

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

**РОБОЧА ПРОГРАМА,  
методичні вказівки та індивідуальні завдання  
до вивчення дисципліни  
«Оптимізація процесів обробки металів тиском»  
для студентів спеціальності 136 – металургія,  
освітня програма «обробка металів тиском»  
(магістерський рівень)**

Друкується за планом видань навчальної та методичної літератури,  
затвердженим Вченої ради НМетАУ  
Протокол № 2 від 05.02.2018

**Дніпро НМетАУ 2018**

УДК 519.2:621.78.08

Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Оптимізація процесів обробки металів тиском» для студентів спеціальності 136 – металургія, освітня програма «обробка металів тиском» (магістерський рівень). Укл.: В.В. Бояркін, О.С. Бобух. – Дніпро: НМетАУ, 2018. – 29 с.

Наведені робоча програма, методичні вказівки до самостійної підготовки та виконання індивідуального завдання, передбаченого програмою дисципліни «Оптимізація процесів обробки металів тиском».

Призначена для студентів спеціальності 136 – металургія, освітня програма «обробка металів тиском» (магістерський рівень) заочної форми навчання.

Укладачі: В.В. Бояркін, канд. техн. наук, доц.

О.С. Бобух, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск Я.В. Фролов, д-р техн. наук, проф.

Рецензент В.В. Гнатушенко, д-р техн. наук, доц. (НМетАУ)

Підписано до друку 04.05.2018. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір друк. Друк плоский.  
Облік.-вид. арк. 1,7. Умов. друк. арк. 1,68. Замовлення № 111.

Національна металургійна академія України  
49005, Дніпро, пр. Гагаріна, 4

---

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 РОБОЧА ПРОГРАМА .....	5
2 ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.....	6
2.1 Зміст лекційних занять.....	7
2.2 Методичні вказівки до проведення практичних занять.....	12
2.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи.....	15
3 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ.....	17
3.1 Методичні вказівки до виконання індивідуального завдання.....	17
3.2 Приклад виконання індивідуального завдання.....	18
3.3 Варіанти вихідних даних.....	28
Рекомендована література.....	29

## ВСТУП

Навчальна дисципліна «Оптимізація процесів обробки металів тиском» входить до циклу фахової підготовки та відноситься до дисциплін вільного вибору студента.

**Мета вивчення дисципліни** – засвоєння знань для опанування теоретичними засадами та практичними навичками оптимізації обробки металів тиском (зокрема, методами статистичної обробки експериментальних даних, планування експерименту), деякими чисельними методами інтерполяції та апроксимації, методами математичного (лінійного) програмування для визначення раціональних параметрів технології виробництва металовиробів. Після вивчення дисципліни студент буде здатним досліджувати процеси обробки металів тиском для визначення раціональних параметрів технології виробництва металовиробів з огляду на ресурсозбереження та сталий розвиток промисловості. Для цього він повинен:

- знати основні методи оптимізації;
- визначати параметр оптимізації;
- визначати фактори, що впливають на процес;
- визначати рівні факторів та інтервали їх варіювання;
- визначати область, в якій є сенс проводити експеримент;
- планувати повнофакторний експеримент та отримувати необхідні дані;
- знати основні методи математичної статистики та вміти проводити чисельне інтегрування;
- будувати та оцінювати функції відгуку, на основі яких визначати раціональні параметри технологій виробництва обробкою тиском;
- приймати рішення після отримання результатів аналізу.

**Критерії успішності** – отримання позитивної оцінки при захисті індивідуального завдання та складанні екзамену.

**Зв'язок з іншими дисциплінами** – дисципліна є однією із завершальних при підготовці магістрів спеціальності 136 – металургія, для засвоєння матеріалу необхідні навички та уміння, отримані при вивченні дисципліни «Методи прикладного статистичного аналізу». Результати навчання можуть бути застосовані при підготовці кваліфікаційної випускної роботи магістра.

