

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет
науки і технологій

Кафедра обробки металів тиском
ім. акад. О. П. Чекмарьова

В авторській редакції

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ

Навчально-наочні рекомендації
до виконання індивідуального завдання

Електронне видання

ДНІПРО
2024

Упорядник:
В. В. Бояркін

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми
«Обробка металів тиском»
Протокол № 9 від 31.05.2024

О 60 Оптимізація процесів обробки металів : навчально-наочні рекомендації до виконання індивідуального завдання / упоряд. В. В. Бояркін ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2024. – 23 с.

Навчально-наочні рекомендації призначені для використання студентами другого (магістерського) рівня освіти спеціальності 136 Металургія під час виконання індивідуального завдання з дисципліни «Оптимізація процесів обробки металів».

Навчально-наочні рекомендації містять основні теоретичні положення для засвоєння матеріалу, інструкції до виконання, вимоги до аналізу результатів та оформлення індивідуального завдання.

Іл. 20. Табл. 1. Бібліогр.: 4 назви.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ.....	5
2 ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ НАГРІВУ ЗАГОТОВКИ ПЕРЕД ОБРОБКОЮ ТИСКОМ.....	8
2.1 Теоретичні відомості.....	8
2.2 Створення комп'ютерної моделі, проведення експерименту та аналіз отриманих даних.....	10
3 ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ.....	21
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	22

ВСТУП

Виконання індивідуального завдання є необхідною умовою отримання підсумкової оцінки з дисципліни «Оптимізація процесів обробки металів». Індивідуальне завдання виконується після відпрацювання практичних занять.

Навчальна дисципліна забезпечує набуття таких програмних компетентностей:

- здатність проводити дослідження на відповідному рівні.
- здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.
- здатність забезпечувати якість в металургії.
- здатність аналізувати і вдосконалювати технологічні процеси в металургії.
- здатність оцінювати технічні, економічні, екологічні, безпекові та інші ризики при плануванні або впровадженні нових технологічних процесів.
- здатність приймати ефективні рішення в металургії.
- здатність визначати параметри деформаційно-термічної обробки металів та сплавів для отримання необхідної форми, структури та фазового складу металопродукції
- здатність досліджувати процеси обробки металів тиском для визначення раціональних параметрів технології виробництва металовиробів з огляду на ресурсозбереження та сталий розвиток промисловості.
- здатність застосовувати систему фундаментальних знань (математичних, інженерних і економічних) для ідентифікації, формулювання та вирішення технічних і технологічних проблем в області організації, планування і технології виробництва готової продукції з кольорових металів і сплавів.
- здатність застосовувати метод скінчених елементів (МСЕ, FEM) для розробки фізико-математичних моделей технологічних об'єктів і технологічних процесів та їх подальшого аналізу і оптимізації.

Очікувані результати навчання за навчальною дисципліною:

- аналіз процесів обробки металів тиском та термічної обробки, визначення параметрів оптимізації та факторів, які на них впливають, для подальшого дослідження відповідних процесів;
- проведення експерименту із застосуванням комп'ютерних моделей для оцінки впливу факторів, встановлення відповідних взаємозв'язків та оптимізації процесів обробки металів тиском та термічної обробки.

Результати навчання, досягнуті в результаті вивчення дисципліни, застосовуються при проходженні переддипломної практики та підготовці кваліфікаційної роботи.

1 ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ

Пошук оптимальних умов функціонування є необхідним для розв'язання задачі оптимального управління складним технологічним процесом [1]. Існують 3 етапи формалізації задачі оптимізації:

- формулювання задачі;
- знаходження оптимальних умов функціонування на основі алгоритму;
- реалізація визначених умов.

Програмою навчальної дисципліну передбачено опанування методів та набуття навичок оптимізації процесів обробки тиском і термічної обробки металів [2].

Загальні визначення.

При вирішенні задачі оптимізації використовуються математичні моделі об'єкта дослідження. Математична модель – це рівняння, що зв'язує параметр оптимізації з факторами. Кожен фактор може приймати в досліді одне з декількох значень (рівнів).

Параметр оптимізації.

Параметр оптимізації – це реакція (відгук) на вплив факторів, які визначають поведінку системи, що вивчається. Параметри оптимізації бувають економічними, техніко-економічними, техніко-технологічними, статистичними, психологічними та ін.

Параметр оптимізації повинен бути ефективним з точки зору досягнення мети; універсальним; кількісним і виражатися одним числом; статистично ефективним; мати фізичний зміст, простим; існуючим для всіх станів.

У тих випадках, коли виникають труднощі з кількісною оцінкою параметрів оптимізації, доводиться звертатися до ранговому підходу. В ході дослідження можуть змінюватися апріорні уявлення про об'єкт дослідження, що призводить до послідовного підходу при виборі параметра оптимізації.

З багатьох параметрів, що характеризують об'єкт дослідження, тільки один, часто узагальнений, може служити параметром оптимізації. Решта розглядаються як обмеження.

Фактори.

Фактори – це змінні величини, відповідні способам впливу зовнішнього середовища на об'єкт. Вони визначають як сам об'єкт, так і його стан. Вимоги до факторів: керованість і однозначність. Управляти фактором – значить встановити потрібне значення і підтримувати його постійним протягом досвіду або змінювати за заданою програмою.

Фактори повинні безпосередньо впливати на об'єкт дослідження. Важко керувати фактором, якщо він є функцією інших змінних, але в плануванні експерименту можуть брати участь складні фактори, такі, як логарифми, співвідношення і ін.

Вимоги до сукупності факторів: сумісність і відсутність лінійної кореляції. Якщо який-небудь істотний фактор пропущено, це призведе до неправильного визначення оптимальних умов або до великої помилки досвіду. Фактори можуть бути кількісними або якісними.

Вибір моделі.

Для створення моделі будується поверхня відгуку в факторному просторі, що задається прямокутними декартовими координатами, по осях яких відкладаються в деякому масштабі значення (рівні) чинників і значення параметрів оптимізації. У цій області кожному можливному набору значень факторів відповідає єдине значення параметра оптимізації.

Математична модель потрібна для передбачення напрямку градієнта. Така модель дозволяє уникнути повного перебору станів об'єкта і тим самим зменшити кількість дослідів, необхідних для відшукування оптимуму.

Використовуючи ці передумови, можна запропонувати процедуру пошуку оптимуму, засновану на шаговому принципі. Цей принцип говорить: проведи короткі (наскільки можливо) серії дослідів, за їх результатами створи математичну модель, використовуй модель для оцінки градієнта, став нові досліді тільки в цьому напрямку. Виходить циклічний процес, який закінчується при попаданні в область, близьку до оптимуму («майже стаціонарну» область).

До конкретних вимог до моделі відносяться адекватність і простота. Під адекватністю розуміється здатність моделі передбачати результати експерименту в деякій області з необхідною точністю. Після реалізації дослідів можна перевірити адекватність моделі. Необхідно вибрати ступінь полінома і підобласть, в якій треба починати експеримент. Ці вибори пов'язані між собою. Однак важливо, що в принципі можливий такий вибір області, при якому лінійна модель виявиться адекватною. Цього достатньо, щоб оцінити градієнт. Вибір області пов'язаний з тими інтуїтивними рішеннями, які приймає експериментатор на кожному етапі роботи. Область фіксується заздалегідь. Треба послідовно підвищувати ступінь полінома до тих пір, поки не знайдеться адекватна модель.

Факторний експеримент.

Локальна область проведення експерименту обирається в два етапи: визначення основного рівня і інтервалів варіювання. Основний (нульовий) рівень - багатовимірна точка в факторному просторі, що задається комбінацією рівнів факторів. Побудова плану експерименту зводиться до вибору експериментальних точок, симетричних відносно основного рівня. При встановленні основного рівня доводиться розглядати різні ситуації. Ситуації відрізняються інформацією про найкращі точки і визначають можливі рішення.

Наступний етап – вибір інтервалів варіювання факторів. Для кожного фактора визначаються два рівні, на яких він варіюється в експерименті. Рівні факторів зображуються двома точками на координатній осі, симетричними щодо основного рівня. Один з рівнів – верхній, інший – нижній. Інтервалом варіювання факторів називається деяке число (своє для кожного фактора), додаток якого до основного рівня дає верхній, а віднімання – нижній рівень.

Експеримент, в якому реалізуються всі можливі поєднання рівнів, називається повним факторним експериментом. Якщо число рівнів дорівнює двом, то це повний факторний експеримент типу 2. Умови експерименту представляють у вигляді таблиці – матриці планування, де рядки відповідають різним дослідом, а стовпці – значенням факторів.

Коефіцієнти, обчислені за результатами експерименту, вказують на силу впливу факторів. Ефект фактора чисельно дорівнює подвоєному коефіцієнту. У тих випадках, коли ефект одного фактора залежить від рівня, на якому знаходиться інший фактор, говорять про наявність ефекту взаємодії двох факторів. Для його кількісної оцінки отримують стовпець творів цих факторів і звертаються з ним як з вектор-стовпцем будь-якого фактора.

Проведення експерименту.

Ретельна підготовка до дослідів сприятиме зменшенню помилки дослідів. Помилка досліду є сумарною величиною, що складається з ряду помилок: помилок при вимірюванні факторів, параметра оптимізації і помилок при проведенні досвіду. Помилки поділяються на випадкові і систематичні. Для того щоб компенсувати вплив систематичних помилок, досліді потрібно рандомізувати в часі. Якщо експериментатору заздалегідь відомі джерела систематичних помилок, наприклад, відома кількість різних партій сировини, слід розбивати матрицю планування на блоки.

Відтворюваність експерименту є одним з найважливіших вимог планування експерименту.

Обробка результатів експерименту.

