

Практична робота №3

Розрахунок деталі на міцність в системі SolidWorks Simulation

Мета та основні завдання: Виробити у студентів уміння і навички виконання розрахунку деталі на міцність в CAE системі Solidworks Simulation.

Завдання¹ Вивчити основні елементи інтерфейсу SolidWorks Simulation. Розглянути основні критерії міцності, що використовуються в Solidworks Simulation.

5.1. Короткі теоретичні відомості

CAE (англ. Computer-aided engineering) – загальна назва для програм, призначених для інженерних розрахунків конструкцій і аналізу фізичних процесів, пов'язаних з ними.

SolidWorks Simulation – CAE-модуль, заснований на методі кінцевих елементів і призначений для проведення аналізу на міцність.

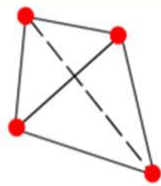
Метод кінцевих елементів (МКЕ) – чисельний метод рішення диференціальних рівнянь з частинними похідними, а також інтегральних рівнянь, що виникають при вирішенні завдань прикладної фізики.

Суть МКЕ полягає в тому, що досліджувана область розбивається на кінцеві елементи, в кожному з елементів довільно вибирається вид апроксимуючої функції і потім знаходяться значення цих функцій на кордонах елементів.

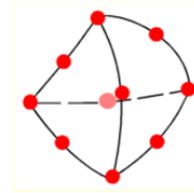
Процес поділу моделі на малі частини називається **створенням сітки**.

В SolidWorks Simulation використовуються **просторові, оболонкові, балкові і спеціальні сітки**.

Просторові елементи застосовують для об'ємних тіл і утворюють сітку з тетраедральними твердотільними елементами для кожного твердого тіла і бувають двох типів:



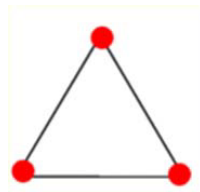
а



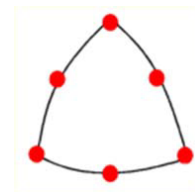
б

Рисунок 5.1 – Лінійний (а) та параболічний (б) просторовий елемент

Оболонкові елементи застосовують для тонкостінних деталей (з листового металу) і утворюють сітку з трикутними елементами і бувають також двох типів:



а



б

Рисунок 5.2 – Лінійний (а) та параболічний (б) оболонковий елемент

Балкові елементи застосовуються для моделей створених рухом постійного поперечного перерізу за деякою траєкторії, і визначається двома кінцевими точками і поперечним перерізом.

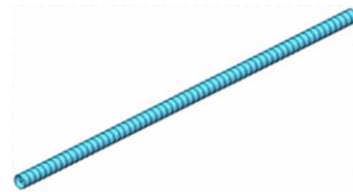
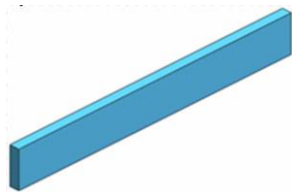


Рисунок 5.3 – Балковий елемент

Комбінована сітка автоматично застосовується, коли в моделі присутні різні геометричні форми.

Критерії міцності. Призначення критеріїв міцності, їх використання та інтерпретація результатів розрахунку напружено-деформованого стану тіла мають важливе значення при розрахунку.

Solidworks Simulation дозволяє оцінювати міцність виробів за чотирма критеріями:

- максимальні еквівалентні напруження по Мізесу;
- максимальні дотичні напруження;
- напруги Мора-Кулона;
- максимальні нормальні напруження.

Для моделей з композитними оболонками підтримуються додаткові критерії руйнування:

- критерій максимальної напруги;
- критерій руйнування Tsai-Hill;
- критерій руйнування Tsai-Wu.

Величина, що отримується розрахунком за критерієм міцності, має розмірність напруги $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} / \text{м}^2$ або $1 \text{ МПа} = 1 \times 10^6 \text{ Па} = 1 \text{ Н} / \text{мм}^2$.

Критерій Мізесу

Критерій Мізеса (Von Mises) визначає момент вичерпання несучої здатності шляхом порівняння величини еквівалентної напруги з межею плинності матеріалу. Еквівалентне напруження в певній точці визначається за формулою:

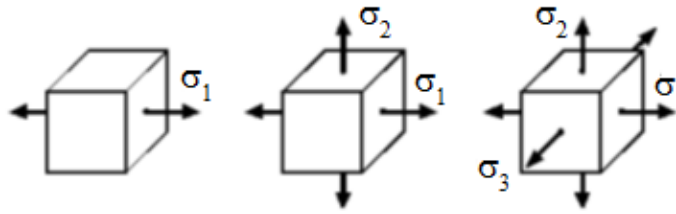
$$\sigma_{\text{VomMises}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруги

Еквівалентне напруження не залежить від орієнтації майданчика (інваріантно).

Критерій Мізеса застосовується для ізотропних матеріалів, що мають в'язкий характер руйнування. До них відноситься більшість металів, а також деякі пластмаси, які мають лінійну ділянку на діаграмі деформування.

У деформованому тілі завжди можна виділити орієнтований елементарний паралелепіпед, по гранях якого діють нормальні (головні) напруги.



$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

Рисунок 5.4 – Нормальні (головні напруги), що діють на грані паралелепіпеда

Критерій максимальних дотичних напружень

Критерій Максимальних дотичних напружень (критерій Тріска) полягає в порівнянні величини максимального дотичного напруження в даній точці з деякою, заданої користувачем, величиною.

$$\tau_{\max} = \max(\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{31})$$

$$\text{де } \tau_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}, \tau_{23} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}, \tau_{31} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}$$

При чистому розтягуванні стисненні оцінка по Мізесу і по Максимальним дотичним напруженням тотожні. При чистому зсуві міцність по Мізесу більша приблизно на 15%.

