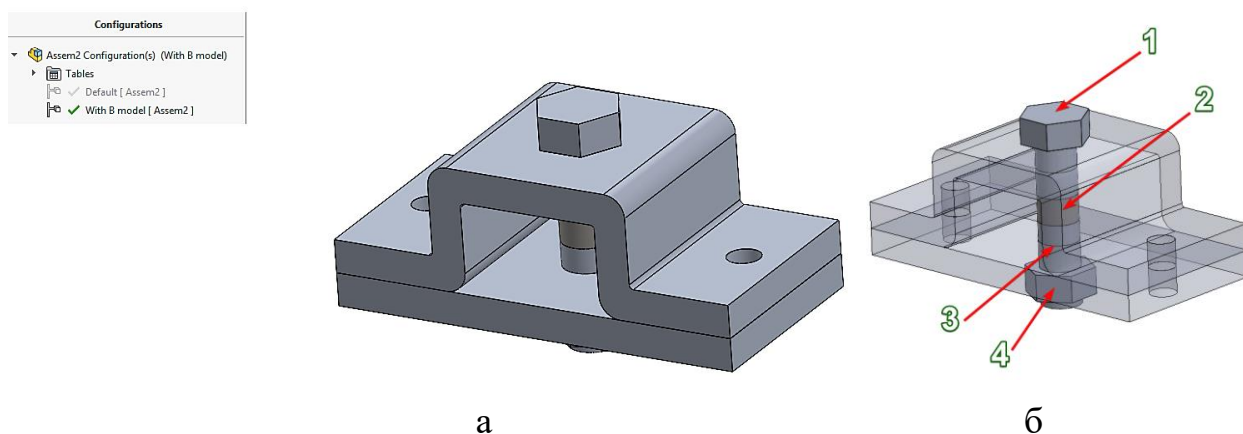
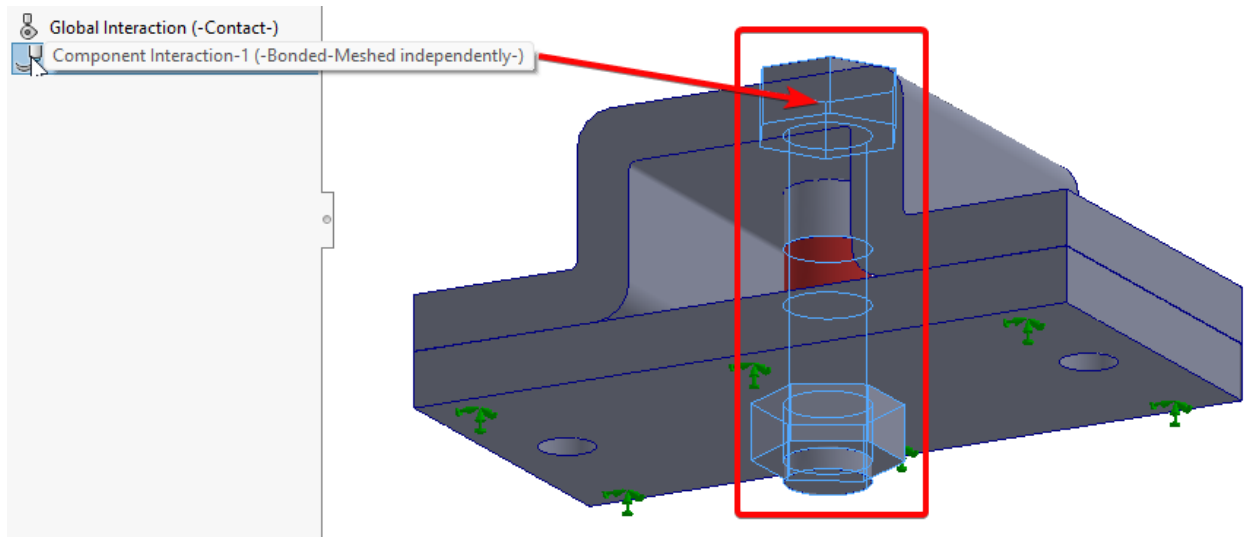


Рис. 19. а – тестова збірка; б – «реальний» болт в якому 1,2,4 – деталі зі звичайної вуглецевої сталі, 2 – термопружна вставка з ортотропного матеріалу.