Метод найменших квадратів – ефективний і простий спосіб отримання оцінок коефіцієнтів регресії. Ці оцінки призводять до мінімально можливої залишкової суми квадратів і в цьому сенсі є оптимальними. МНК стає частиною регресійного аналізу при перевірці статистичних гіпотез. При цьому повинні виконуватися наступні постулати: 1) параметр оптимізації – випадкова величина з нормальним законом розподілу; 2) дисперсія параметра оптимізації не залежить від значень параметра оптимізації; 3) значення факторів – невідповідні величини; 4) фактори не корелюються.

Крім перевірки адекватності слід проводити перевірку значущості коефіцієнтів. Ця перевірка здійснюється за допомогою критерію Стьюдента.

Прийняття рішень.

Інтерпретація – складний процес, який проводиться в кілька етапів. Він включає оцінку величини і напрямки впливу окремих факторів і їх взаємодій, зіставлення впливу сукупності факторів, перевірку правильності апріорних уявлень і в деяких випадках перевірку і висунення гіпотез про механізм процесу.

Поєднання можливих дій з різними експериментальними ситуаціями призводить до десяткам тисяч можливих рішень. Тому обговорюються тільки «типові» рішення. Ситуації розрізняються по адекватності і неадекватності моделі, значущості і не значущості коефіцієнтів регресії, положенню оптимуму.

2 ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ НАГРІВУ ЗАГОТОВКИ ПЕРЕД ОБРОБКОЮ ТИСКОМ

2.1 Теоретичні відомості

Формулювання задачі

Перед гарячою обробкою тиском заготовка нагрівається до заданої температури та передається до того чи іншого агрегату обробки тиском. Часто заготовку перегрівають для компенсації її охолодження перед початком обробки, що веде до нераціональних витрат енергії. Метою виконання індивідуального завдання є створення комп'ютерної моделі процесу нагріву заготовки, аналіз та визначення оптимальної (мінімальної) температури нагріву для забезпечення необхідної температури заготовки перед початком обробки тиском.

Знаходження оптимальних умов

Для виконання індивідуального завдання може бути використаний модуль Workbench програмного пакету Ansys Student, який для навчальних цілей може бути завантажено з офіційного вебсайту компанії Ansys [3]. Розрахунки проводяться з використанням методу скінчених елементів. Застосування Workbench робить моделювання більш наочними, а деякі маніпуляції, зокрема, настройку контактних пар, управління сіткою кінцевих елементів, більш простими, що важливо для користувачів-початківців [4]. Workbench більш адаптивний до різних пакетів CAD і CAE, має вбудований генератор звітів. Однак слід зазначити, що поки Workbench не надає користувачеві всіх можливостей Ansys і автоматизує деякі важливі операції, наприклад вибір типу кінцевого елемента, що не завжди буває зручним та ін. Компанія Ansys інтенсивно розвиває Workbench як в частині вдосконалення графічного інтерфейсу, так і в частині розширення можливостей платформи.

Центральним об'єктом при роботі в Workbench є проєкт, під яким розуміється сукупність геометричних, фізичних та скінченоелементних моделей тіл даної задачі, а також результатів чисельного рішення. Проєкт може складатися з одного або декількох блоків, що реалізують окремі види інженерного аналізу. У свою чергу, блок складається з елементів – структурних частин блоку, що відповідають за певний етап аналізу. Можна виділити наступні етапи створення моделі:

- розробка моделі (препроцесинг). На даному етапі здійснюється підготовка геометричній моделі, завдання матеріалу і його властивостей, генерація звичайно-елементної сітки, визначення фізичних умов моделювання. Кінцевим результатом етапу є модель, підготовлена для чисельного рішення;

- настройка модуля розрахунку і рішення. На даному етапі задаються необхідні настройки модуля розрахунку, параметри, що забезпечують збіжність ітераційного процесу, і запускається розрахунок. Кінцевим результатом етапу є чисельне рішення, отримане із заданою точністю;

- обробка результатів (постпроцесинг). На даному етапі отримане чисельне рішення задачі використовується для візуалізації розподілу необхідних фізичних величин (напружень, деформацій, температур та ін.). Кінцевим

результатом етапу є набір графіків, анімацій, масивів значень, що представляють необхідні результати вирішення завдання.

На першому етапі (препроцесинг) створюється основа скінчено-елементної моделі досліджуваного об'єкта.

Цей етап включає в себе нижченаведені процедури:

1. Встановлюється фізичний тип процесу (механіка деформованого твердого тіла, теплопередача, гідродинаміка і ін.), проводиться відповідна настройка програми.

2. Вибирається тип кінцевого елемента в залежності від розмірності об'єкта та інших його властивостей. Можуть бути задані деякі характеристики елемента.

3. Вибирається матеріал об'єкта і вказуються всі його необхідні властивості. Властивості можуть бути задані з клавіатури або імпортовані з бібліотеки матеріалів Ansys. Завдання властивостей визначає модель матеріалу (лінійно-пружний, пружно-пластичний, білінійний та ін.), що впливає на вибір визначальних рівнянь МСЕ.

4. Будується геометрична твердотільна модель об'єкта. В Workbench використовується модуль Design Modeler. Геометрична модель може бути експортована з будь-якого CAD-пакета.

5. Геометрична модель розбивається на кінцеві елементи. При розбивці можуть бути задані різні параметри сітки.

6. У разі контактної задачі встановлюються контактні пари, визначається модель контакту і її характеристики.

Другий етап – накладення на модель необхідних фізичних умов і рішення задачі – складається з трьох основних етапів:

1. Задаються граничні умови – сили, переміщення (зв'язку) та ін.

2. Вибирається тип аналізу (статичний, динамічний, модальний і ін.). Можливий вибір методу розв'язання системи рівнянь МСЕ і завдання параметрів обчислювальних процедур (числа кроків навантаження, числа ітерацій і ін.).

3. Здійснюється рішення системи рівнянь, отриманої методом МСЕ. В результаті рішення формується файл результатів, який містить вектор знайдених ступенів свободи (вузлових переміщень, вузлових температур і ін.).

Третій етап (постпроцесинг) – аналіз результатів розрахунку. Розраховані МСЕ фізичні величини (переміщення, деформації, напруження, температури і ін.) можуть бути представлені в графічному вікні Ansys в вигляді рисунків, таблиць, графіків, анімацій. Всі ці результати можна записати у відповідні файли.

При виконанні розглянутих вище етапів розв'язання задачі в пам'яті комп'ютера створюється база даних, яка містить повну інформацію про модель. Ці дані можна зберегти в бінарному файлі і використовувати для продовження аналізу.

Для проведення інженерного аналізу та оптимізації відповідних процесів з використанням створеної моделі використовується модуль Response Surface Optimization. Модуль дозволяє інженерам проводити планування та аналіз результатів експерименту методом Design of Experiments (DOE) для будь-якого розрахунку, виконаного в середовищі Workbench. DOE об'єднано з

інструментами створення і аналізу поверхонь відгуку (Response Surface) та оптимізації.

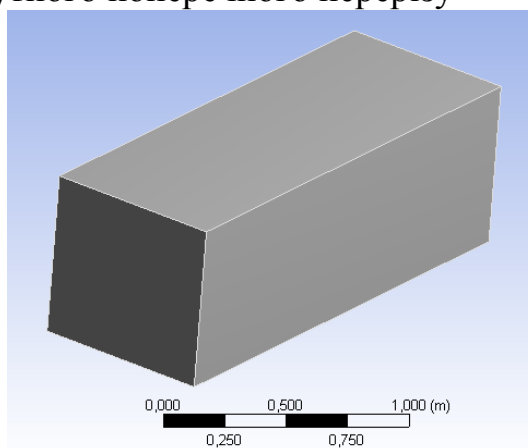
Виконання роботи складається з наступних складових:

- постановка та проведення експерименту;
- побудова поверхні відгуку;
- отримання мінімально достатнього значення температури нагріву при заданому часі нагріву, виходячи із заданої мінімально можливої температури заготовки після охолодження при заданому часі охолодження.

2.2 Створення комп'ютерної моделі, проведення експерименту та аналіз отриманих даних

Вихідні дані:

Заготовка прямокутного поперечного перерізу



h	b	l	матеріал	t_H	T_H	$T_{H \min}$	$T_{H \max}$	t_o	α	$T_{3 \min}$
750	700	2000	Construction steel	12000	1200	1100	1300	60	10	1140

h – висота заготовки, мм;

b – ширина заготовки, мм;

l – висота заготовки, мм;

t_H – час нагріву, с;

T_H – базова температура нагріву при створенні моделі, °C;

$T_{H \min}$, $T_{H \max}$ – мінімальна та максимальна температури нагріву, що визначають діапазон зміни цієї величини при проведенні серії розрахунків;

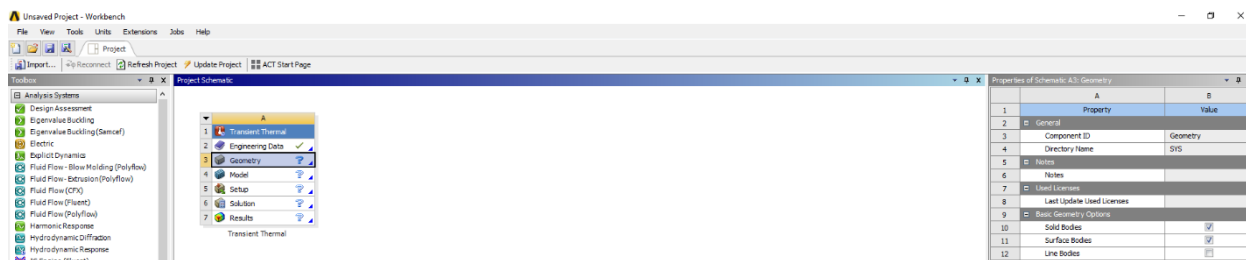
t_o – час охолодження, с;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·К;

$T_{3 \min}$ – мінімально можлива температура заготовки після охолодження, °C.