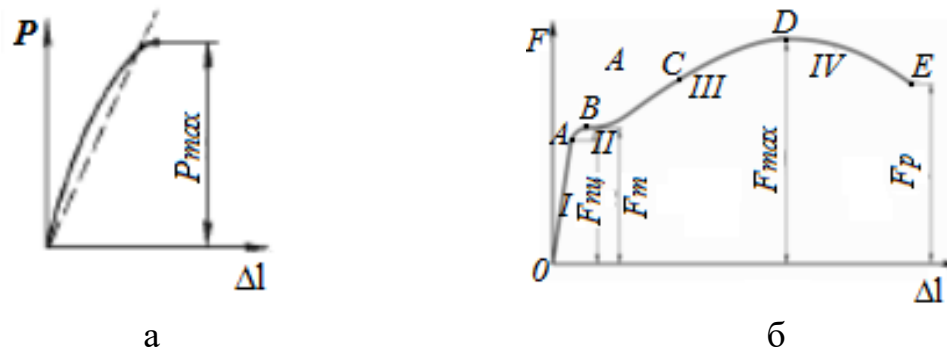
Коефіцієнт запасу для цього критерію подвоюється виходячи з припущення, що для тендітних матеріалів міцність при розтягуванні в два рази більше міцності при чистому зсуві.

Критерій Мора-Кулона

Критерій Мора-Кулона (критерій внутрішнього тертя) призначений для тендітних матеріалів, які по різному чинять опір напруженням розтягування і стиснення.

Оскільки крихкі матеріали не мають на кривій деформування вираженої ділянки текучості, то величина межі текучості SIGYLD не приймає участь в розрахунку. У властивостях матеріалу цю величину рекомендується ставити рівній нулю.

Коефіцієнт запасу залежить від першого і третього головних напружень.



I - ділянка пропорційності; II - ділянка текучості; III - ділянка самозміцнення; IV - ділянка руйнування.

Рисунок 5.5 – Графічне зображення критерію Мора-Кулона для крихкого (а) та пластичного (б) матеріалу

Критерій Максимальних нормальних напружень

Критерій Максимальних нормальних напружень призначений для тендітних матеріалів, однак чинять опір розтягуванню-стисненню. Так як ця умова рідко дотримується в чистому вигляді, наприклад тому, що дефекти у вигляді тріщин при розтягуванні набагато сильніше послаблюють конструкцію, ніж при стисканні, - цей критерій треба використовувати з великою обережністю.

Оскільки крихкі матеріали не мають на кривій деформування вираженої ділянки текучості, то величина межі текучості SIGYLD не приймає участь в розрахунку. У властивостях матеріалу цю величину рекомендується ставити рівній нулю. Коефіцієнт запасу міцності залежить від першої головної напруги.

Активация модуля Solidworks Simulation

Щоб почати користуватися пакетом Simulation необхідно додати його на панель керування. Для цього необхідно в меню «**Инструменты**» → «**Добавления**» (рисунок. 5.6) у вікні «**Добавления**» (рисунок. 5.7) відшукати пункт «**SolidWorks Simulation**» і встановити прапорці «**Активные добавления**» і «**Запуск**».

Перший прапорець – додавання пакету в програму, другий – здійснювання запуск пакету при запуску SolidWorks. Потім натисніть кнопку **ОК**.

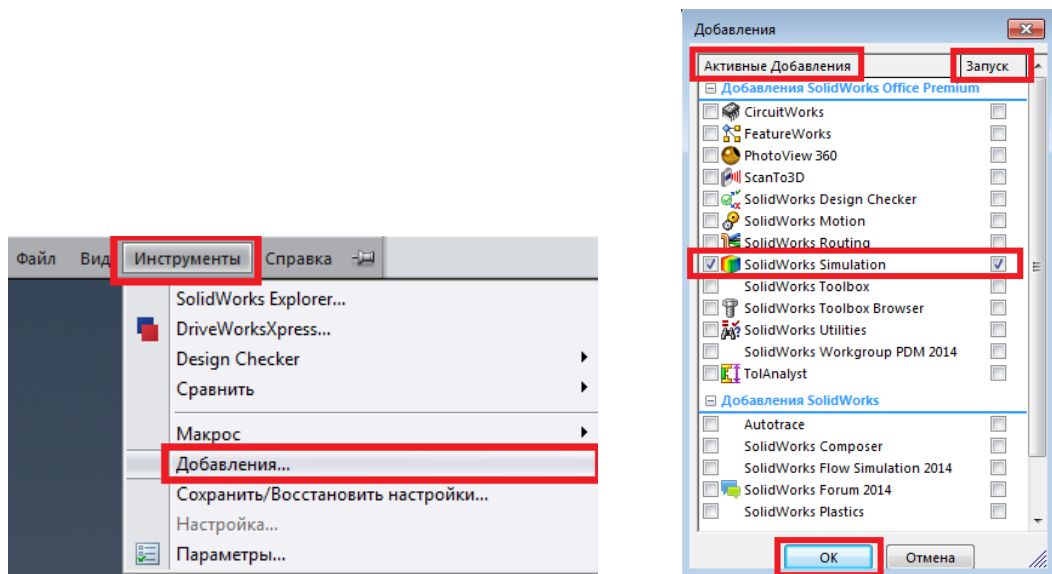


Рисунок 5.6 – Меню «**Инструменты**» → «**Добавления**»

Якщо процес додавання пройде успішно, то:

- в меню додається пункт Simulation;
- на панелі інструментів з'являється вкладка Simulation;
- в менеджері проєкту SolidWorks з'являється вкладка з піктограмою продукту.

Интерфейс SolidWorks Simulation

Solidworks Simulation використовує стандартний Windows-інтерфейс і складається з **Меню** (рисунок. 5.7), **Панелі інструментів** (рисунок. 5.8) і **Дерева досліджень** (рисунок. 5.9).