## **1 РОБОЧА ПРОГРАМА ТА ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ «ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ»**

У відповідності з навчальним планом дисципліну «Оптимізація процесів обробки металів тиском» студенти спеціальності 136 – металургія заочної форми навчання вивчають на першому курсі. Формами контролю знань студентів є іспит. Розподіл по видам занять наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Розподіл навчальних годин дисципліни «Оптимізація процесів обробки металів тиском»

	Усього	Семестр
		2
Усього годин за навчальним планом, у тому числі:	120	120
Аудиторні заняття, з них:	16	16
Лекції	8	8
Лабораторні роботи	4	4
Практичні заняття	4	4
Семінарські заняття	0	0
Самостійна робота, у тому числі при:	104	104
підготовці до аудиторних занять	16	16
підготовці до контрольних заходів	0	0
виконанні курсових проектів (робіт)	0	0
виконанні індивідуальних завдань	12	12
опрацюванні розділів програми, які не викладаються на лекціях	76	76
Підсумковий контроль	Іспит	Іспит

## 2 ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Перелік тем та структура навчальних занять з дисципліни «Оптимізація процесів обробки металів тиском» наведені в таблицях 2.1 – 2.3.

Таблиця 2.1 – Структура лекційного курсу

№№ з/п	Назва розділу/теми та його/її зміст	Тривалість (годин)
1	<b>Вступ. Загальні визначення. Параметри оптимізації. Фактори. Вибір моделі.</b> Загальні визначення. Види параметрів оптимізації. Вимоги до параметрів. Декілька вихідних параметрів. Узагальнюючий відгук. Шкала бажаності. Перетворення часткових відгуків в часткові функції бажаності. Визначення фактору. Вимоги до факторів. Вимоги до сукупності факторів. Вибір моделі.	2 16г. самост. роботи [1]
2	<b>Факторний експеримент. Проведення експерименту.</b> Планування експерименту. Повний факторний експеримент, його властивості. Експеримент та математична модель. Реалізація плану експерименту. Помилки паралельних дослідів. Дисперсія параметру оптимізації. Рандомізація. Розділення матриці на блоки.	2 20г. самост. роботи [1, 2]
3	<b>Обробка результатів експерименту.</b> Метод найменших квадратів. Регресійний аналіз. Перевірка адекватності моделі. Перевірка значущості коефіцієнтів. Критерії оптимальності планів.	2 20г. самост. роботи [1, 2]
4	<b>Прийняття рішень.</b> Інтерпретація результатів. Прийняття рішень після створення моделі процесу. Побудова інтерполяційної формули. Розрахунок крутого сходження.	2 20г. самост. роботи [1]

Таблиця 2.2 – Перелік практичних занять та їх тривалість

№№ з/п	Тема заняття та його зміст	Тривалість (годин)
1	<b>Створення математичної моделі.</b> Створення математичної моделі нагріву-охолодження заготовки перед обробкою тиском.	4

Таблиця 2.3 – Перелік лабораторних занять та їх тривалість

№№ з/п	Тема заняття та його зміст	Тривалість (годин)
1	<b>Оптимізація параметрів нагріву.</b> Оптимізація параметрів нагріву заготовки перед подальшою обробкою тиском.	4

## 2.1 Зміст лекційних занять

### Вступ.

Пошук оптимальних умов є одним з найбільш поширених науково-технічних завдань. Вони виникають в той момент, коли встановлена можливість проведення процесу і необхідно знайти найкращі (оптимальні в певному сенсі) умови його реалізації.

### Загальні визначення.

Експеримент може бути фізичним, психологічним або модельним. Він може безпосередньо проводитися на об'єкті або на його моделі. Модель зазвичай відрізняється від об'єкта масштабом, а іноді природою. Якщо модель досить точно описує об'єкт, то експеримент на об'єкті може бути замінений експериментом на моделі. Можна отримувати нові відомості про об'єкт, експериментуючи на моделі, якщо вона досить точно описує об'єкт.

«Об'єкт дослідження». Для опису об'єкта дослідження зручно користуватися уявленням про кібернетичної системі, яку називають «чорним ящиком». Вихідні чисельні характеристики називають цілями дослідження або параметрами оптимізації (критерій оптимізації, цільова функція). Для проведення експерименту необхідно мати можливість впливати на поведінку «чорного ящика». Всі способи такого впливу називаються факторами.

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 досвіді одне з декількох значень (рівнів).

### **Параметри оптимізації.**

Види параметрів оптимізації. Вимоги до параметра оптимізації. Декілька вихідних параметрів.