4.1.2. Повторити пункти 2.1.7- 2.1.15 для збірки з болтом

4.1.3. Повторити пункти 3.2.2- 3.2.4.

4.1.4. Призначити контактні умови між деталями болта, між деталями болта та деталями збірки як це показано на рис. 20.





а

Рис. 20. Контактні умови

Загальні параметри взаємодії компонентів (**Global Interaction**) аналогічні попередньому досліді, тобто: тип **Contact**, **Friction 0,2**.

Контактні умови між складовими елементами болта визначаються **Component interaction bonded** (рис. 21).

4.1.5. Натиснувши правою кнопкою миші на  **External Load**, обрати пункт  **Temperature** та прикласти навантаження до всієї деталі, як це показано на рис. 21.

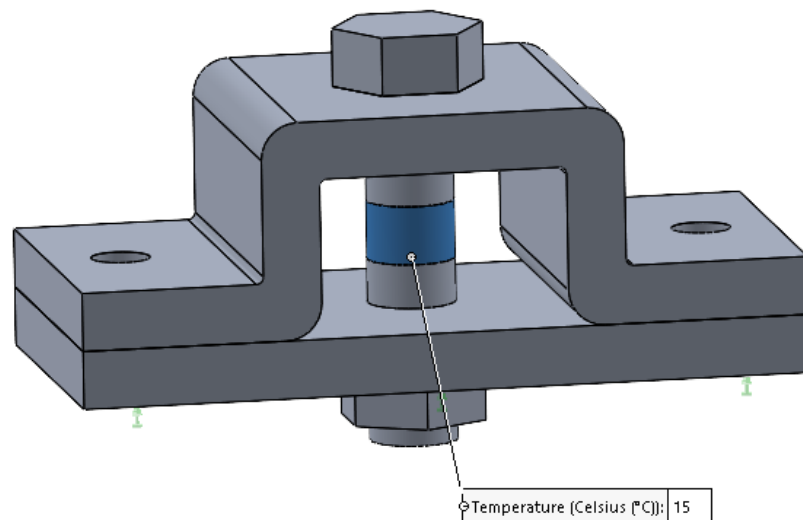
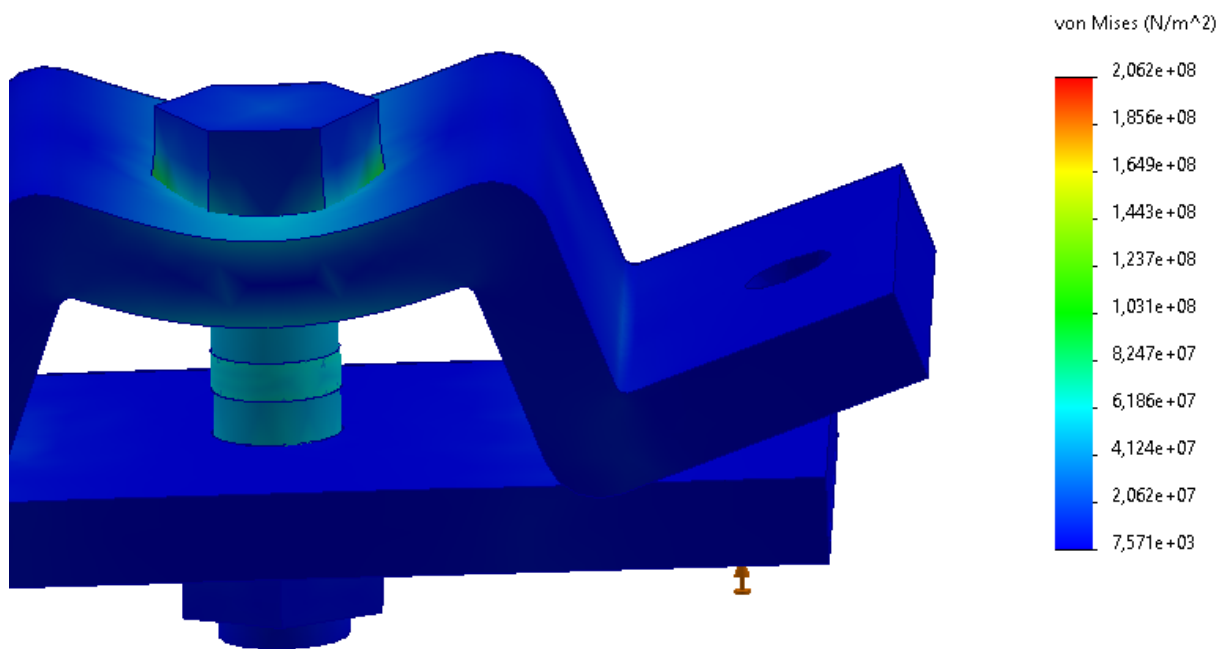