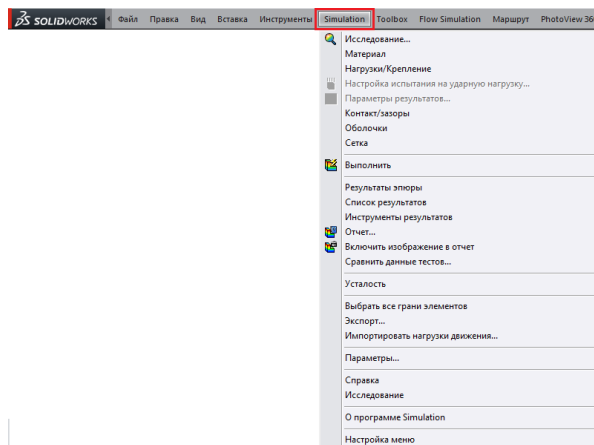


Рисунок 5.7 – Меню Solidworks Simulation

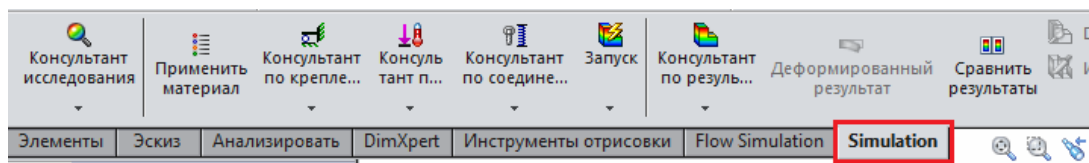


Рисунок 5.8 – Панель інструментів Solidworks Simulation

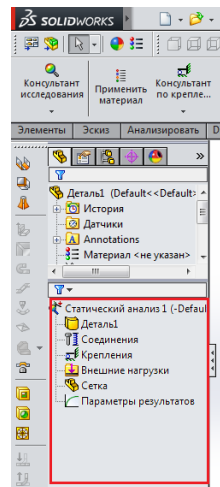


Рисунок 5.9 – Дерево досліджень

Вкладка Simulation в Менеджері команд відкриває набір інструментів, характерних для кожного з видів досліджень в Solidworks Simulation.

Перед початком роботи необхідно вибрати тип дослідження в **меню Simulation** (рисунок. 5.7) або в **Консультанті дослідження** (рисунок. 5.10).

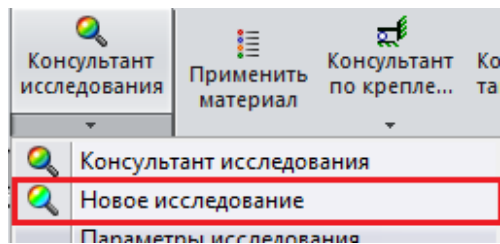


Рисунок 5.10 – Консультант дослідження

Після вибору пункту «Новое исследование» (рисунок. 5.7) активується меню «Исследование» (рисунок. 5.11).

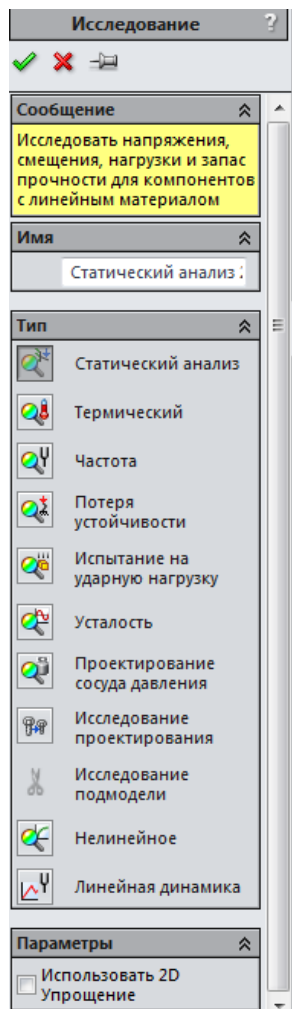


Рисунок 5.11 – Меню «Исследование»

Типи досліджень

Статичне дослідження обчислює переміщення, сили реакції, навантаження, напруги і розподіл запасу міцності.

Термічне дослідження підраховує температури, градієнт температури і тепловий потік на основі тепловиділення, теплопровідності, конвекції і умов випромінювання.

Частотне дослідження розраховує власні частоти і асоційовані форми коливань.

Дослідження втрати стійкості визначає миттєві великі переміщення, викликані осьовими навантаженнями.

Дослідження на ударне навантаження оцінює вплив падіння деталі / збірки на жорстку / пружну поверхню.

Дослідження втоми обчислює термін служби виробів в умовах втоми матеріалів на підставі інтенсивності напружень, напружень по Мізесу або максимальних головних знакозмінних напружень.

Дослідження конструкції посудини, що працює під тиском об'єднує результати статичних досліджень з необхідними коефіцієнтами.

Дослідження проектування забезпечує рівномірний робочий потік для досліджень оптимізації та оцінки.

Нелінійне дослідження вирішує завдання в нелінійній постановці, викликаній поведінкою матеріалу, великими переміщеннями і умовами контакту.

Лінійне динамічне дослідження виконує розрахунок в умовах інерційних і демпфуючих впливів.

Після вибору типу дослідження під Деревом конструювання з'являється вкладка з назвою дослідження (рисунок. 5.12).

Натискання по цій вкладці відкриває Менеджер дослідження.

Менеджер досліджень статичного аналізу має папки за замовчуванням **З'єднання, Кріплення, Зовнішні навантаження, Сітка і Параметри результатів**. Задані параметри дослідження потрапляють кожен в свою папку (рисунок. 5.12).