Параметр оптимізації – це реакція (відгук) на впливу 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.**

Вибір факторів – дуже відповідальний етап при підготовці до планування експерименту. Від вдалого вибору залежить успіх оптимізації. 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. Обраний безліч чинників повинно бути достатньо повним. Якщо який-небудь істотний фактор пропущено, це призведе до неправильного визначення оптимальних умов або до великої помилку досвіду. Фактори можуть бути кількісними та якісними. Точність фіксації факторів повинна бути висока. Ступінь точності визначається діапазоном зміни факторів.

### **Вибір моделі.**

Побудова поверхні 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 кожного можливого набору значень факторів (станом об'єкта) відповідає єдине значення параметра оптимізації. Для зменшення розмірності факторного простору при геометричному побудові поверхні відгуку можна використовувати перетину.

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.

Припущення про аналітичність функції відгуку і про єдиності оптимуму. Аналітичною називається така функція, яку можна розкласти в степеневий ряд в околицях будь-якої точки з області її визначення.

Використовуючи ці передумови, можна запропонувати процедуру пошуку оптимуму, засновану на шаговому принципі. Цей принцип говорить: проводь 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 вибирається 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 задаються інформацією про найкращі точки і визначають 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.

У повному факторному експерименті різниця між числом дослідів і числом коефіцієнтів велика. Виникає проблема зменшення числа дослідів.

### **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 рандомизувати в часі. Якщо експериментатору заздалегідь відомі джерела систематичних помилок, наприклад, відома кількість різних партій сировини, слід розбивати матрицю планування на блоки. При цьому міжблокове ефект свідомо змішується з взаємодіями, якими експериментатор може знехтувати.

Особливу увагу слід приділяти перевірці однорідності дисперсій, так як це – одна з передумов, що лежать в основі регресійного аналізу. Для перевірки однорідності дисперсій можна використовувати критерії Фішера, Кохрена або Бартлета. Дуже важливо відкинути грубі спостереження – брак при постановці повторних дослідів. 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 – не випадкові величини; 4) фактори не корелюються.

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

### **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.

Для лінійної адекватної моделі зі значущими коефіцієнтами регресії можливі: рух по градієнту, план другого порядку, закінчення дослідження. Якщо частина коефіцієнтів регресії незначущі, то можливий вибір одного з рішень, що дозволяють отримувати коефіцієнти регресії значущими: зміна інтервалів варіювання, перенесення центру плану, відсіювання незначущих факторів, паралельні досліди, добудова плану. Крім того, залишається рух по градієнту, а якщо область оптимуму близька, то реалізація плану другого порядку або закінчення дослідження.

Якщо всі коефіцієнти незначущі, то вибираються рішення по реалізації плану другого порядку або закінчення дослідження (область оптимуму близька) або рішення, що дозволяють отримувати значні коефіцієнти регресії (область оптимуму далека і невизначена ситуація).

## **2.2 Методичні вказівки до проведення практичних занять**

Для проведення заняття рекомендовано використання програмного пакету Ansys Workbench, який завантажується та встановлюється студентами з відповідного ресурсу [3]. Мета заняття – навчитись будувати моделі нагріву та охолодження заготовок перед процесами обробки тиском.

Рішення поставленої крайової задачі здійснюється програмою ANSYS в три етапи відповідно до логіки методу.

Центральним об'єктом при роботі в ANSYS Workbench є проект, під яким розуміється сукупність геометричних, фізичних та скінченоелементних моделей тіл даної задачі, а також результатів чисельного рішення. Проект 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 проведення інженерного аналізу [4]:

- 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 [4]:

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 MCE.

4. Будується геометрична твердотільна модель об'єкта. У класичному ANSYS для цього використовується програмний модуль PREP7. 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.) Представляються в графічному вікні ANSYS в вигляді картинок, таблиць, графіків, анімацій. Всі ці результати можна записати у відповідні файли.

При виконанні розглянутих вище етапів розв'язання задачі програма ANSYS створює в пам'яті комп'ютера базу даних, що містить повну інформацію про модель. Цю базу даних можна зберегти в бінарному файлі і використовувати для продовження аналізу. Модуль допомоги (Help) пакета ANSYS надає повну інформацію про процедурах моделювання різних завдань. Є теоретичний розділ, де на базі МСЕ розглядаються застосовувані розрахункові співвідношення.