Рис.21. Призначення термічного навантаження

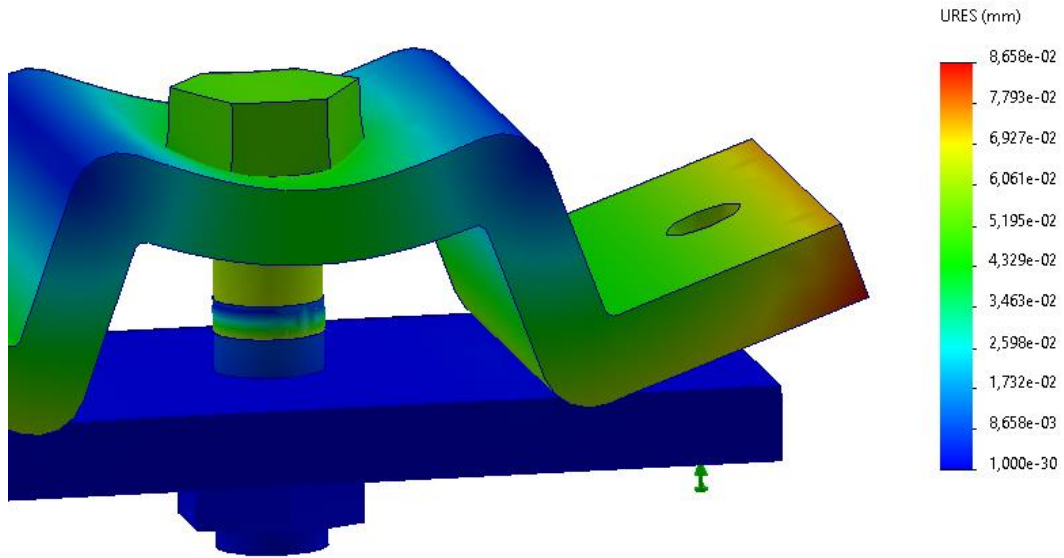
**4.2. Запуск дослідження. Оцінка результатів дослідження.  
Порівняння результатів переміщення та напруження в збірці з  
віртуальним болтом та «реальним»**

4.2.1. Запустити дослідження.

4.2.2. Проаналізувати результати переміщення. Результати мають  
співпадати з даними на рис.23.



а

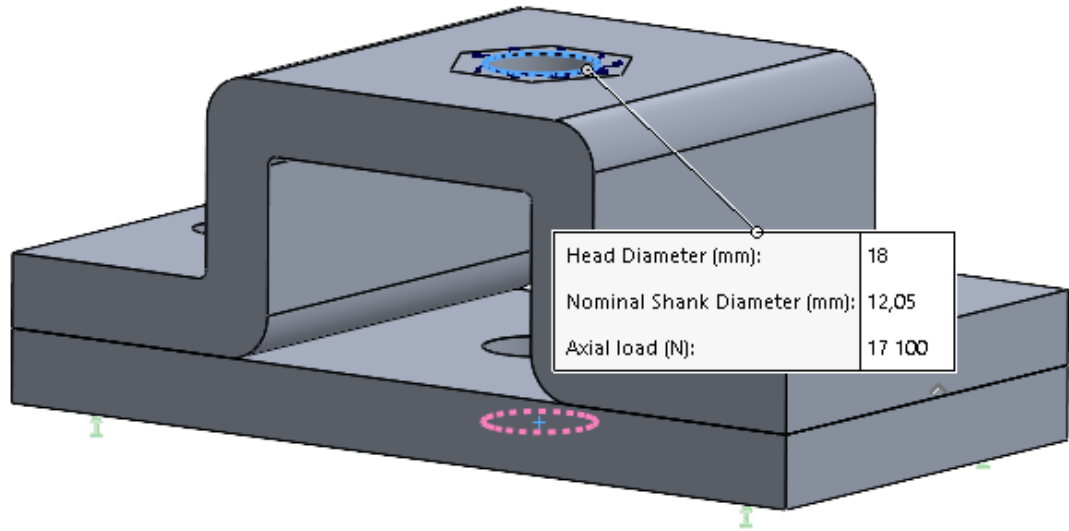


б

Рис. 24. Результати статичного аналізу: а – еквівалентні напруження; б – результуючі сумарні переміщення