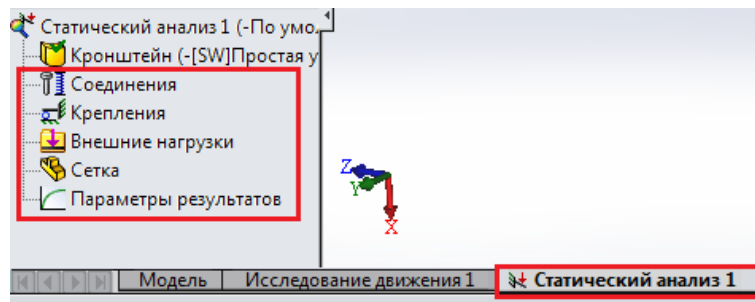


Рисунок 5.12 – Дерево досліджень статичного аналізу

Загальна концепція дослідження

Загальна послідовність статичного дослідження в Solidworks Simulation має на увазі наявність досліджуваної моделі і включає виконання наступних пунктів:

1. Завдання матеріалу деталі (збірки).
2. Накладення закріплень.
3. Завдання типів, місць прикладання і величин навантажень.
4. Визначення типу контакту і наборів контактів (для збірок).
5. Генерація сітки.
6. Виконання власне дослідження.
7. Перегляд і аналіз результатів дослідження, формування звіту.
8. Коригування моделі, граничних умов і повторний розрахунок (при необхідності).

З метою більш поглибленого вивчення теоретичних основ даної практичної роботи рекомендується використати конспект лекцій з курсу та список рекомендованої літератури до даних методичних вказівок.

5.2. Опис практичних засобів та обладнання

Практична робота виконується на персональному комп'ютері стандарту IBM PC під керуванням операційної системи MS Windows зі стандартним пакетом MS Office та програмним комплексом SolidWorks.

5.3. Заходи безпеки під час виконання практичної роботи

Заходи безпеки, яких треба дотримуватись при виконанні даної практичної роботи, наведені у Додатку А.

5.4. Послідовність виконання практичної роботи

1. Відповідно до отриманого варіанту завдання (Додаток Б) в програмному комплексі SolidWorks виконати розрахунок деталі на міцність в CAE системі SolidWorks Simulation. У процесі дослідження необхідно вирішити наступні завдання:

- задати матеріал деталі;
- накласти закріплення і прикласти навантаження;
- створити сітку і запустити дослідження;
- проаналізувати результати дослідження і сформулювати звіт.

2. Після проведення розрахунків продемонструвати результати роботи викладачу.

3. Оформити протокол практичної роботи.

5.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту

При оформленні звіту з практичної роботи до заздалегідь підготовленого протоколу (див. завдання до практичної роботи) додається:

- роздруковані аркуші з результатами виконаної роботи;
- опис по етапах порядку виконання розрахунку деталі на міцність.

Приклад виконання практичної роботи.

Вихідні данні: Необхідно виконати розрахунок деталі (рисунок. 5.13) на міцність.

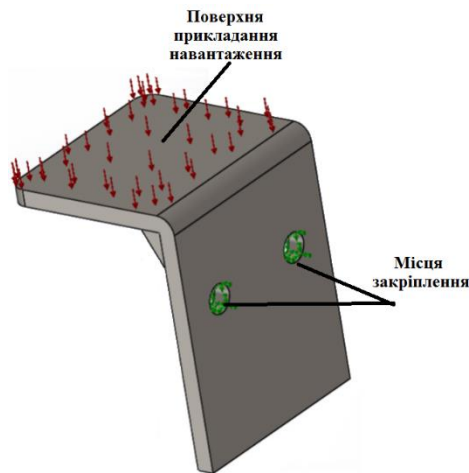


Рисунок 5.13 – Деталь із схемою закріплення та прикладення навантаження

Матеріал деталі – легована сталь

Величина сили, що прикладається – 400 Н.

Послідовність виконання дослідження:

1. Запустіть програмний комплекс SolidWorks.
2. Через меню «Файл» → «Открыть» відкрийте надану викладачем деталь.

3. В меню **Simulation** (рисунок. 5.14) або в «Консультант исследования» (рисунок. 5.15) виберіть тип дослідження – «Статический анализ».

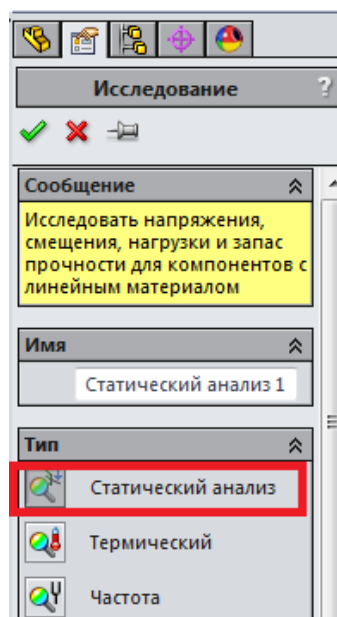


Рисунок 5.14 – «Консультант исследования»

4. Завдання матеріалу. В менеджері проекту задайте матеріал деталі – легована сталь. Це можна зробити натиснувши правою кнопкою миші (ПКМ) на піктограмі матеріалу  і в контекстному меню вибрати пункт **«Редактировать материал»**. В результаті відкриється вікно **«Материалы»** в якому необхідно вибрати **«Сталь»** → **«Легированная сталь»** і натиснути **«Применить»**.