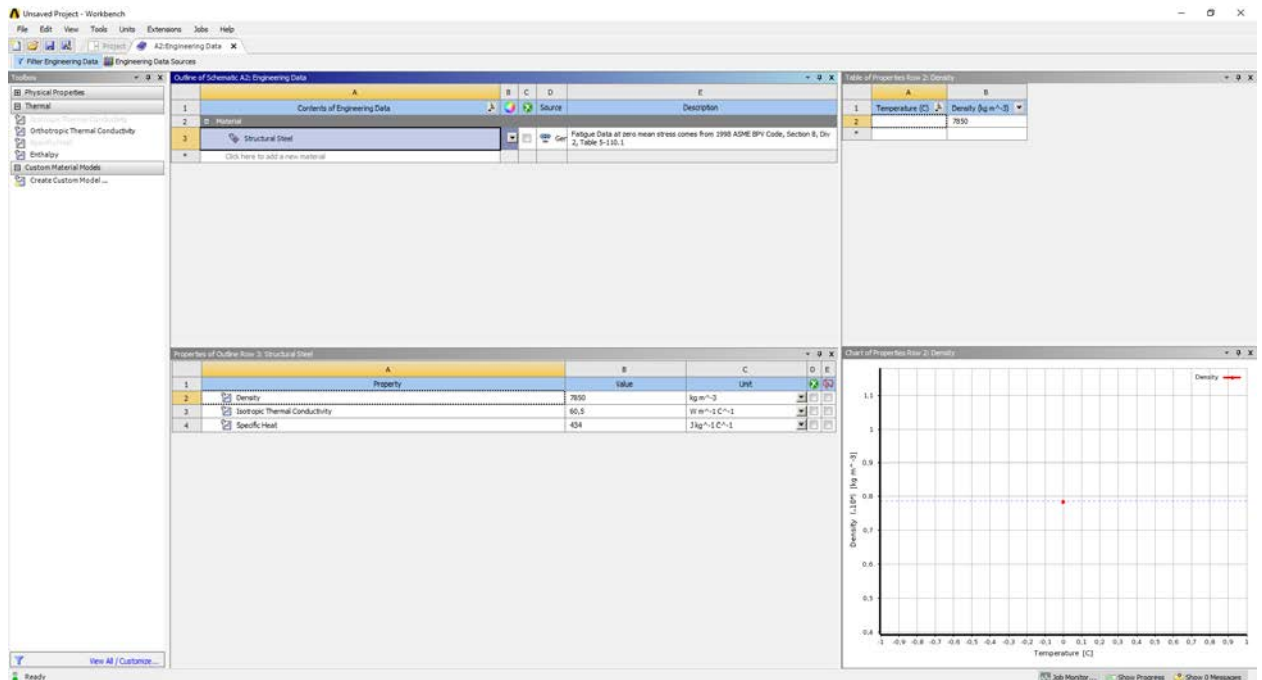
Створення нового проекту в Workbench

Вибираємо тип задачі – Transient Thermal.



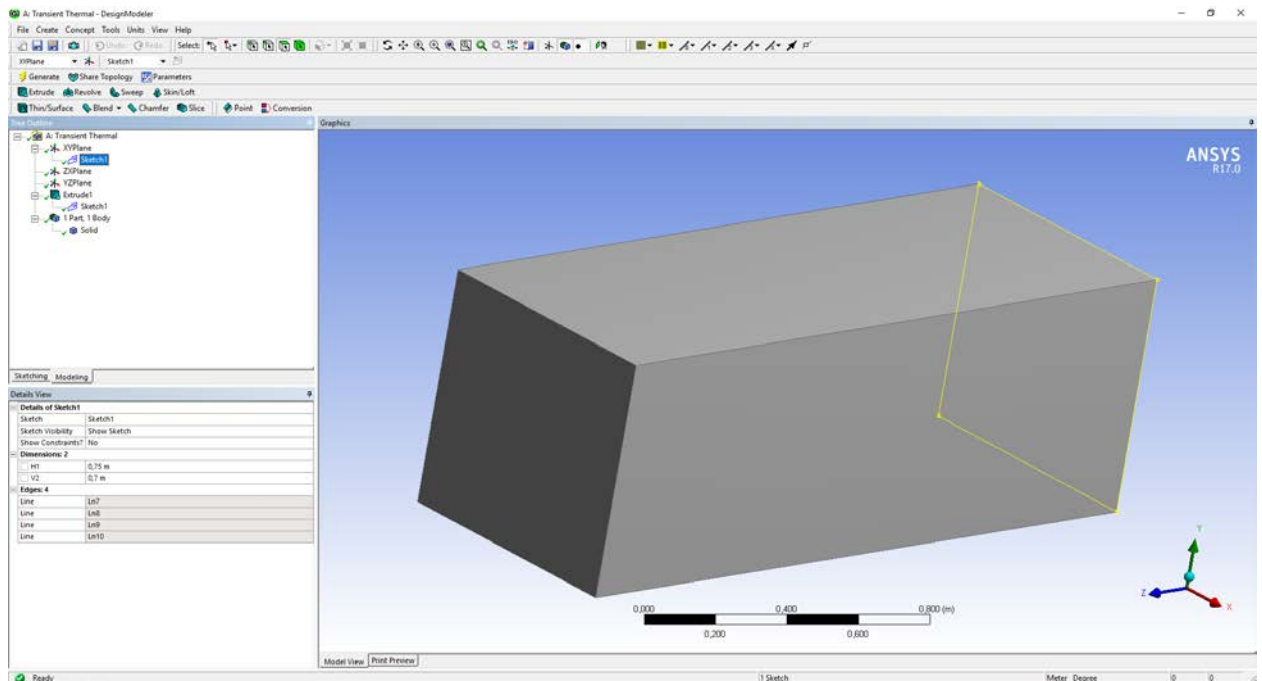
Вибір матеріалу з бібліотеки матеріалів

Залишаємо матеріал, що встановлено в моделі за замовчуванням – Structural Steel. За бажанням можливо змінити фізичні властивості матеріалу.