4.2.3. Проаналізувати значення сили контакту поверхні під «шляпкою» верхньої частини болта. Порівняти отримане значення з значенням осьової сили віртуального болтового з'єднання.

Для визначення необхідного значення термічного навантаження вставки (температури охолодження) має бути виконана ітераційна процедура визначення навантаження з віртуальним болтом, для якого відоме осьове зусилля (рис.24).



а

**Result Force**

Message  
 Free body force calculations may be inaccurate due to global bonding conditions. To increase accuracy, please consider splitting contacting faces and adding local interactions.

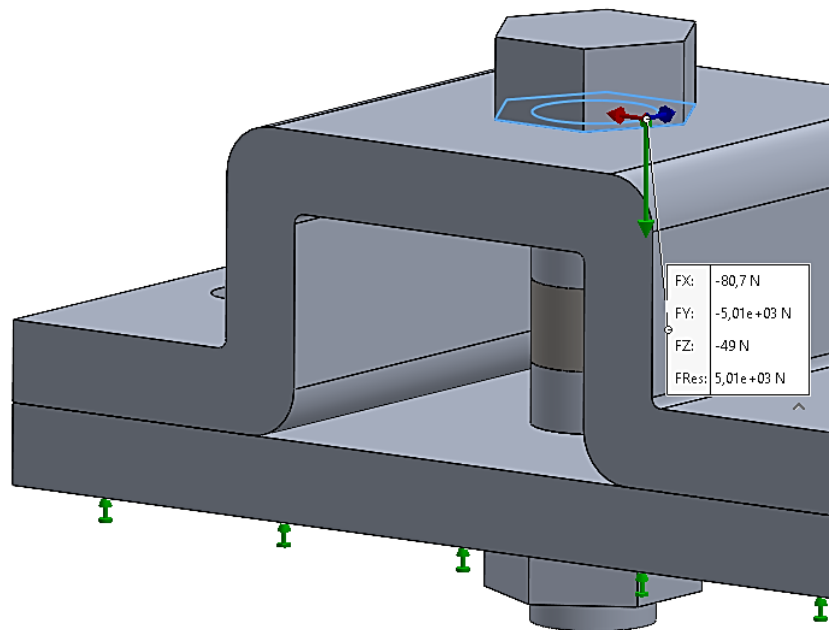
Options  
 Reaction force  
 Remote load interface force  
 Free body force  
 Contact/Friction force  
 Connector force

Selection  
 Face<1> @UpPlate<1>

Update

Free Body Force (N)

Component	Selection	Entire Model
Sum X:	-80,744	-9,6706E-08
Sum Y:	-5 009,6	-0,00050472
Sum Z:	-48,975	0,00057002
Resultant:	5 010,5	0,00076135



б

Рис. 24. Підбір параметрів ортотропного матеріалу: а – осьове зусилля віртуального з'єднувача; б - значення сили контакту/тертя під головкою «реального» болта.