В останні роки компанія ANSYS, Inc. впроваджує нову модульну систему – Workbench, яка виводить процес моделювання на новий сучасний рівень. Застосування Workbench робить моделювання більш наочними, а деякі маніпуляції, зокрема, настройку контактних пар, управління сіткою кінцевих елементів, більш простими, що важливо для початківців користувачів. 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. Компанія ANSYS, Inc. інтенсивно розвиває Workbench як в частині вдосконалення графічного інтерфейсу, так і в частині розширення можливостей платформи.

## **2.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи**

Мета роботи – провести аналіз процесу нагріву заготовки та передачі її (з охолодженням) до подальшої обробки та вибір оптимальної температури підігріву виходячи із необхідної температури заготовки перед початком обробки тиском.

Для виконання роботи також рекомендовано використання програмного пакету Ansys Workbench, за допомогою якого проводилось практичне заняття.

Виконання роботи складається з наступних складових:

- побудова моделі процесу нагріву-охолодження заготовки в середовищі Ansys Workbench (відповідно до практичного заняття);
- постановка та проведення експерименту за допомогою ANSYS DesignXplorer;
- 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;

Технологія ANSYS DesignXplorer дозволяє здійснювати управління параметрами для прогнозування впливу параметричних або геометричних змін на поведінку конструкції [5]. При цьому немає необхідності виконання додаткового розрахунку. Модуль дозволяє інженерам проводити аналіз планування експерименту Design of Experiments (DOE) для будь-якого розрахунку, виконаного в середовищі ANSYS Workbench, в тому числі при наявності CAD-параметрів.

Компанія ANSYS пропонує широкий вибір можливостей для вирішення завдань з усіх областей фізики, які дозволяють виконувати моделювання текучого середовища, механіки деформованого твердого тіла, виконувати теплові та електромагнітні розрахунки стосовно до будь-якого виробу. Сукупність технології ANSYS DesignXplorer і інструментів для виконання міждисциплінарних розрахунків ANSYS робить виконання параметричного аналізу можливим практично для кожного розрахунку. Програмне забезпечення ANSYS DesignXplorer підтримує всі галузі фізики, доступні зі схеми проекту ANSYS Workbench: механіка деформованого твердого тіла (як неявна, так і явна), динаміка рідин і газів, міждисциплінарні розрахунки. Також

підтримується комбінований аналіз, при якому розрахунки з різних областей фізики виконуються незалежно або в зв'язаному вигляді [5].

Проект починається з визначення взаємозв'язків між характеристиками і продуктивністю виробу. У більшості випадків буде кілька «оптимальних» варіантів конструкції, з яких належить вибрати підходящий варіант в залежності від необхідних характеристик і цілей, поставлених при проектуванні. Програмне забезпечення ANSYS DesignXplorer пропонує кілька способів дослідження поверхонь відгуку, інтерактивні інструменти і алгоритми оптимізації, наприклад, багатоцільовий пошук. Ця технологія аналізує вхідні обмеження, зазначену вартість виготовлення і надає кілька варіантів конструкції, з яких можна зробити вибір [5].

Найчастіше оптимальний варіант конструкції означає досягнення компромісу між різними критеріями, а дослідження такої конструкції неможливо виконати тільки за рахунок використання прямих алгоритмів оптимізації, які приведуть тільки до одного варіанта. Важливо зібрати достатньо інформації про поточний варіант конструкції, щоб відповісти на питання «що-якщо» і оцінити вплив змінних на детальний опис продукту. При цьому, ґрунтуючись на точної інформації, можливо прийняти правильні рішення, навіть в разі несподіваної зміни конструктивних обмежень [5].