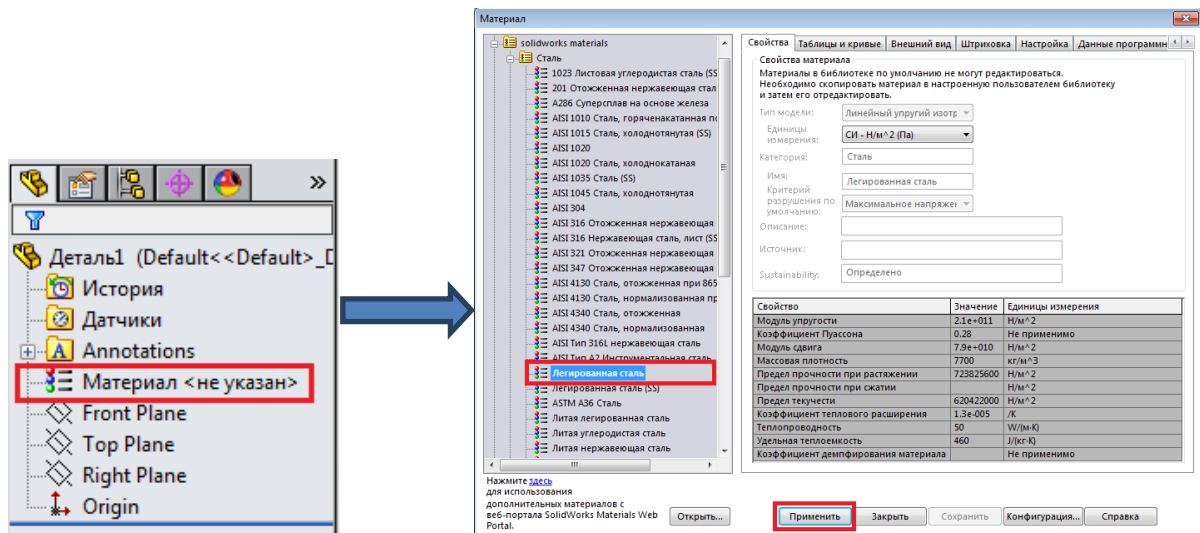


Рисунок 5.15 – Завдання матеріалу деталі

5. Закріплення деталі. Для закріплення деталі необхідно:

1) У Дереві дослідження Simulation натиснути ПКМ на **«Крепления»**



та в контекстному меню вибрати пункт **«Зафиксированная геометрия»**.

В результаті з'явиться *Менеджер властивостей «Крепление»*.

2) В графічній області вибрати поверхні двох отворів. Після цього в *Менеджері властивостей «Крепление»* в полі **«Грани, Кромки, Вершины для крепления»**  відобразяться вибрані **«Грань <1>»** і **«Грань <2>»**.

3) Натиснути **ОК** .

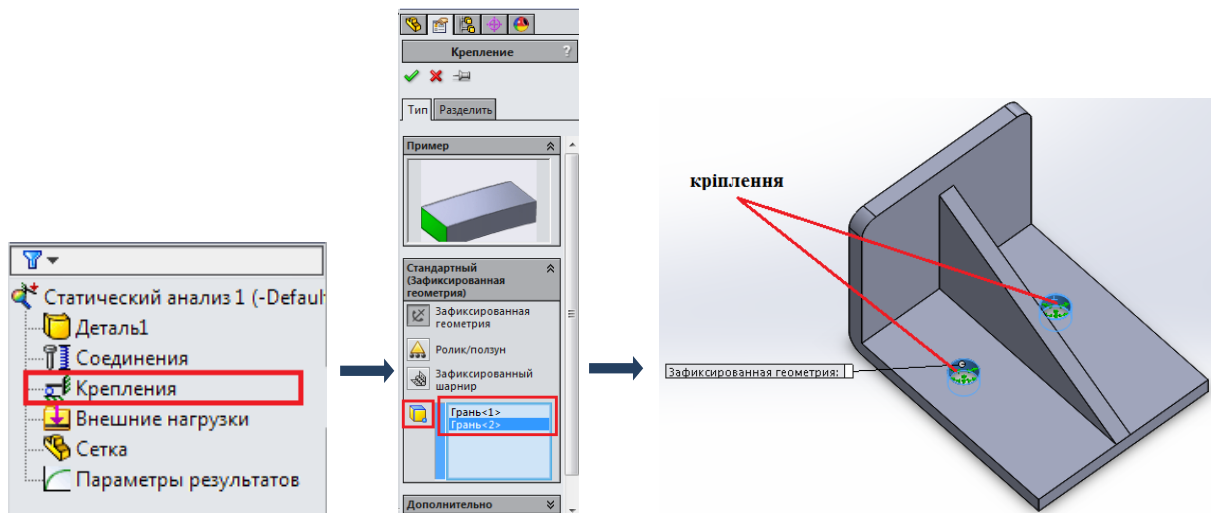


Рисунок 5.16 – Закріплення деталі

6. Прикладання навантаження до деталі. Для прикладання навантаження до деталі необхідно:

1) У Дереві дослідження Simulation натиснути ПКМ на «Внешние нагрузки»  і в контекстному меню вибираємо пункт «Давление» . В результаті з'явиться Менеджер властивостей «Давление».

2) На вкладці «Тип» в розділі «Тип» вибрати «Перпендикулярно выбранной грани».

3) У розділі «Значение давления» вибрати **psi** в меню «Единица измерения»  і ввести значення тиску **400** в поле «Значение давления» .

4) У графічній області вибрати поверхню паралельну осям двох отворів. Після цього в Менеджері властивостей «Давление». в полі «Грани для давления»  відобразиться вибрана грань.

5) Натиснути **ОК** .

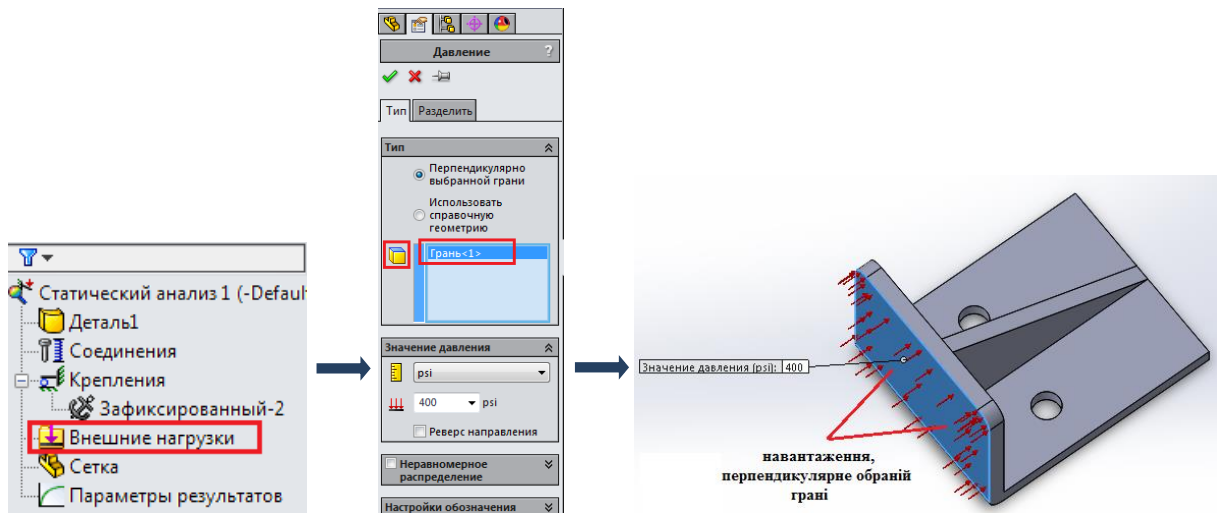


Рисунок 5.17 – Прикладання навантаження до деталі

7. Створення сітки. Для створення сітки необхідно:

- 1) У Дереві дослідження натиснути ПКМ по напису «Сетка»  і в контекстному меню вибрати пункт «Создать сетку» .
- 2) У розділі «Параметры сетки» вибрати «Стандартная сетка», «Глобальный размер» та «Допуск» будуть обчислені програмою.
- 5) У розділі «Дополнительно» для перевірки Якобіана встановити 4 точки, вибрати «Автоматические попытки для твердых тел» і задати «Число проб» рівним 3.
- 6) Натискаємо ОК .

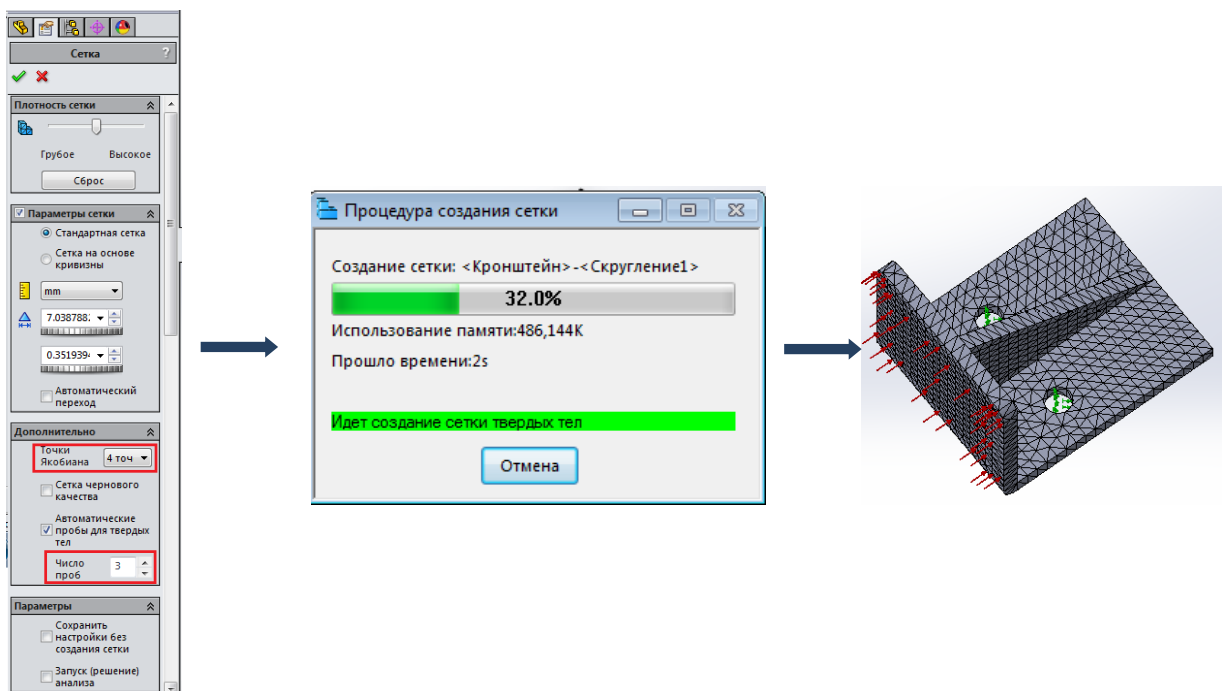


Рисунок 5.18 – Створення сітки

8. Запуск дослідження. Для запуску дослідження необхідно натиснути кнопку «Запуск»  на панелі інструментів Simulation (рисунок. 5.19). Після чого починається процес розрахунку по закінченню якого в Дереві дослідження Simulation з'являється папка «Результаты».

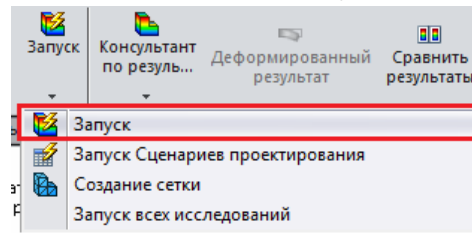


Рисунок 5.19 – Запуск дослідження

9. Результаты дослідження. Після успішного виконання дослідження в папці «Результаты» створюються епюри з результатами рішення. Характерними епюрами є **Напряжения, Перемещения і Деформации**. Додаткові епюри можна відобразити в меню після клацання ПКМ на папці «Результаты».