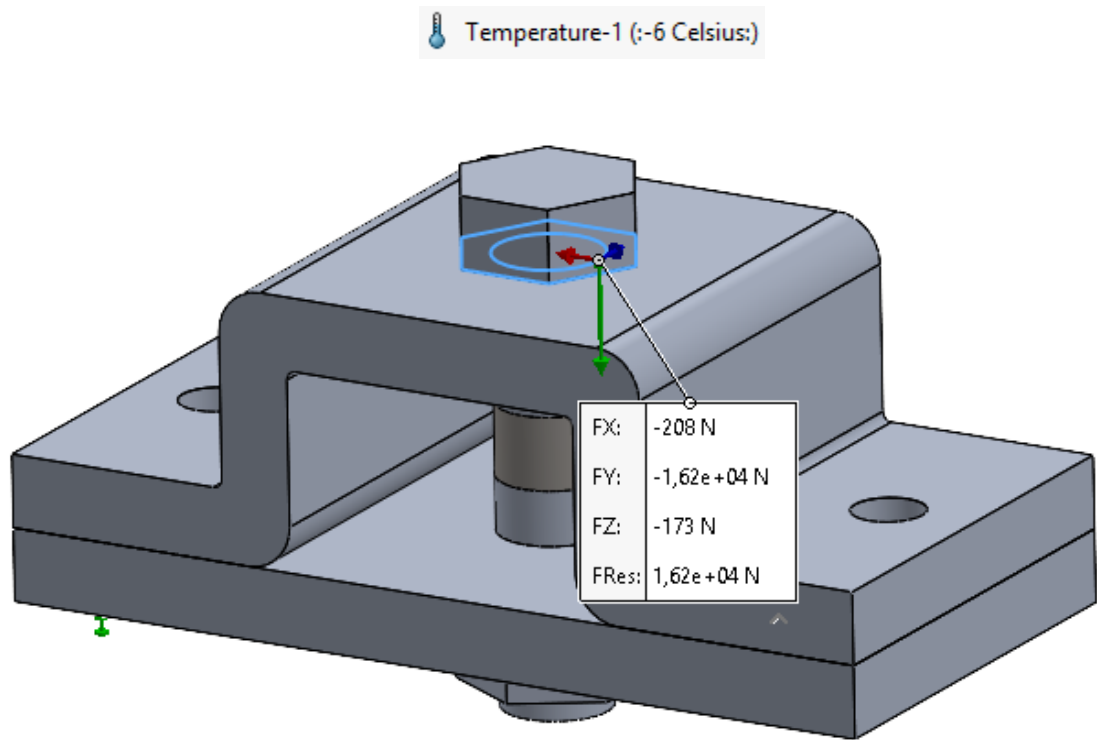


Рис. 24. Підібрані параметрів ортотропного матеріалу

Сутність ітераційної процедури визначення властивостей ортотропного матеріалу, визначення геометричних параметрів ортотропної частини болта та параметрів термічного навантаження полягала в тому, що потрібно досягти рівності осьового зусилля віртуального болта та значення сили контакту голівки «реального» болта.

**Висновок.** Як виходить з рис. 24. за рахунок підбору параметрів термопружної вставки вдалося зімітувати осьове зусилля від дії болтового з'єднання без використання віртуальних болтових з'єднань



## Література

1. Isotropic and Orthotropic Materials [Електронний ресурс] // Dassault Systèmes. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: [https://help.solidworks.com/2019/English/SolidWorks/cworks/c\\_Isotropic\\_Orthotropic\\_Materials.htm?id=0658e4e938784edfbcff7168663a14ac#Pg0](https://help.solidworks.com/2019/English/SolidWorks/cworks/c_Isotropic_Orthotropic_Materials.htm?id=0658e4e938784edfbcff7168663a14ac#Pg0).
2. Orthotropic material [Електронний ресурс] // Wikipedia. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Orthotropic\\_material](https://en.wikipedia.org/wiki/Orthotropic_material).
3. Глембоцька, Л. Є. Аналіз умов стабільної роботи торцевих фрез [Текст] / Л.Є. Глембоцька, П.П. Мельничук // Вестник НТУ "ХПИ", м. Харків, 2003. – № 1, т.8. – С. 55–68 .
4. Глембоцька, Л. Є. Особливості конструкції торцевої фрези для обробки плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів [Текст] / Л.Є. Глембоцька, П.П. Мельничук // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*. м. Краматорськ, 2007. – вип. 21. – С. 58-68.
5. Melnyk O., Hlembotska L., Balytska N., Holovnia V., Plysak M.(2020) The Imitation Study of Taper Connections Stiffness of Face Milling Cutter Shank Using Machine Spindle in the SolidWorks Simulation Environment. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. P. 602–612. [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-22365-6\\_60](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-22365-6_60) (Scopus) (SCOPUS)
- 6.