Модуль ANSYS DesignXplorer описує взаємозв'язки між параметрами конструкції і характеристиками виробу за допомогою методу планування експерименту (DOE), об'єднаного з поверхнями відгуку. Метод DOE і поверхні відгуку надають всю інформацію, яка дозволяє в повній мірі реалізувати переваги концепції «Проектування на основі інженерних розрахунків». Коли відома залежність продуктивності від конструкційних змінних, то легко зрозуміти і визначити всі необхідні зміни, які потрібно внести, щоб система або конструкція відповідала висунутим вимогам. Після створення поверхонь відгуку можна легко обмінюватися інформацією в зручному для розуміння вигляді: криві, поверхні, чутливості та ін. Вони можуть бути використані в будь-який час в ході проектування виробу без необхідності додаткових розрахунків і виконання перевірки нової конфігурації [5].



## **3 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ**

### **3.1 Методичні вказівки до виконання індивідуального завдання**

Навчальним планом передбачене виконання індивідуального завдання з дисципліни «Оптимізація процесів обробки металів тиском», в якому необхідно представити аналіз процесу нагріву заготовки та передачі її (з охолодженням) до подальшої обробки та вибір оптимальної температури підігріву виходячи із необхідної температури заготовки перед початком обробки тиском з використанням методик, які застосовувались при проведенні практичного заняття та виконанні лабораторної роботи.

У пояснювальній записці індивідуального завдання необхідно навести:

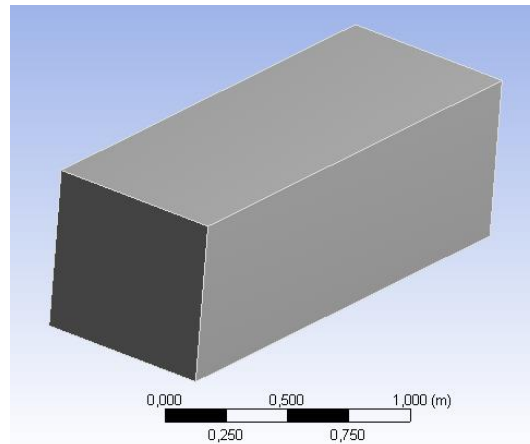
- візуалізацію початкової геометрії заготовки;
- властивості заданого матеріалу;
- параметри та граничні умови при моделюванні нагріву (при базовому моделюванні);
- візуалізацію результатів розрахунку нагріву (уся заготовка та поперечний переріз);
- параметри та граничні умови при моделюванні охолодження (при базовому моделюванні);
- візуалізацію результатів розрахунку охолодження (уся заготовка та поперечний переріз);
- діапазон значень вхідних параметрів (мінімальна та максимальна температури нагріву);
- план експерименту;
- мінімально можливе значення температури нагріву при заданому часі нагріву, виходячи із заданої мінімально можливої температури заготовки після охолодження при заданому часі охолодження.

Обсяг роздрукованої пояснювальної записки до індивідуального завдання повинен складати не більше 10 сторінок формату А4.

### 3.2 Приклад виконання індивідуального завдання

#### Вихідні дані:

Заготовка прямокутного поперечного перерізу



h	b	l	матеріал	$t_n$	$T_n$	$T_{n \min}$	$T_{n \max}$	$t_o$	$\alpha$	$T_{3 \min}$
750	700	2000	Вуглецева сталь	12000	1200	1100	1300	60	10	1140

$h$  – висота заготовки, мм;

$b$  – ширина заготовки, мм;

$l$  – висота заготовки, мм;

$t_n$  – час нагріву, с;

$T_n$  – базова температура нагріву при створенні моделі, °C;

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

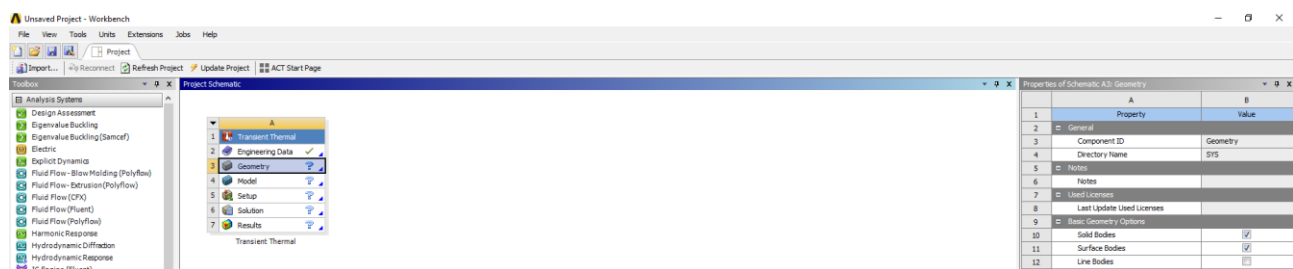
$t_o$  – час охолодження, с;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup>·K;

