ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Мета роботи: ознайомлення з програмним пакетом Comsol Multiphysics і його можливостями моделювання теплових полів, отримання базових навичок роботи з ним. Створення та вивчення моделі теплового процесу в об'єкті контролю.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1. Короткі відомості про Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics - потужне інтерактивне середовище для моделювання фізичних процесів з метою вирішення задач наукового характеру. COMSOL являє собою набір основних фізичних інтерфейсів для звичайних областей застосування фізики, таких як структурний аналіз, ламінарний потік, акустика, процеси в розведених розчинах, електростатика, електричні струми, теплообмін і Джоуль нагрів. В системі COMSOL можна легко розширювати звичайні моделі для одного типу фізичних явищ в моделі мультифізики, які вирішують пов'язані явища фізики, та роблять це одночасно. В даному середовищі також є можливість математичного та фізичного моделювання з використанням набору фізичних інтерфейсів для налаштування рівнянь моделювання та інш. Також доступний набір шаблонів для класичних диференціальних рівнянь в часткових похідних: рівнянь Лапласа, Пуассона, хвильового рівняння, рівняння Гельмгольца, рівняння теплопровідності і рівняння конвективного дифузії. Сфера застосування COMSOL: електротехніка, акустика, хімічні реакції, дифузія, електромагнетизм, динамічні потоки, акумуляторні та паливні елементи, електрохімія, перенесення тепла, мікро-електромеханічні системи (MEMS), оптика, фотоніка, радіочастотні компоненти, напівпровідникові пристрої, структурна механіка, поширення хвиль та інш.

2. Створення моделі теплового процесу в середовищі COMSOL

Щоб не надто абстрагуватися від дійсності і реальних виробничих проблем, розглянемо такий об'єкт, як доменна піч (в принципі, це може бути будь-який об'єкт, що піддається термічній обробці - нагрівальні котли, водопровідні труби і т.п.).

У водонагрівачах, доменних і випалювальних печах, через вихід з ладу вогнетривкого матеріалу або теплоізоляції, утворення накипу в чавунних секціях, закупорки труб печей і казанів, накопичення гару в трубах відбувається утворення тріщин та інших дефектів в чавунних секціях печей і казанів. Заміна секції обходиться в $ 1200 ... 5000. Заміна водонагрівача - $ 8000. ... 30000. У випалювальних печах через перегрів може статися деформація оболонки, втрата підшипників, агрегатів або всього разом. Ремонт складе $ 5000 ... 100000, заміна - $ 1000000 (цифри наведені за станом на 2012 рік).

З наведеного вище випливає, що при експлуатації будь-якого об'єкта можна отримати економію тільки при якісному контролі його експлуатаційних теплових параметрів.

Нехай нам потрібно проконтролювати один з чавунних блоків печі на несуцільності. Якщо в об'єкті є чужорідне включення або несуцільність (раковина, тріщина), що має інші теплофізичні характеристики, це позначиться на його тепловому полі у вигляді локальних неоднорідностей розподілу температури.

Таким чином, нашим завданням є побудова картини розподілу температури в об’єкті контролю (ОК).

*Постановка задачі*

Оскільки ця робота носить навчальний характер, то знехтуємо реальними розмірами чавунного блоку (для спрощення розрахунків у зв'язку з обмеженими можливостями комп'ютера та економії часу). Для початку, створимо двовимірну модель ОК.

Вона представлятиме собою прямокутник 8х4 см (перетин чавунного блоку) з несуцільністю у вигляді повітряної раковини діаметром 1 см. На одну з граней (припустимо верхню) впливає температура печі 873К, нехай температура зовнішнього середовища постійна і дорівнює 293К. Решта необхідних параметрів вказані в довідкових таблицях (табл. 1, 2 та 3)

*Хід роботи*

Робота проводиться на базі програмного пакету Comsol Multiphysics версії 4.3 (ярлик на «Робочому столі» комп’ютера).

*Вибір початкових налаштувань моделювання:*

1. У вікні вибору налаштувань моделі Model wizard обрати розмірність простору 2D і натиснути «Далі» - 
2. Обрати фізику моделі Heat Transfer > Heat Transfer in Solid (ht). Натиснути «Далі»
3. Обрати область аналізу Time Dependent. Натиснути Finish - 

*Створення геометрії моделі:*

1. У вікні налаштувань моделі Model Builder обрати Model 1 > Geometry 1, на вкладці Units обрати розмірність геометрії cм.
2. У вікні Model Builder на Model 1 > Geometry 1 натиснути праву клавішу миші і обрати Rectangle.
3. У вікні налаштувань Rectangle вказати розміри ОК (8х4 см) і натиснути Build Selected. Координати положення ОК залишити без змін (рис. 1).