## Додаток А

### Розміри деталей збірки

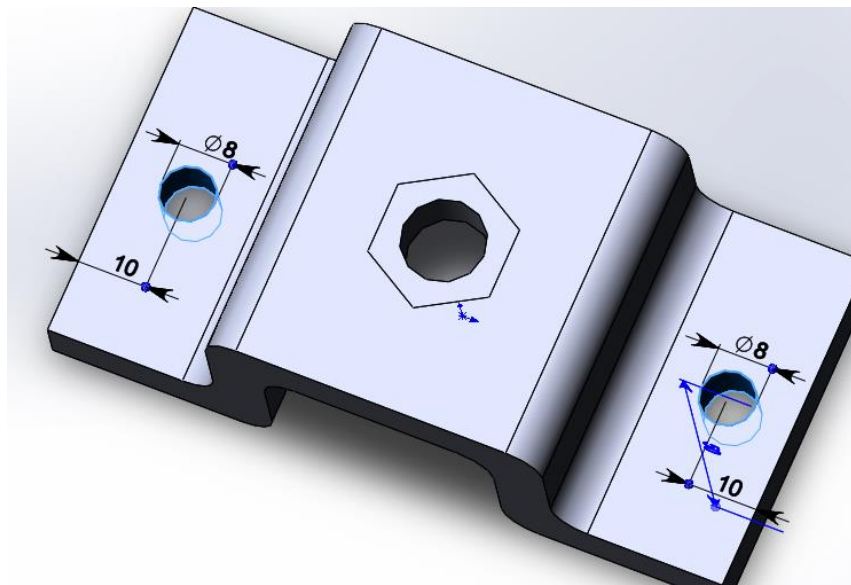
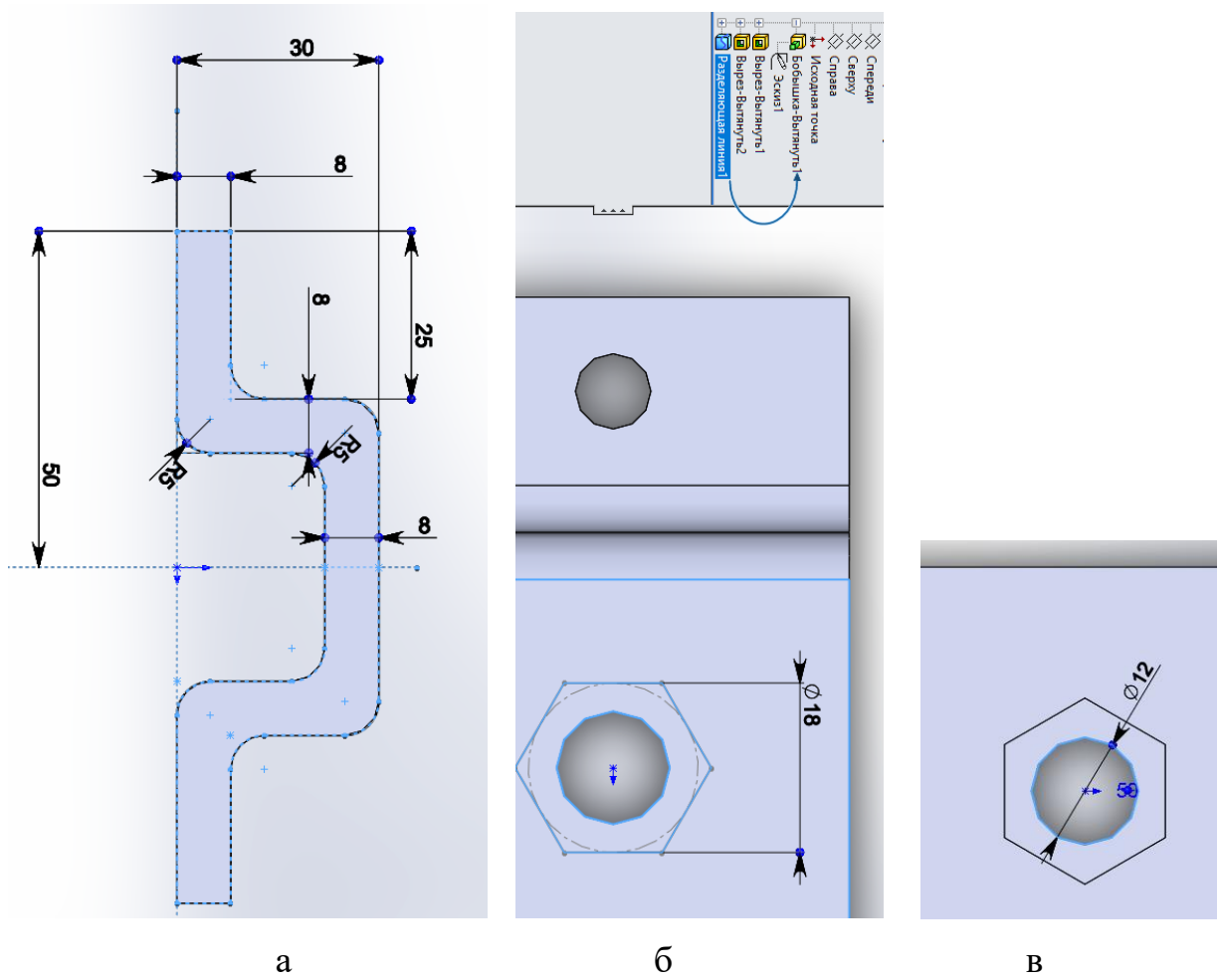