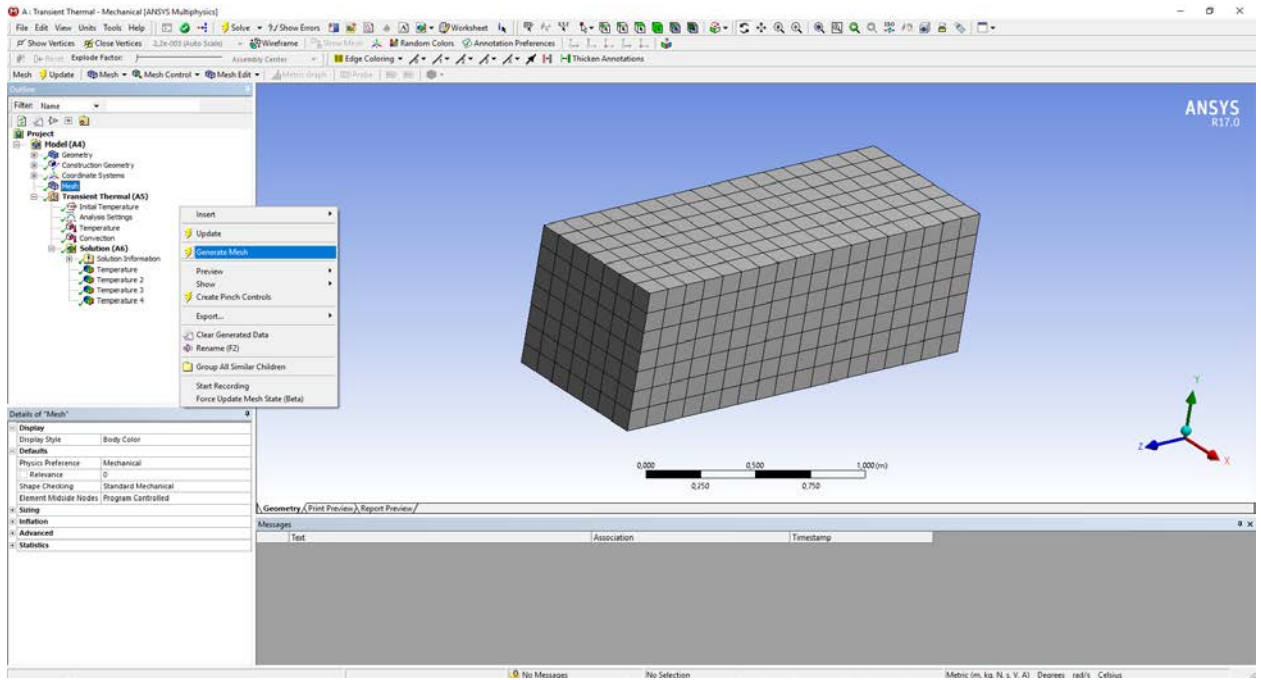


Підготовка геометрії в модулі DesignModeler

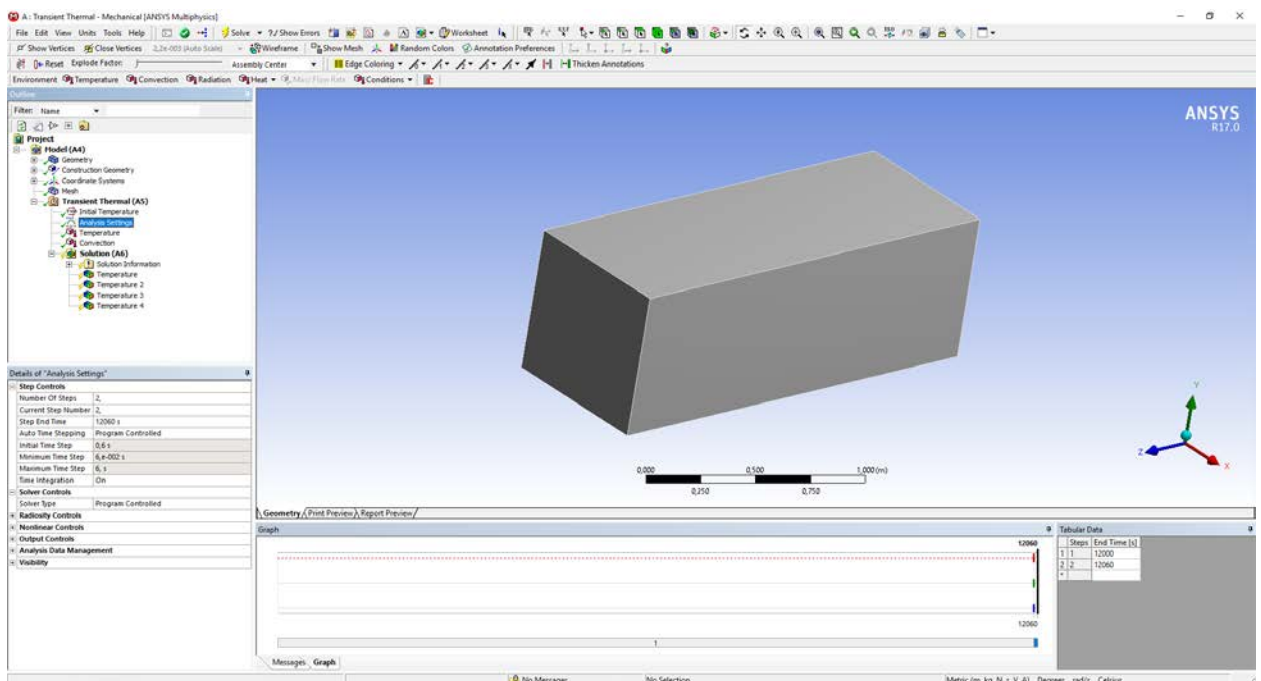
Готуємо поперечний переріз згідно заданих розмірів, тоді витягуємо його на необхідну довжину. Після цього генеруємо тривимірний об'єкт.



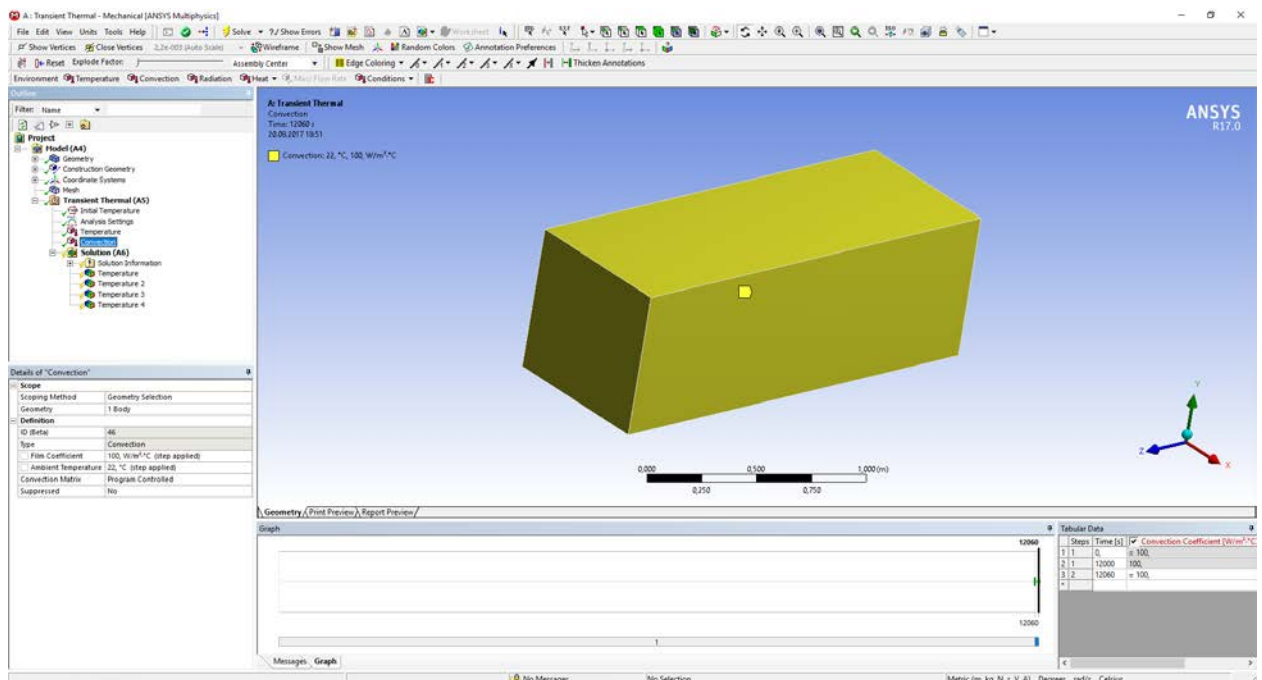
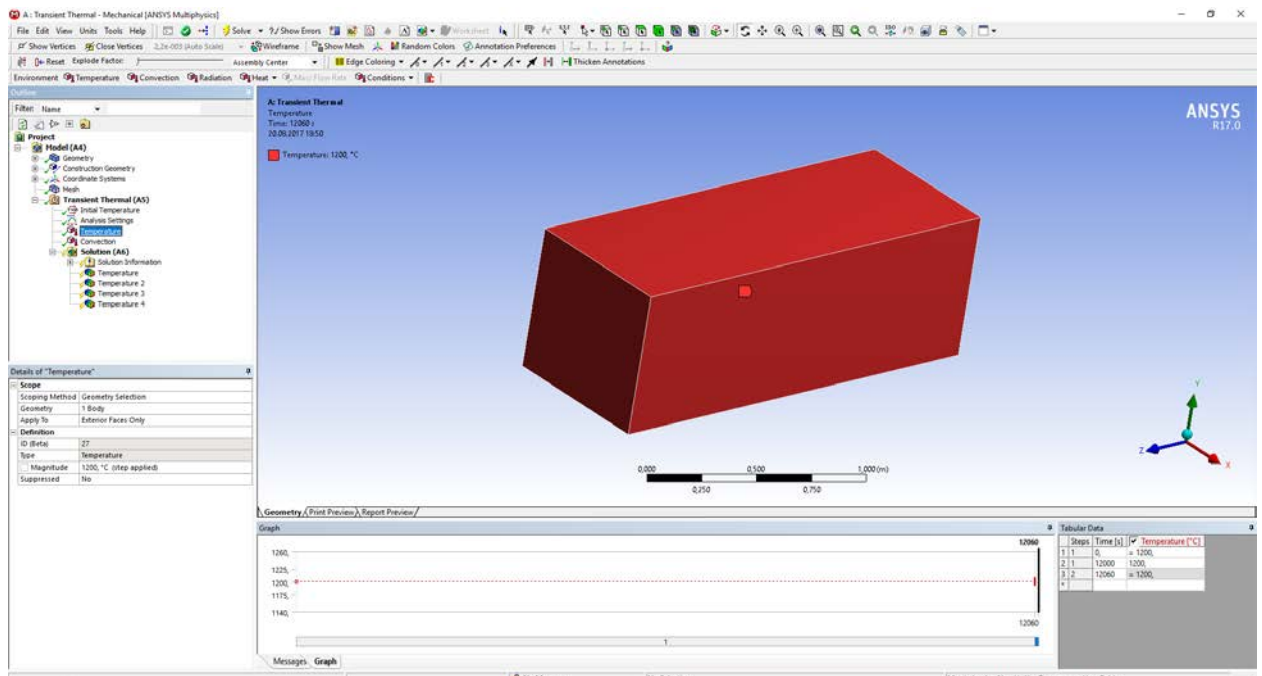
Відкриття моделі з вікна проекту Генерація сітки скінчених елементів.



Встановлюємо 2 етапи (кроки) розрахунку: перший протягом 12000 секунд (для моделювання нагріву) та 60 секунд (для моделювання охолодження). Перший етап відповідає часу нагріву в печі, другий – часу переміщення заготовки від печі до відповідного агрегату для подальшої обробки тиском.