Рис. 1. Вікно налаштувань геометрії об’єкта (прямокутник)

1. У вікні Model Builder на Model 1 > Geometry 1 натиснути праву клавішу миші і обрати Circle.
2. У вікні налаштувань Circle вказати розміри дефекту (d=1см), кооридати центра радіуса дефекту х=4, y=3 (рис. 2). Натиснути Build All.



Рис. 2. Вікно налаштувань геометрії об’єкта (круг)

*Вибір матеріалів ОК та дефекту:*

1. У вікні Model Builder на Model 1 > Materials натиснути праву клавішу миші і обрати бібліотеку матеріалів – Open Material Browser.
2. У полі пошуку вписати Cast Iron (чавун) і виконати пошук. Виділити лівою кн. миші матеріал і додати його до налаштувань моделі (рис. 3).



Рис. 3. Вікно бібліотеки матеріалів

1. У вікні налаштувань матеріалу вказати елемент геометрії, що відповідає ОК. Автоматично в даному вікні вказано всі елементи геометрії, тому елемент, що відповідає дефекту необхідно видалити з переліку елементів. Обравши елемент під номером 2, дефект у вікні відображення моделі змінить свій колір і може бути видалений кнопкою .
2. На вкладці характеристик матеріалу перевірити значення коефіцієнта теплопровідності, питомої теплоємності та щільності матеріалу ОК (рис. 4). Дані вказаних характеристик для деяких матеріалів додано до таблиць 1, 2 та 3.



Рис. 4. Вікно налаштувань матеріалу

1. У вікні Model Builder на Model 1 > Materials натиснути праву клавішу миші і обрати бібліотеку матеріалів – Open Material Browser.
2. У полі пошуку вписати Air (повітря) і виконати пошук. Виділити лівою кн. миші матеріал і додати його до налаштувань моделі (рис. 3).
3. У вікні налаштувань матеріалу вказати елемент геометрії, що відповідає дефекту. В даному вікні може бути не вказано жодного елемента геометрії, тому елемент, що відповідає дефекту необхідно додати до переліку елементів. У вікні відображення моделі вибрати елемент що відповідає дефекту і натиснути . В переліку елементів геометрії буде додано елемент під номером 2.
4. На вкладці характеристик матеріалу перевірити значення коефіцієнта теплопровідності, питомої теплоємності та щільності матеріалу дефекту. Дані вказаних характеристик для деяких матеріалів додано до таблиць 1, 2 та 3.

*Налаштування параметрів теплового випромінювання:*

1. Перевірити початкову температуру елементів моделі: у вікні Model Builder обрати Model 1 > Heat Transfer in Solids > Initial Values 1, на вкладці налаштувань початкових умов для елементів моделі ОК (під номером 1) та дефект (під номером 2) в полі Initial Values > Temperature має бути 293.15 К.



Рис. 5 Налаштування початкових умов для елементів моделі

1. У вікні Model Builder на Model 1 > Heat Transfer in Solids натиснути праву клавішу миші і обрати елемент Temperature.
2. В поле елементів моделі Boundary Selection додати елемент, що відповідає верхній грані ОК – у вікну відображення моделі виділити лівою кн. миші верхню грань поверхні ОК і натиснути  (або ж натиснути кнопку вставки елемента , у відкритому вікні вставки вписати номер грані – 3 і натиснути ОК).
3. В полі Temperature вікна налаштувань вписати 873К (рис.6).



Рис. 6. Температурні налаштування грані ОК

Для найпростіших моделей, на першому етапі попереднього розрахунку можна задати сітку за замовчуванням: у вікні Model Builder обрати Model 1 > Mesh1, не змінюючи автоматичних налаштувань натиснути Build All.

*Параметри моделювання:*

1. У вікні Model Builder обрати Study 1 > Step 1: Time Dependent. У вікні налаштувань в полі Times вказати час моделювання від 0с до 30с з кроком 1с - range (0,1,30).
2. Перейти у вікні Model Builder до Study 1 та натиснути Compute.