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

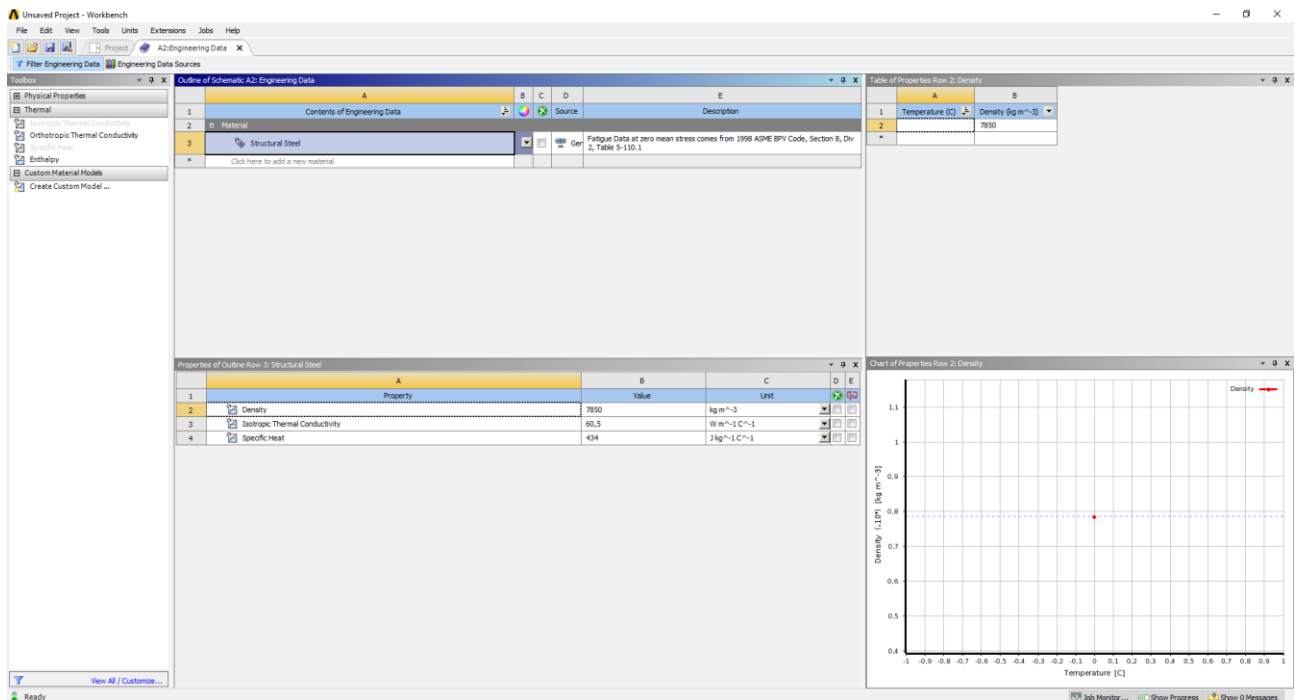
#### Створення нового проекту

Вибираємо тип задачі – Transient Thermal.