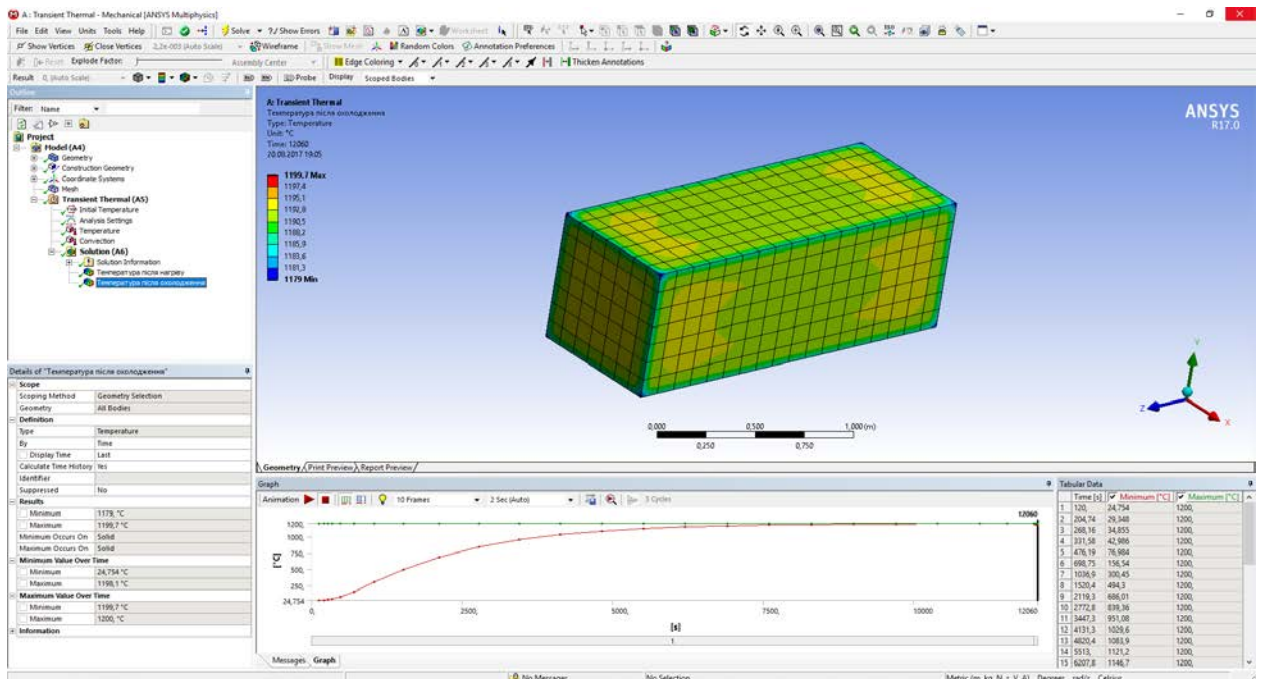
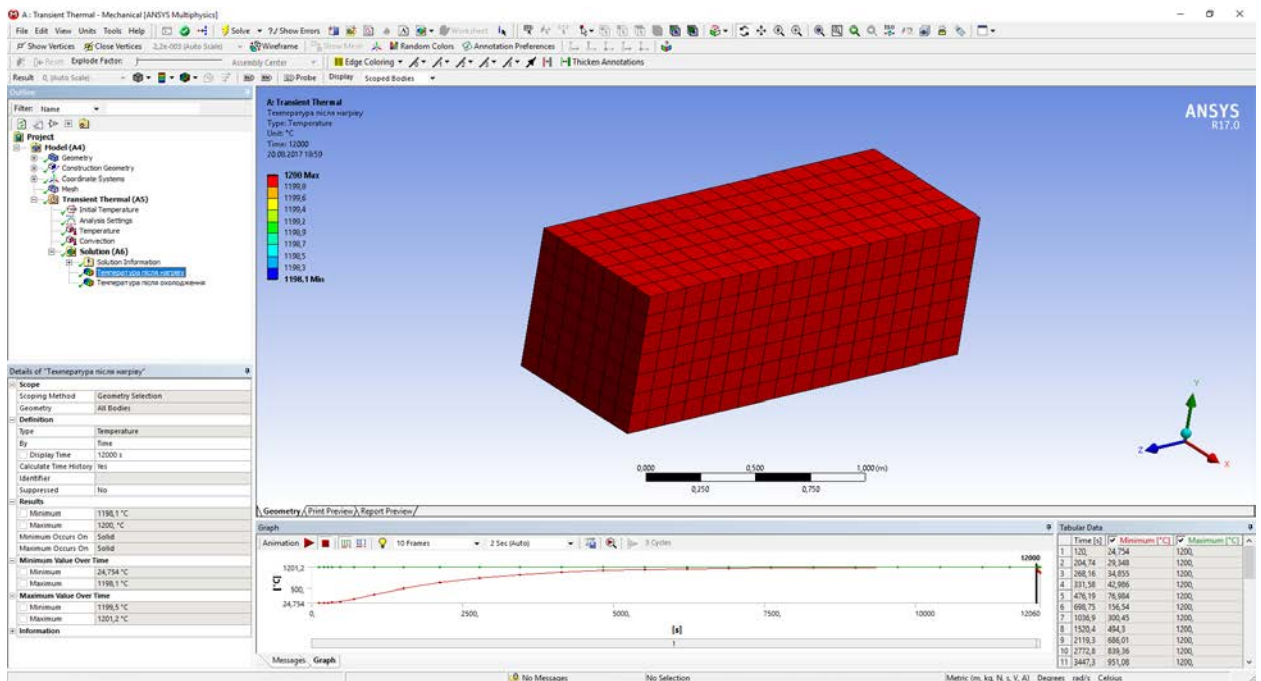


Граничні умови – температура 1200 °C на всі поверхні заготовки на першому етапі моделювання, конвективний теплообмін по всій поверхні з величиною коефіцієнта тепловіддачі 10 Вт/м²·К (що відповідає теплообміну з атмосферою).



Виконуємо розрахунок за допомогою кнопки Solve

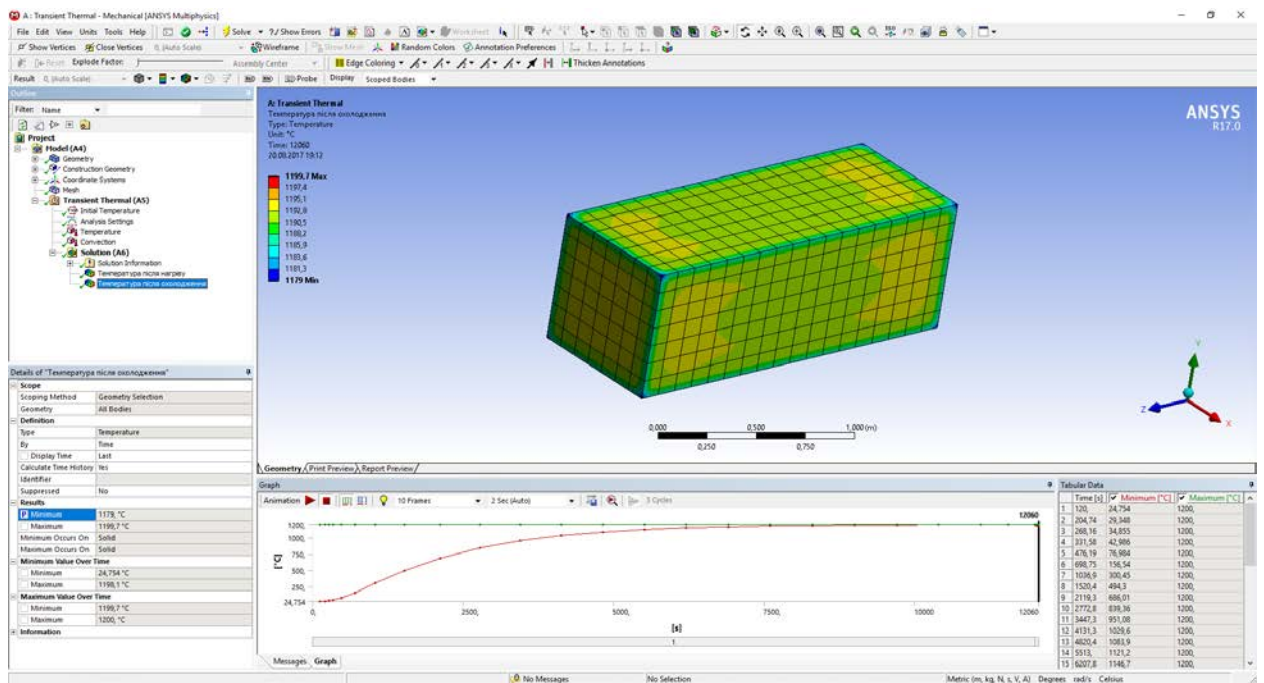
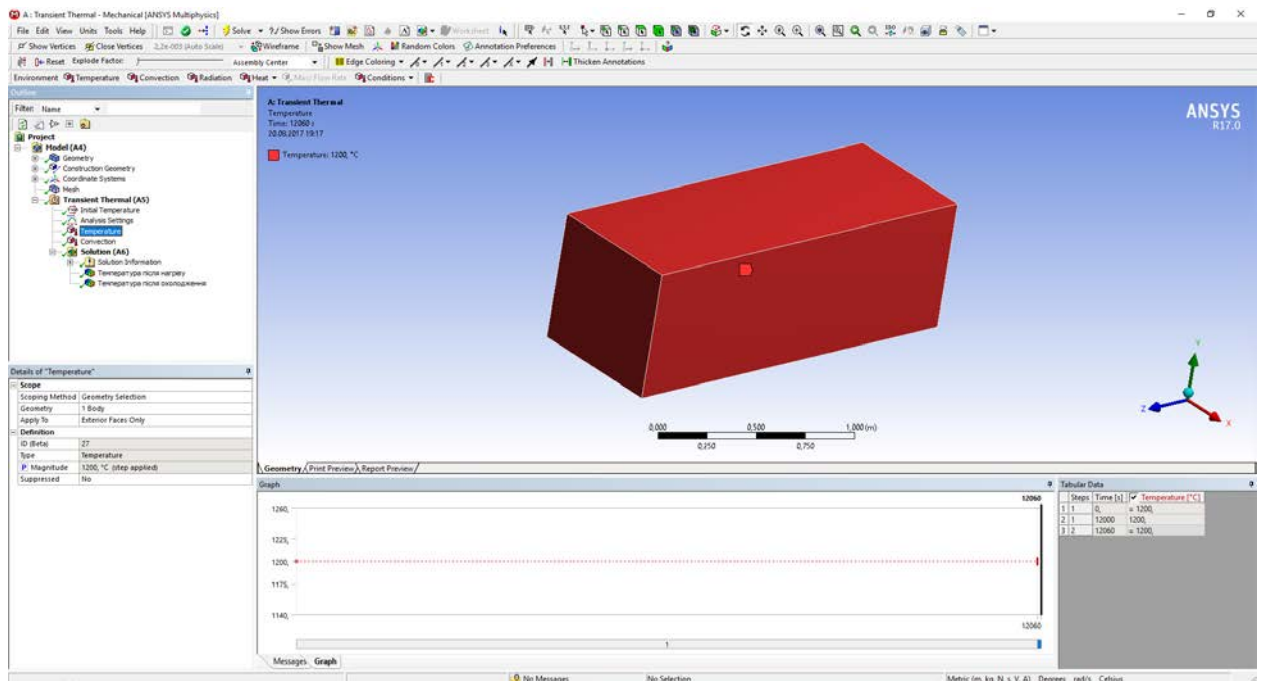
Після закінчення розрахунку додаємо в «дерево» моделі візуалізацію розподілу температур як результат після першого (нагрів) та другого етапів розрахунку. Візуалізацію також можливо зробити також по будь-якому перерізу заготовки.