Нижче наведені результати дослідження

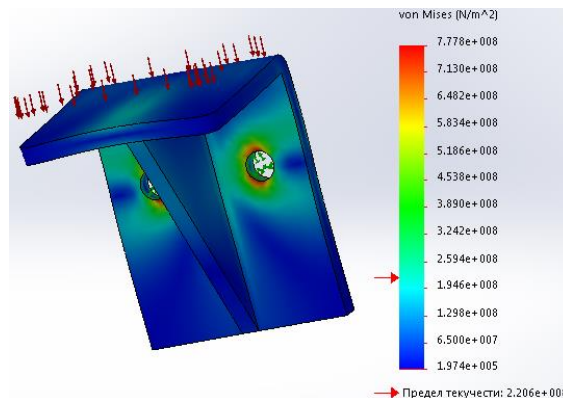


Рисунок 5.20 – Епюра еквівалентних напружень

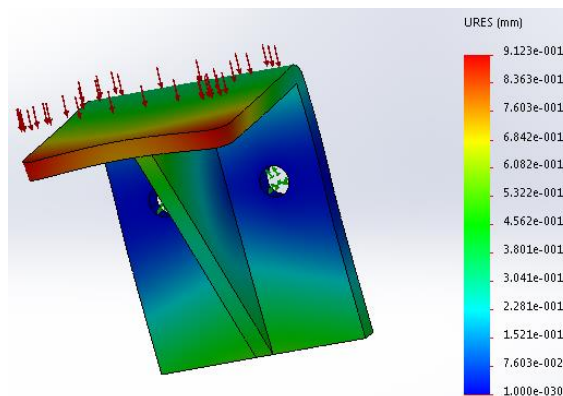


Рисунок 5.21 – Епюра результуючих переміщень

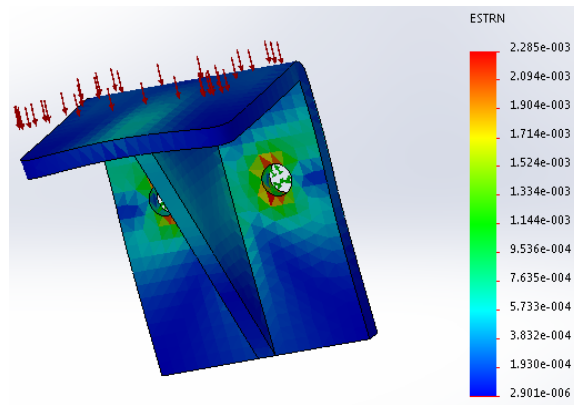


Рисунок 5.22 – Епюра еквівалентних деформацій

10. Епюра розподілу запасу міцності. Для визначення епюри перевірки запасу міцності натисніть ПКМ на **«Результаты»** і виберіть **«Определить эпюру проверки запаса прочности»** (рисунок. 5.23).

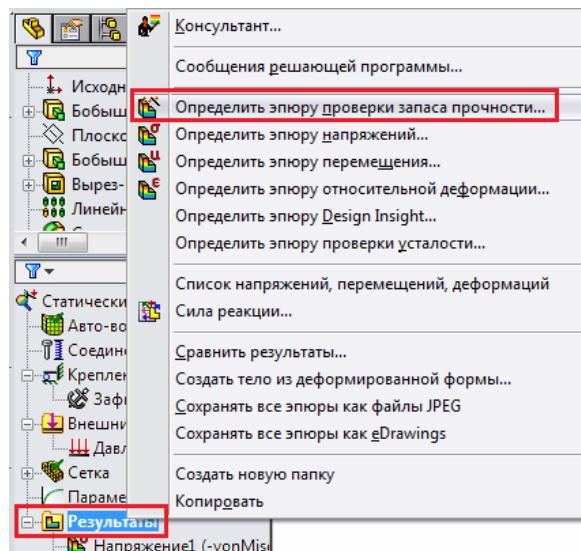


Рисунок 5.23 – Додавання епюри перевірки запасу міцності

Відкривається *менеджер властивостей «Запас прочности»*, який пропонує виконати 3 кроки для оцінки коефіцієнта запасу міцності (рисунок. 5.24).

Для побудови епюри розподілу запасу міцності використано максимальну напругу по Мізесу і встановлено межу напружень як для межі плинності.