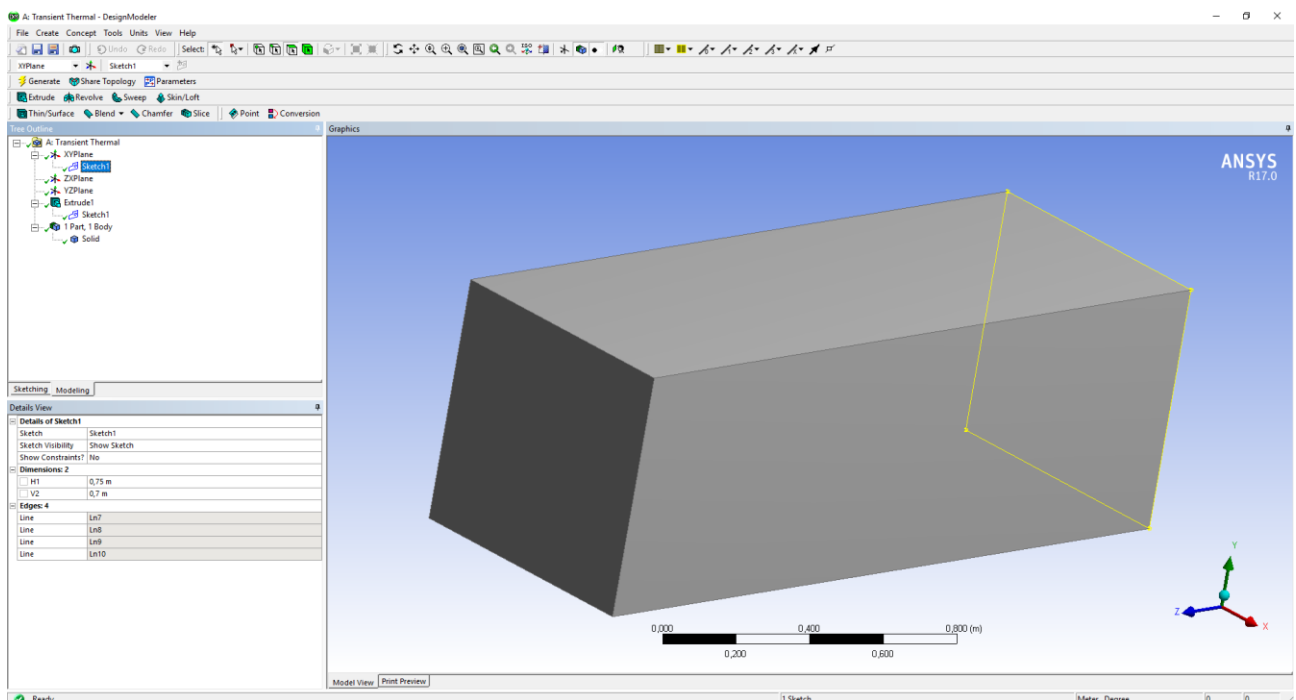
## Вибір матеріалу з бібліотеки

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



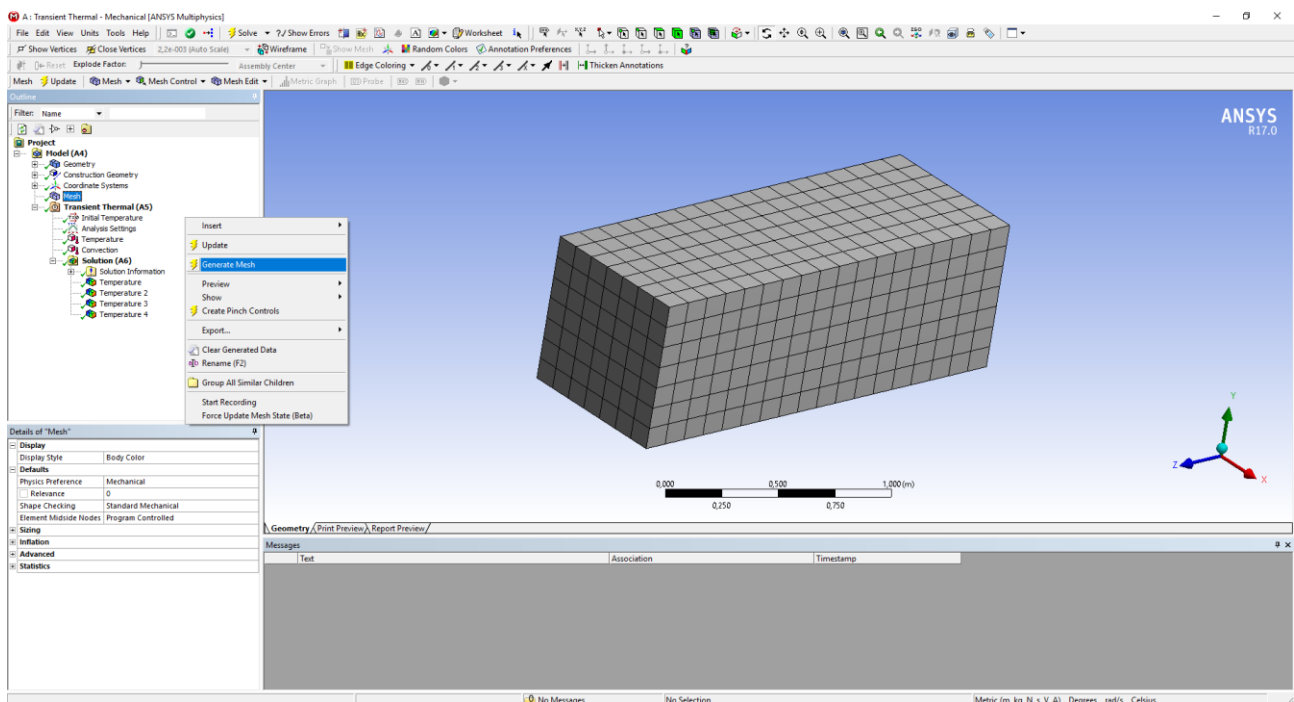
## Підготовка геометрії в модулі DesignModeler