*Обробка та візуалізація результатів*

1. У вікні Model Builder обрати Results > Temperature > Surface. У вікні налаштувань в меню Coloring and Style в полі Color Table обрати Rainbow. Результат моделювання:

Рис. 7. Розподіл теплового поля в об'єкті з дефектом круглої форми

*Побудова термопрофілю підповерхневої області над дефектом:*

1. У вікні Model Builder на Results > Data Sets натиснути праву клавішу миші і обрати Cut Line 2D. У вікні налаштувань передбачити:



Рис. 8. Налаштування координат точок

1. У вікні Model Builder на Results натиснути праву клавішу миші і обрати 1 D Plot Group. Далі у вікні Model Builder на Results > 1 D Plot Group 3 натиснути праву клавішу миші і обрати Line Graph.
2. В налаштуваннях Line Graph обрати набір даних Cut Line 2D.
3. В полі Time Selection обрати варіант From list та виділити відліки часі, в яких необхідно отримати рішення (можна виділити весь діапазон, але щоб не завантажувати графік, в даному прикладі це зроблено з кроком 3с, утримуючи клавішу Ctrl), рис.9.
4. В інших меню та підменю можна ввести налаштування графіка – підписи осей, назва графіку (Термопрофіль поверхності ОК).



Рис. 9. Налаштування параметрів графіка

1. Після натискання кнопки Plot отримуємо розподіл температурного поля підповерхневої області ОК в різні моменти часу (рис.10).



Рис. 10. Термопрофіль поверхні ОК в задані моменти часу

Стає очевидним, що наявність дефекту викликає нерівномірність температурного поля на поверхні ОК. У кожен наступний момент часу перепад температури між точкою, де спостерігається пік температури (х = 0.04), і фіксованою точкою на ОК (наприклад x = 0.06) спочатку збільшується, а потім зменшується: ΔT≈80; 110; 100; 90; ... . Максимальне значення перепаду температур досягається на 3 с., з чого можна зробити висновок, що нагрів ОК при даному тепловому потоці можна припинити на ≈5-7с.

Як видно з графіків, дефект чинить значний опір тепловому потоку, який, поширюючись вглиб виробу, обтікає дефект оточуючими шарами основного матеріалу. При цьому має місце накопичення тепла в шарі над дефектом і його нестачу в шарі за ним, що проявляється в локальному підвищенні температури на поверхні, що нагрівається. Таким чином, спостерігається локалізація температурного перепаду на ділянці над дефектом.

*Побудова графіка локальної зміни температури від часу*

1. У вікні Model Builder на Results > Data Sets натиснути праву клавішу миші і обрати Cut Point 2D. У вікні налаштувань вказати координати точки в середині ОК над бездефектною ділянкою (х=1, y=3.5).
2. У вікні Model Builder на Results > Data Sets натиснути праву клавішу миші і обрати Cut Point 2D. У вікні налаштувань вказати координати точки в середині ОК над дефектом поблизу поверхні (х=4, y=3.5).
3. У вікні Model Builder на Results натиснути праву клавішу миші і обрати 1 D Plot Group. Далі у вікні Model Builder на Results > 1 D Plot Group 4 натиснути праву клавішу миші і обрати Point Graph. В налаштуваннях в полі вибору значень обрати Cut Point 2D 1.
4. У вікні Model Builder на Results > 1 D Plot Group 4 натиснути праву клавішу миші і обрати Point Graph. В налаштуваннях в полі вибору значень обрати Cut Point 2D 2.
5. Натиснути кнопку Plot. Отриманий результат:



Рис. 11. Залежність температури від часу над дефектною і бездефектною ділянками

Для більшої наочності і точності графічно відобразимо різницю наведених залежностей і знайдемо максимальний стрибок температур:

1. У вікні Model Builder на Results > Data Sets натиснути праву клавішу миші і обрати Join. У вікні налаштувань вказати об’єднання даних моделювання для дефектної (Cut point 2D 2) та бездефектної зон (Cut point 2D 1) шляхом віднімання:



Рис. 12. Налаштування характерних точок для графіків

1. У вікні Model Builder на Results натиснути праву клавішу миші і обрати 1 D Plot Group. В налаштуваннях 1 D Plot Group 5 вказати дані для побудови в полі Data set: Join 1.
2. У вікні Model Builder на Results > 1 D Plot Group 5 натиснути праву клавішу миші і обрати Point Graph. В налаштуваннях в полі вибору значень обрати Join 1 та час моделювання до 15с (рис.13):



Рис. 13. Налаштування параметрів графіка

1. Натиснути кнопку Plot. Отриманий результат:



Рис. 14. Графік для визначення оптимального часу нагріву об'єкта контролю

При даних параметрах ОК і умовах теплового впливу, оптимальний час проведення контролю це 2-3 секунди. З графіка також видно, що Т має нестаціонарний характер і після 3-ї секунди починає зменшуватися.