Рис. 1. Верхня плита

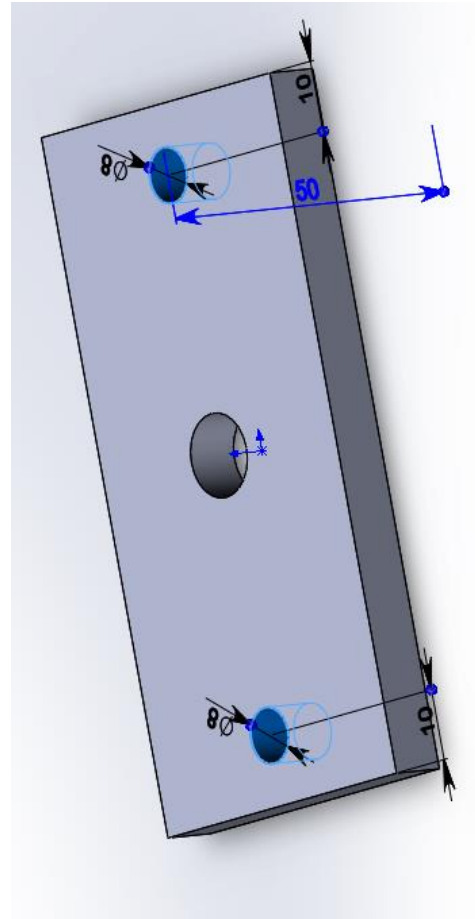
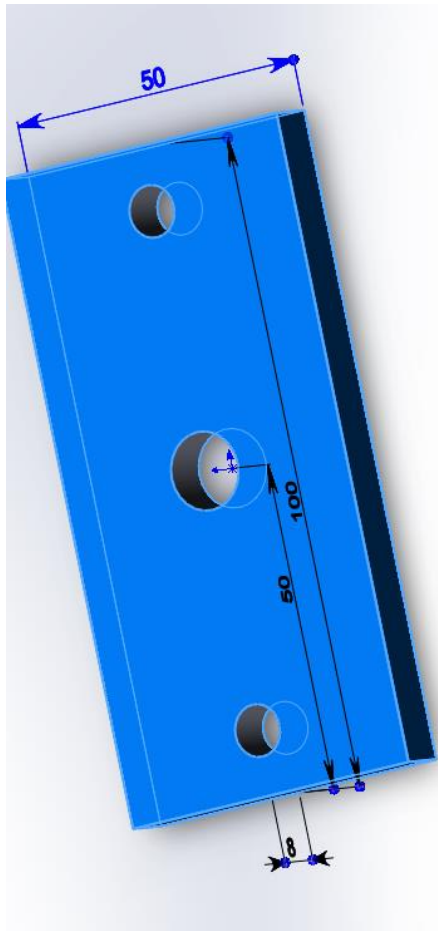
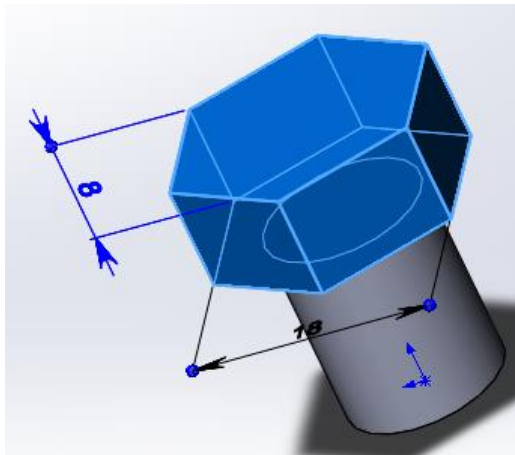
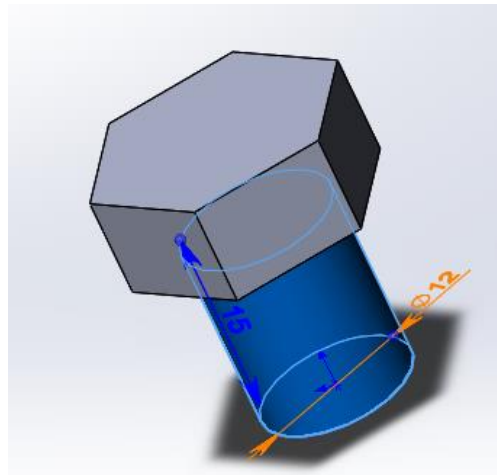