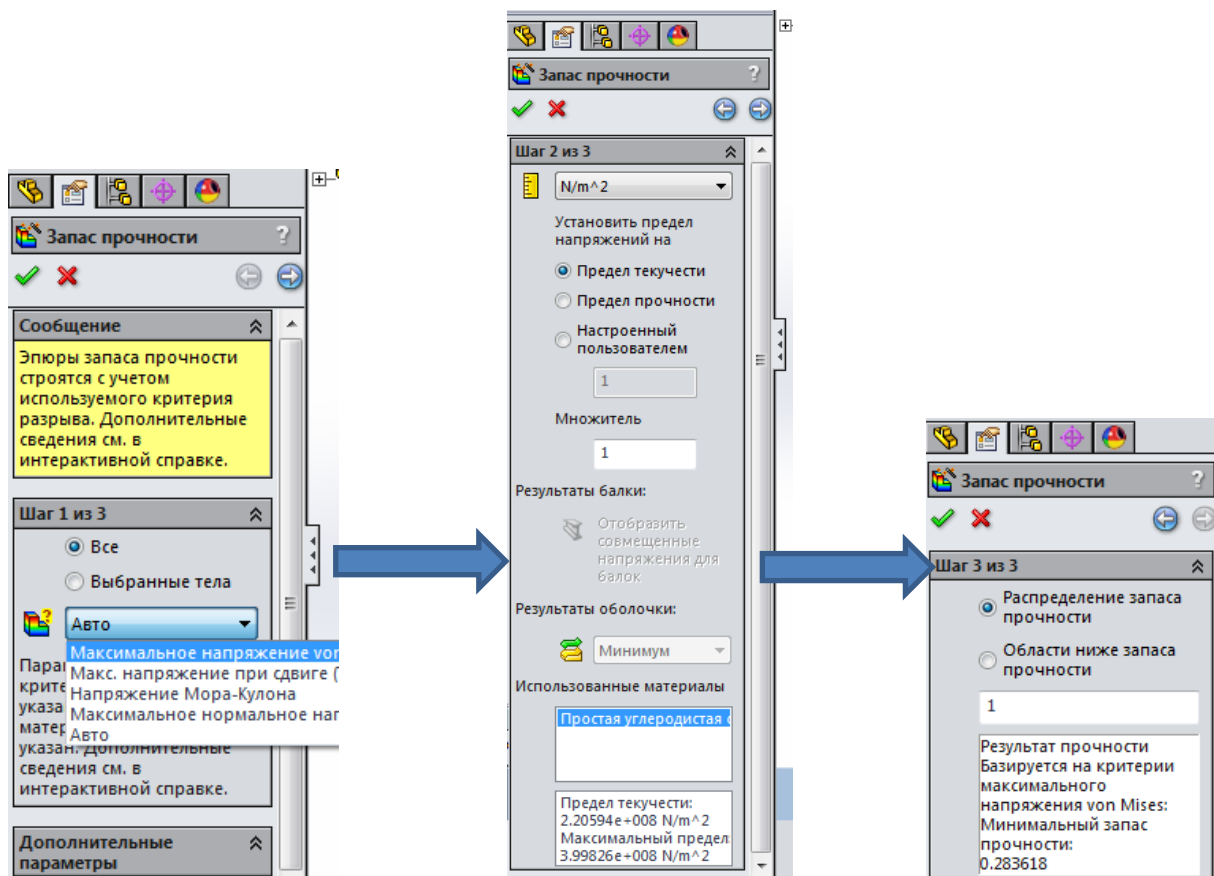


Рисунок 5.24 – Три кроки менеджера властивостей «Запас прочности»

Після проходження трьох кроків менеджера властивостей «Запас прочности» створюється епюра розподілу коефіцієнта запasu міцності (рисунок. 5.25)

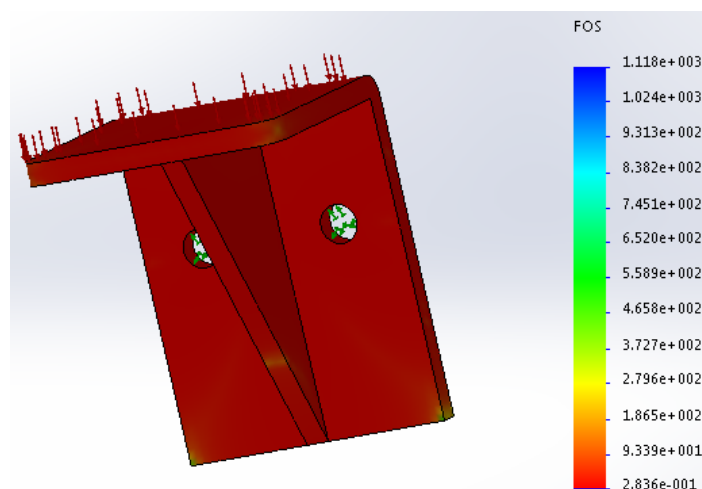


Рисунок 5.25 – Епюра розподілу коефіцієнта запasu міцності

11. Звіт дослідження. Створити **звіт дослідження** можна вибравши в меню Simulation пункт **«Отчет»** або натиснувши кнопку на панелі інструментів. В результаті з'явиться діалогове вікно **«Параметры отчёта»**.

У діалоговому вікні **«Параметры отчёта»** можна вказати розділи, які повинні міститися в звіті, дані заголовка, а також вказати папку, в яку будуть зберігатися звіти в полі **«Путь отчёта»**. Після визначення всіх параметрів натискання кнопки **«Опубликовать»** створює звіт в форматі Microsoft Word.

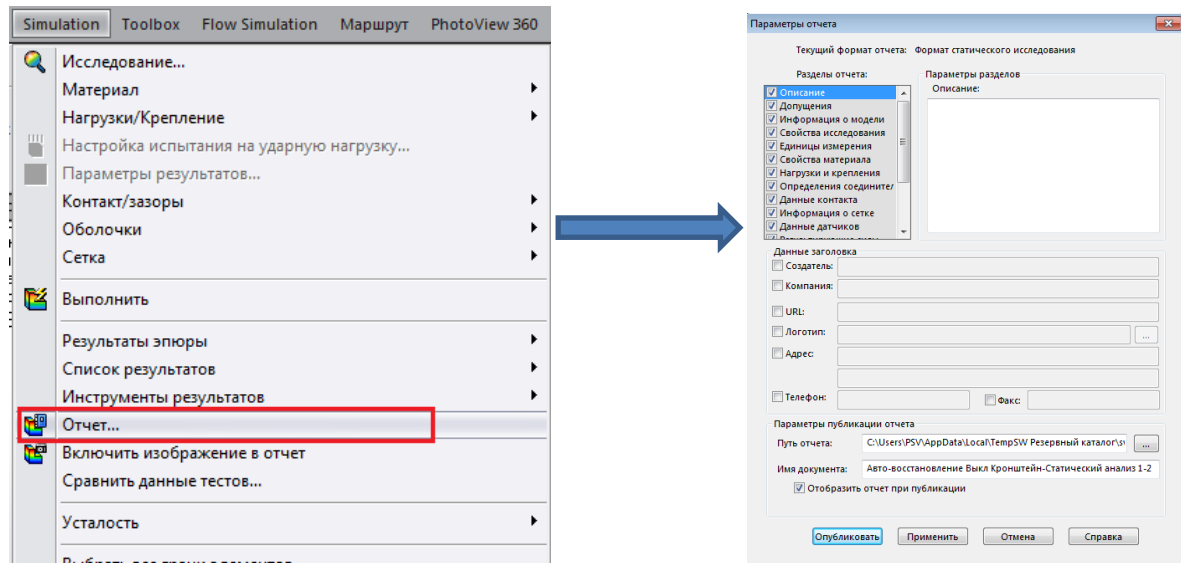


Рисунок 5.26 – Створення звіту дослідження

5.6. Контрольні запитання

1. Опишіть основні елементи інтерфейсу SolidWorks Simulation. Як активувати SolidWorks Simulation?
2. Дайте визначення методу кінцевих елементів (МКЕ) та розкрийте його суть.
3. Які критерії міцності застосовуються в SolidWorks Simulation?
4. Які типи досліджень використовуються SolidWorks Simulation?
5. Що таке граничні умови та як вони задаються?
6. Які групи кріплень розрізняють в Solidworks Simulation?
7. Які числові методи використовуються для знаходження розв'язків алгебраїчних рівнянь в Solidworks Simulation?