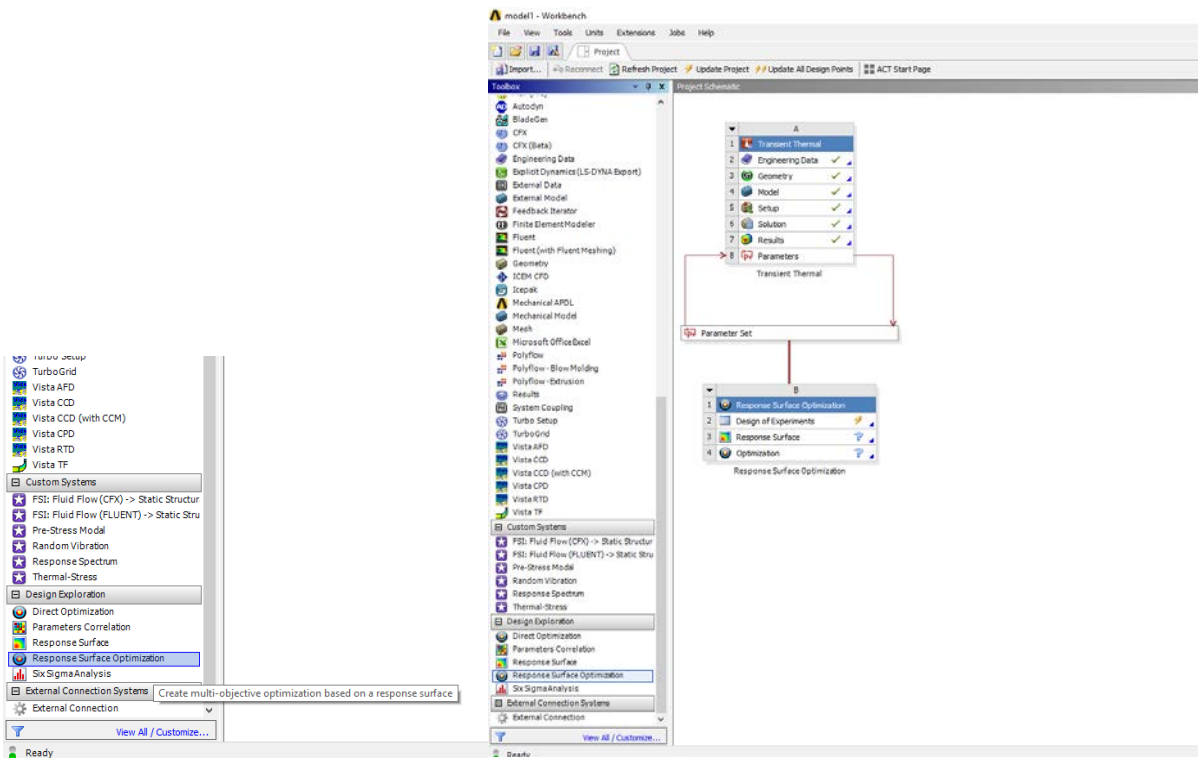
Як видно з отриманих результатів, мінімальна температура заготовки після моделювання нагріву складала 1198,1 °С, а після моделювання охолодження – 1179 °С.

Визначення факторів/параметрів

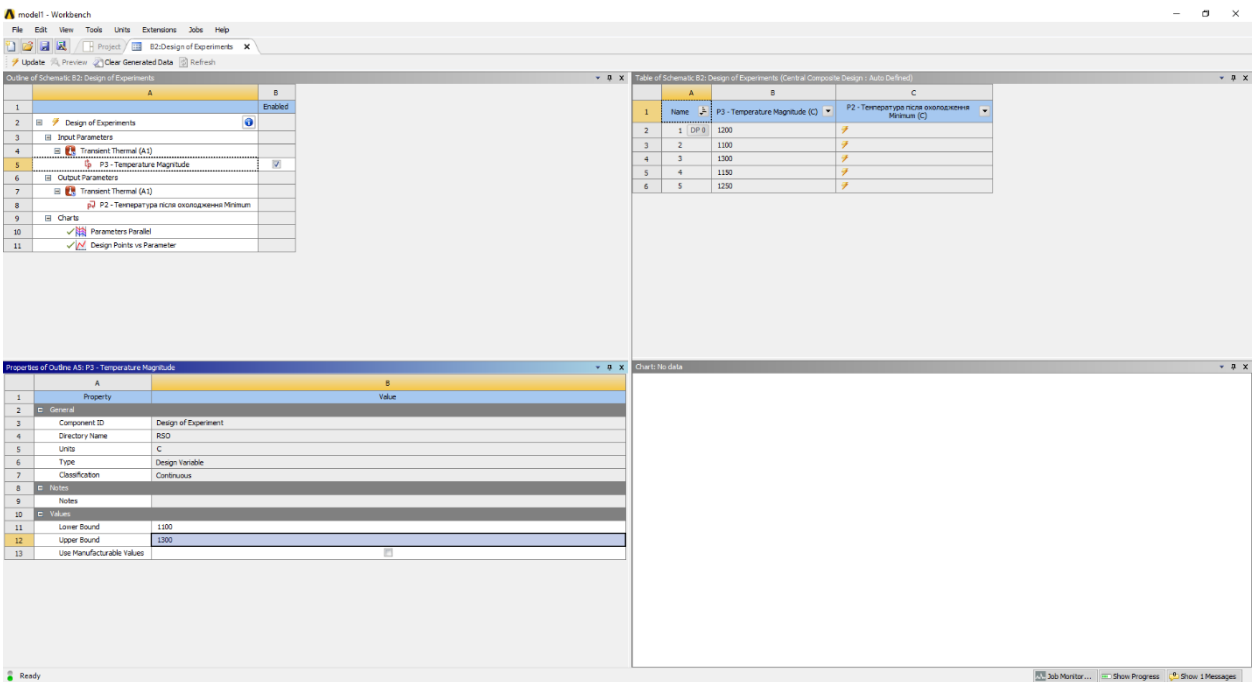
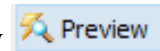
Температуру підігріву та температуру заготовки після охолодження ми обираємо як пов'язані параметри для подальшого аналізу процесу. Біля значень кожної з них є білий прямокутник, в якому за допомогою миші встановлюється відповідна помітка.



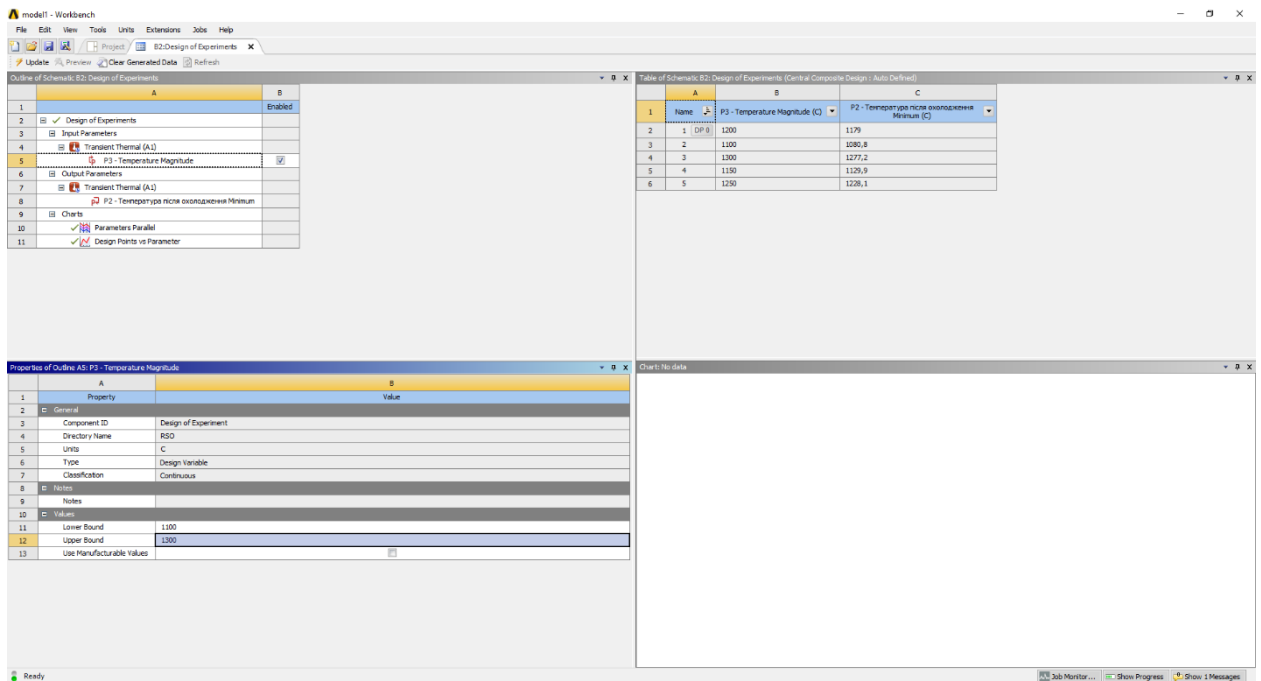
Після визначення пов'язаних параметрів відкриваємо вікно проекту і додаємо модуль оптимізації з використанням поверхні відгуку.