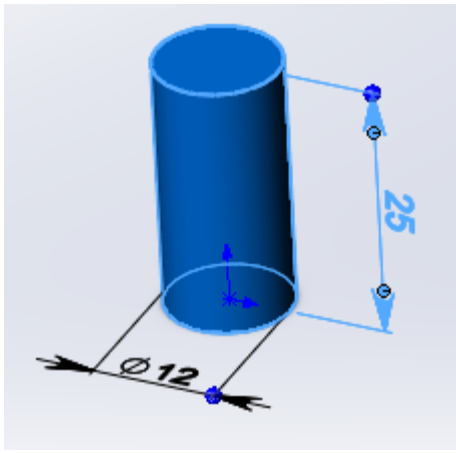
Рис. 1. Нижня плита



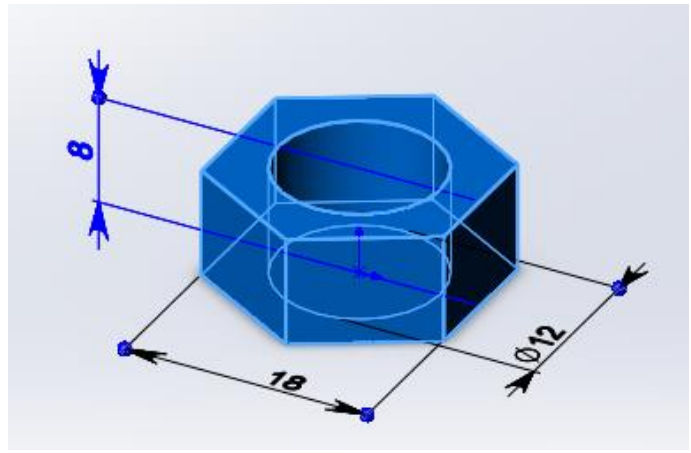
а



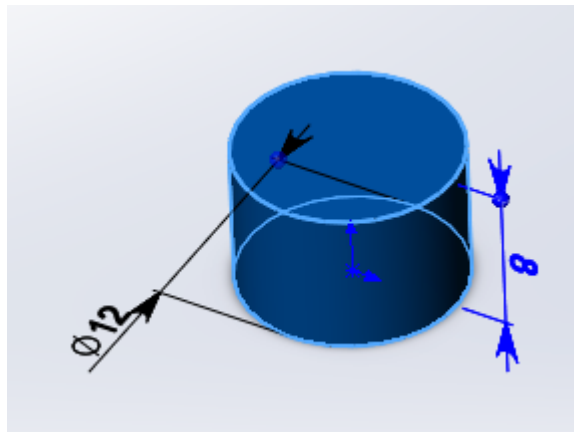
б



В



Г



Д

Рис. 3. Збірка «Болт»: а,б – верхня частина; в – середня циліндрична; г – гайка; д – термопружна проставка