Використовуючи вищеописану методику аналізу моделі можна також оцінити час контролю, необхідний для виявлення дефекту, що залягає на певній глибині. Для цього потрібно з певним кроком переміщати центр дефекту, і фіксувати, як при цьому змінюється характер теплового поля над дефектом і динамічна характеристика поля локальної області об'єкта.

ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання на лабораторну роботу

1. Змінити форму дефекту (на еліпс або іншу).
2. У вікні Model Builder на Model 1 > Heat Transfer in Solids > Temperature 1 натиснути праву клавішу миші і обрати елемент Disable.
3. У вікні Model Builder на Model 1 > Heat Transfer in Solids натиснути праву клавішу миші і обрати елемент нагрів об’єкта за рахунок теплового потоку Heat Flux.
4. Нехай верхня межа ОК знаходиться під дією теплової потік q = 50 \* 105 Вт/м² (граничні умови 2-го роду), а інші три грані беруть участь в теплообміні з навколишнім середовищем і мають коефіцієнт тепловіддачі h = 20 Вт/м²К (граничні умови 3-го роду). Граничні умови на межі розділу двох середовищ - «ОК-дефект» встановлюються програмою автоматично.
5. Для встановлення граничних умов перейдемо до вікна налаштувань Heat Flux 1, виділимо верхню межу ОК (у вікну відображення моделі виділити лівою кн. миші верхню грань поверхні ОК і натиснути ) та встановити значення теплового потоку q0=50e5 Вт/м2 (рис. 15)



Рис. 15. Налаштування параметрів теплового потоку на верхній грані ОК

1. У вікні Model Builder на Model 1 > Heat Transfer in Solids натиснути праву клавішу миші і обрати елемент нагрів об’єкта за рахунок теплового потоку Heat Flux.
2. Для встановлення граничних умов перейдемо до вікна налаштувань Heat Flux 2, виділимо бокові та нижню грані ОК (у вікну відображення моделі виділити лівою кн. миші верхню грань поверхні ОК і натиснути ) та встановити значення коефіцієнта тепловіддачі h = 20 Вт/м²К. Температура навколишнього середовища встановлюється в полі External temperature – 293К (рис. 16).



Рис. 16. Налаштування параметрів тепловіддачі на бокових та нижній гранях ОК

1. Відобразити розподіл теплового поля в об'єкті.
2. Побудувати термопрофіль поверхні ОК.
3. Побудувати графік залежності температури від часу над дефектною і бездефектною ділянками.
4. Визначити оптимальний час проведення ОК.
5. Знайти залежність часу контролю і глибини залягання дефекту при заданих параметрах ОК і температурних умовах.
6. Дослідити вплив вибору розміру сітки Mesh на результати моделювання.
7. Дослідити вплив вибору розміру часового кроку моделювання.
8. Зробити письмові висновки по роботі.

Додаток 1. Теплофізичні параметри деяких матеріалів

Таблиця 1. Коефіцієнти теплопровідності деяких речовин (k)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Речовина | Вт/мК | Речовина | Вт/мК |
| Вода | 0,68 | Чавун | 46,5 |
| Бензин | 0,136 | Цегла | 0,714 |
| Ртуть | 8,976 | Скло | 0,667 |
| Спирт | 0,204 | Порцеляна | 1,156 |
| Повітря | 0,029 | Папір | 0,157 |
| Алюміній | 251,6 | Мідь | 460,4 |
| Залізо | 80,24 | Срібло | 513,4 |
| Золото  | 350,9 | Сталь | 51,68 |

Таблиця 2. Питома теплоємність деяких речовин (С)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Речовина | кДж/кгК | Речовина | кДж/кгК |
| Вода | 4,19 | Чавун | 0,5 |
| Бензин | 2,05 | Цегла | 0,88 |
| Ртуть | 0,138 | Скло | 0,67 |
| Спирт | 2,47 | Порцеляна | 1,1 |
| Повітря | 1,0 | Папір | 1,5 |
| Алюміній | 0,92 | Мідь | 0,4 |
| Залізо | 0,46 | Срібло | 0,25 |
| Золото  | 0,13 | Сталь | 0,5 |

Таблиця 3. Густина деяких речовин (ρ).

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Речовина | кг/м3 | Речовина | кг/м3 |
| Вода | 1000 | Чавун | 7850 |
| Бензин | 710-750 | Цегла | 1800 |
| Ртуть | 13546 | Скло | 2400-2700 |
| Спирт | 790 | Порцеляна | 2200-2500 |
| Повітря | 1,293 | Папір | 700-1200 |
| Алюміній | 2700 | Мідь | 8940 |
| Залізо | 7874 | Срібло | 10500 |
| Золото  | 19320 | Сталь | 7700-7900 |