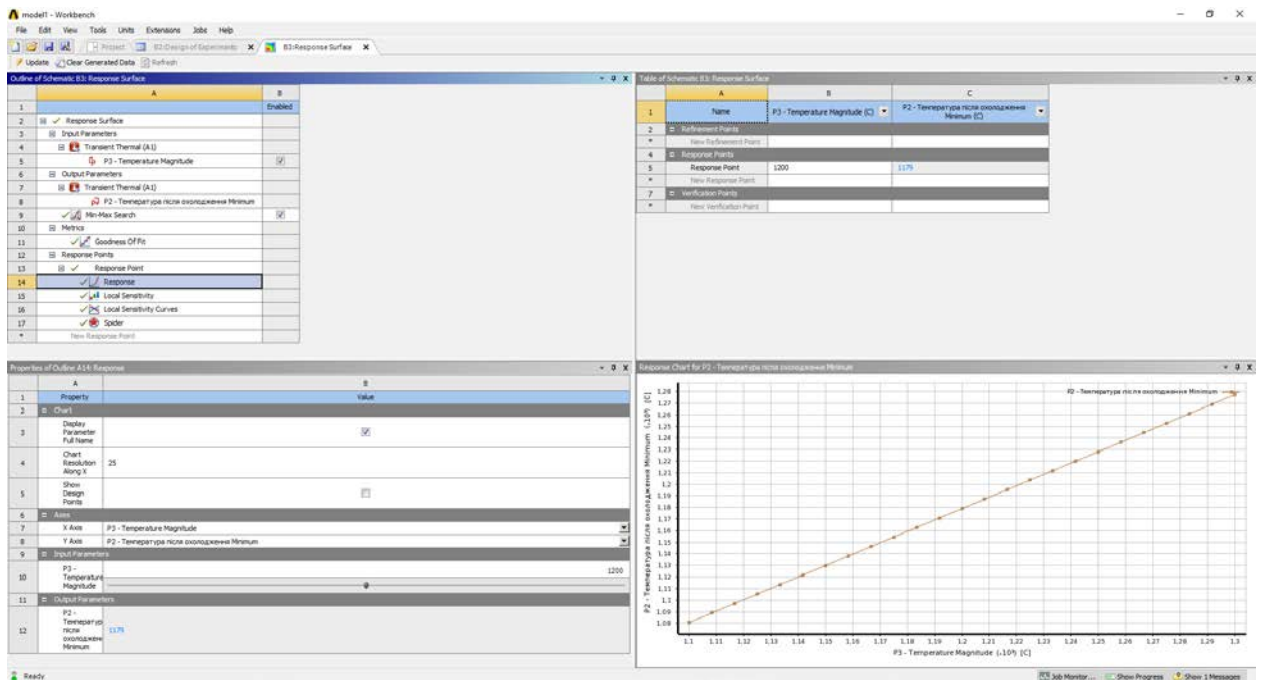
Для перегляду плану експерименту натискаємо кнопку



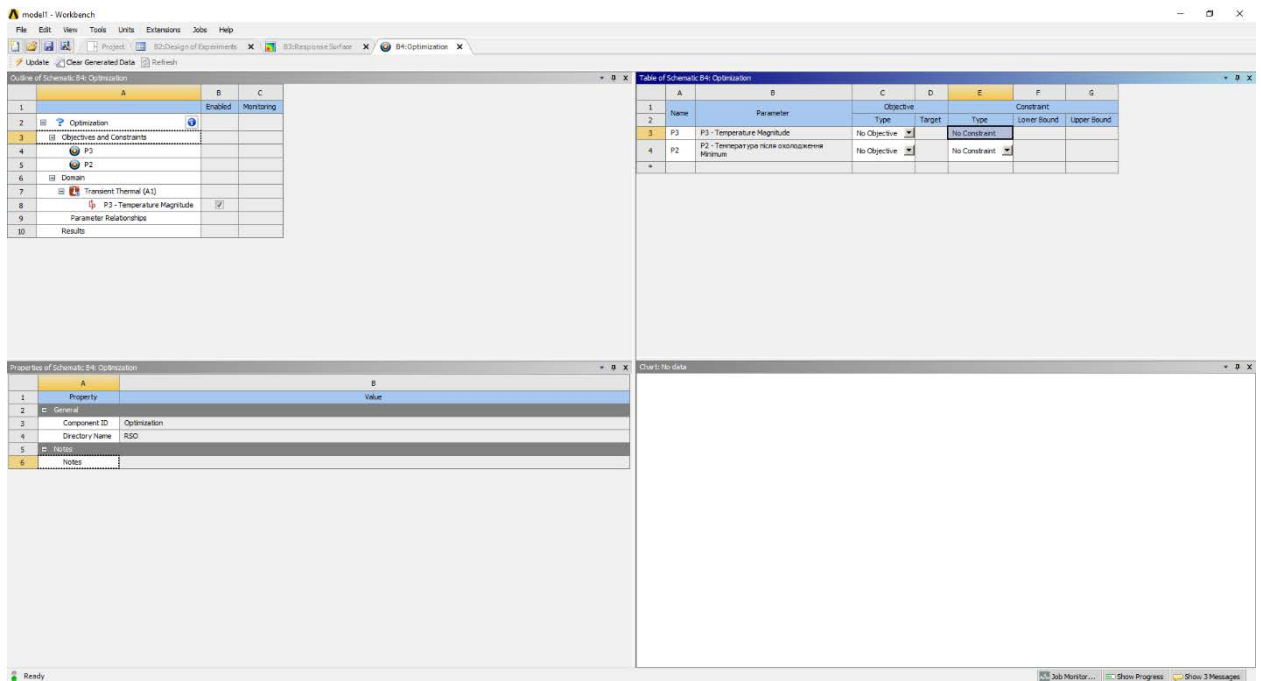
Після натискання кнопки Update автоматично буде проведено всю серію розрахунків з використанням у якості фактору всіх значень температури підігріву заготовки відповідно до плану проведення експерименту. Результати розрахунків будуть представлені у відповідній таблиці.



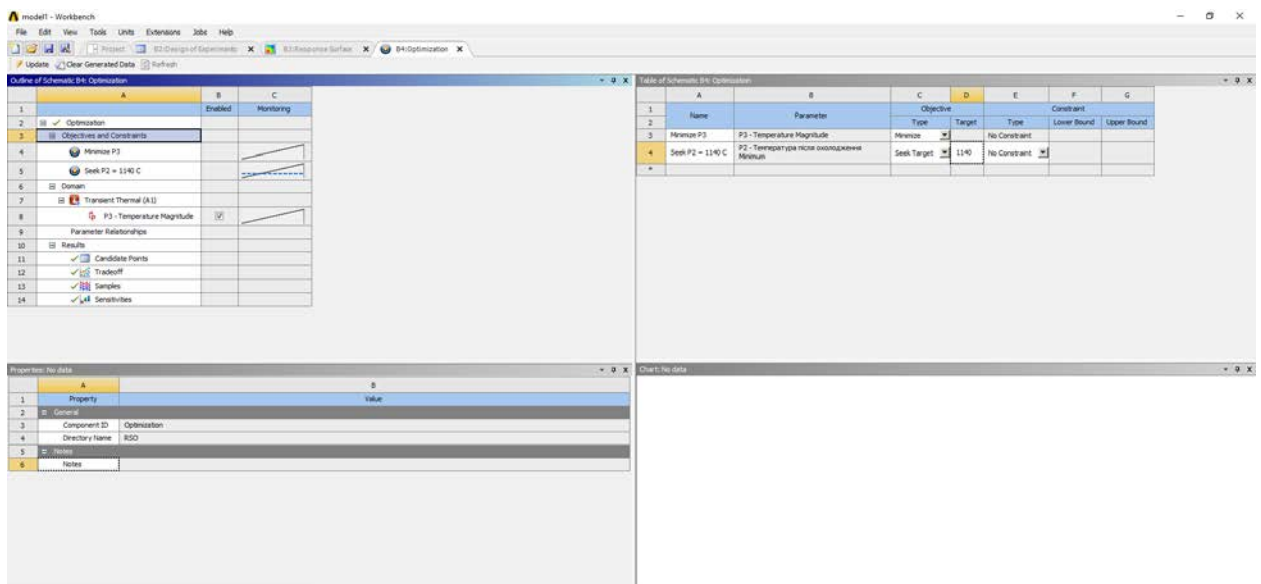
Повертаємось до вікна проекту та в модулі оптимізації відкриваємо Response Surface, далі натискаємо кнопку Update. Після розрахунку можливо оцінити математичні характеристики отриманої поверхні відгуку (в даному випадку – двовимірної).



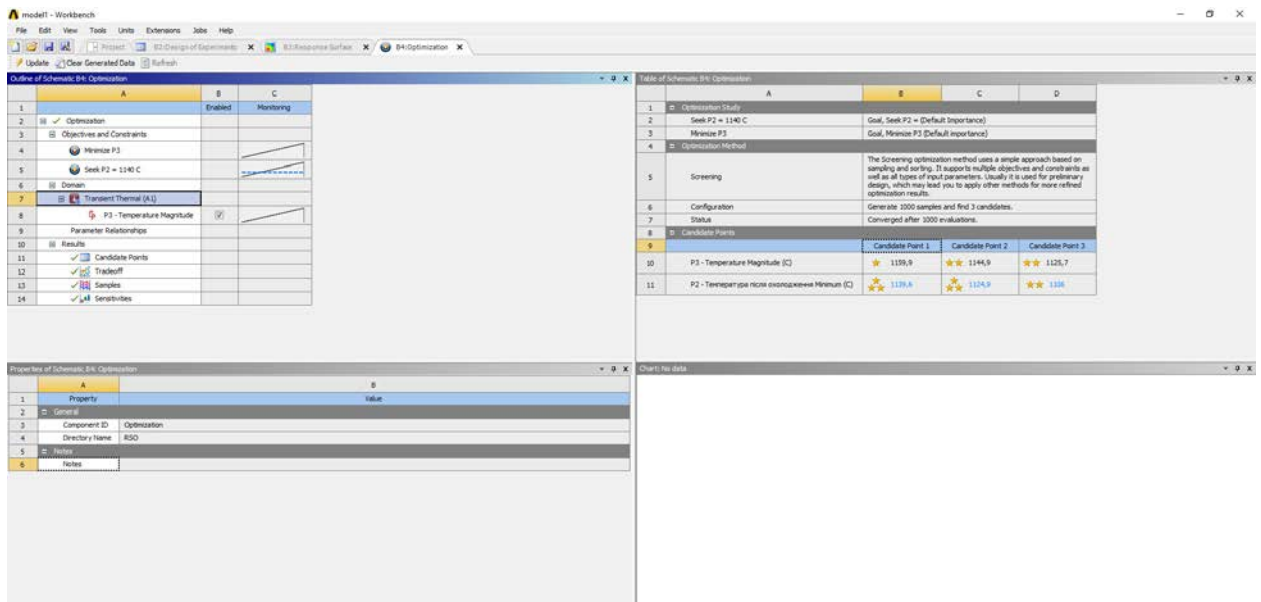
Повертаємось до вікна проекту та в модулі оптимізації відкриваємо Optimization, далі в таблицю у верхньому правому куті додаємо обидва параметри (температуру підігріву та температуру заготовки після охолодження).

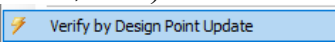


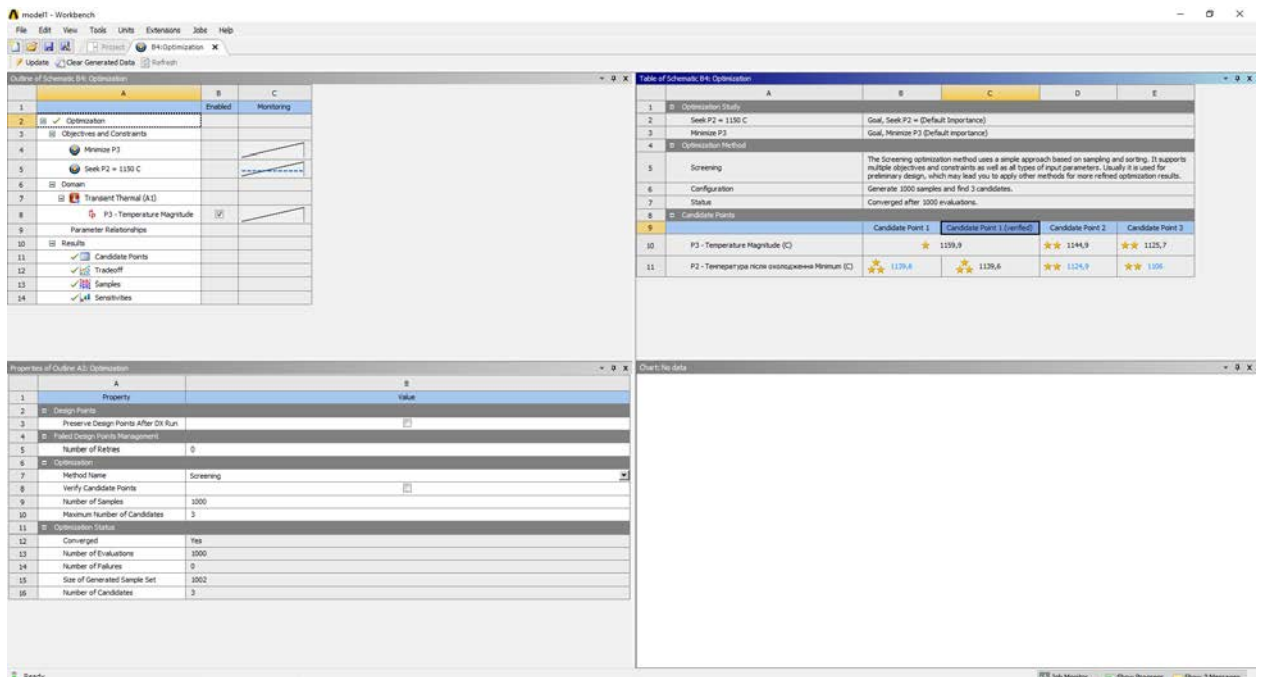
Встановлюємо умови для обраних параметрів: мінімальна температура підігріву для отримання мінімальної температури заготовки після охолодження 1140 °С.



Після натискання кнопки отримуємо дані щодо трьох можливих варіантів величини температури заготовки після охолодження при відповідних температурах підігріву, що найбільше задовольняють висунутим вимогам. Ці дані отримано вже за допомогою функції поверхні відгуку, без розрахунку за допомогою комп'ютерної моделі.



Перший варіант є найбільш прийнятним (температура підігріву – 1159,9 °C). Натискаємо праву кнопку «миші» та у меню обираємо . За допомогою моделі здійснюється розрахунок з визначеною величиною температури підігріву в якості граничної умови, результат розрахунку відображається також в таблиці. Отримано повний збіг отриманих значень температури заготовки, тобто поверхня відгуку була визначена достатньо точно.



Звіт

У звіт по виконаній роботі наводяться наступні дані:

- візуалізація початкової геометрії заготовки;
- властивості заданого матеріалу;
- фактори та граничні умови при моделюванні нагріву (при базовому моделюванні);

- візуалізація результатів розрахунку нагріву (уся заготовка та поперечний переріз);
- фактори та граничні умови при моделюванні охолодження (при базовому моделюванні);
- візуалізація результатів розрахунку охолодження (уся заготовка та поперечний переріз);
- діапазон значень вхідних факторів (мінімальна та максимальна температури нагріву);
- план експерименту;
- результати досліджень;
- функція (поверхня) відгуку;
- визначене мінімально можливе значення температури нагріву при заданому часі нагріву, виходячи із заданої мінімально можливої температури заготовки після охолодження при заданому часі охолодження.

3 ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ

Студенти обирають варіанти відповідно до двох останніх цифр індивідуального навчального плану. Якщо останні дві цифри перевищують 30, то для визначення номеру варіанта необхідно від числа відняти 30, 60 або 90. Наприклад, якщо останні цифри становлять 78, то студенту необхідно виконувати варіант № 18 (78-60=18). Вихідні дані наведено в таблиці 1.1.

Заготовка прямокутного поперечного перерізу; матеріал заготовки – конструкційна сталь; h – висота заготовки, мм; b – ширина заготовки, мм; l – довжина заготовки, мм; t_n – час нагріву, с; T_n – базова температура нагріву при створенні моделі, °С; $T_{n \min}$, $T_{n \max}$ – мінімальна та максимальна температури нагріву, що визначають діапазон зміни цієї величини при проведенні серії розрахунків; t_0 – час охолодження, с; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·К; $T_{z \min}$ – мінімально можлива температура заготовки після охолодження, °С.

Таблиця 3.1

Вихідні дані для самостійної роботи

Варіант	h	b	l	t_n	T_n	$T_{n \min}$	$T_{n \max}$	t_0	α	$T_{z \min}$
1	700	700	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1140
2	750	700	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1140
3	750	750	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1140
4	800	700	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1140
5	800	750	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1140
6	800	800	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1140
7	850	700	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1140
8	850	750	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1140
9	850	800	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1140
10	850	850	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1140
11	900	700	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1150
12	900	750	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1150
13	900	800	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1150
14	900	850	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1150
15	900	900	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1150
16	700	700	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1150
17	750	700	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1150
18	750	750	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1150
19	800	700	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1150
20	800	750	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1150
21	800	800	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1160
22	850	700	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1160
23	850	750	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1160
24	850	800	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1160
25	850	850	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1160
26	900	700	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1160
27	900	750	2000	12000	1200	1100	1300	60	10	1160
28	900	800	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1160
29	900	850	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1160
30	900	900	2000	12000	1200	1100	1300	60	15	1140

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Пінчук С. Й. Організація експерименту при моделюванні та оптимізації технічних систем : навч. посіб. для студ. ВНЗ. 2-ге вид., переробл. і доповн. Дніпропетровськ : РВА "Дніпро-VAL", 2009. 289 с.
2. Бояркін В. В., Кузьміна О. М., Бобух О. С. Оптимізація процесів обробки металів тиском. Дніпро : НМетАУ, 2020. Ч. I : Конспект лекцій. 39 с.
3. Ansys. Engineering Simulation Software. *Website of ANSYS, Inc.* URL: <https://www.ansys.com/> (date of access: 10.04.2024).
4. Гришанова І. А., Згуровська Л. П., Киричук Ю. В. Розв'язок задач проектування приладів та систем з використанням ANSYS і MATHCAD : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. 180 с.

Навчально-методичне видання

Бояркін Вячеслав Володимирович

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ

Навчально-наочні рекомендації до виконання індивідуального завдання

Електронне видання

Експертний висновок склав канд. техн. наук, доц. Олег Ремез

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 733 від 18.06.2024)

В авторській редакції

Комп'ютерна верстка В. В. Бояркін

Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Ум. друк. арк. 1,34. Обл.-вид. арк. 0,65.
Зам. № 52

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010