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

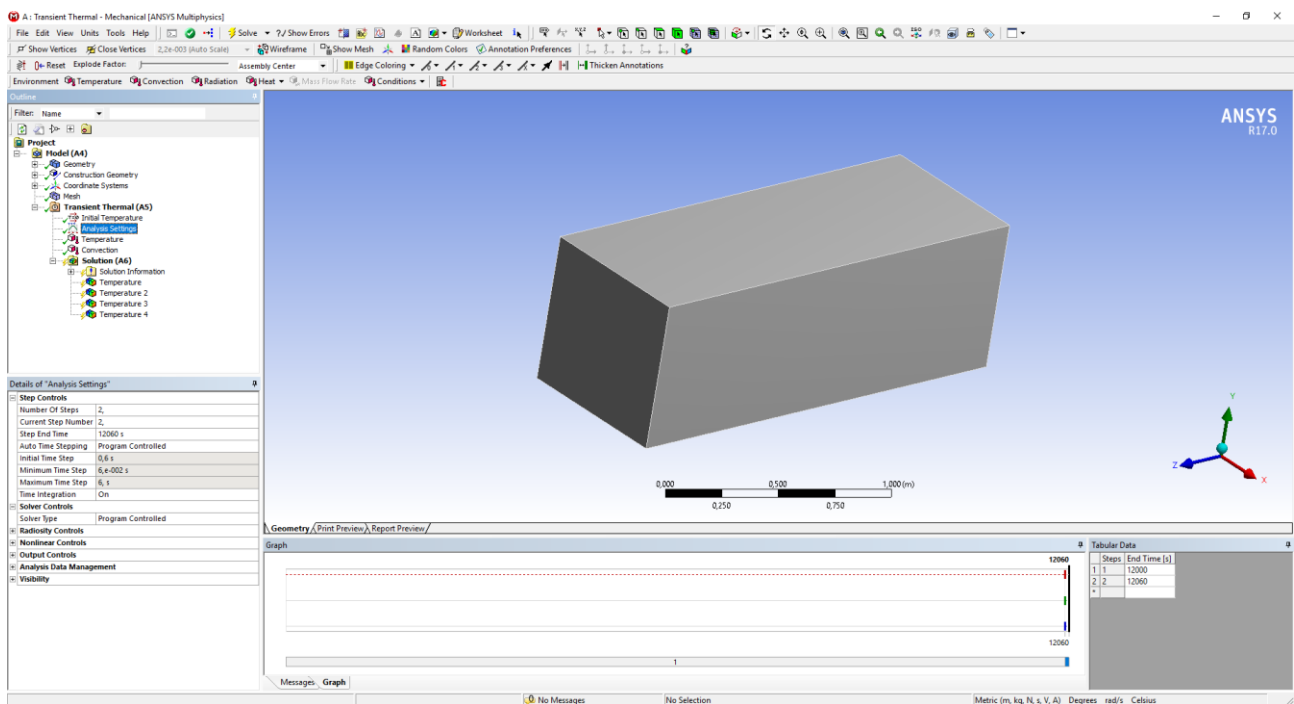


## Відкриття моделі з вікна проекту

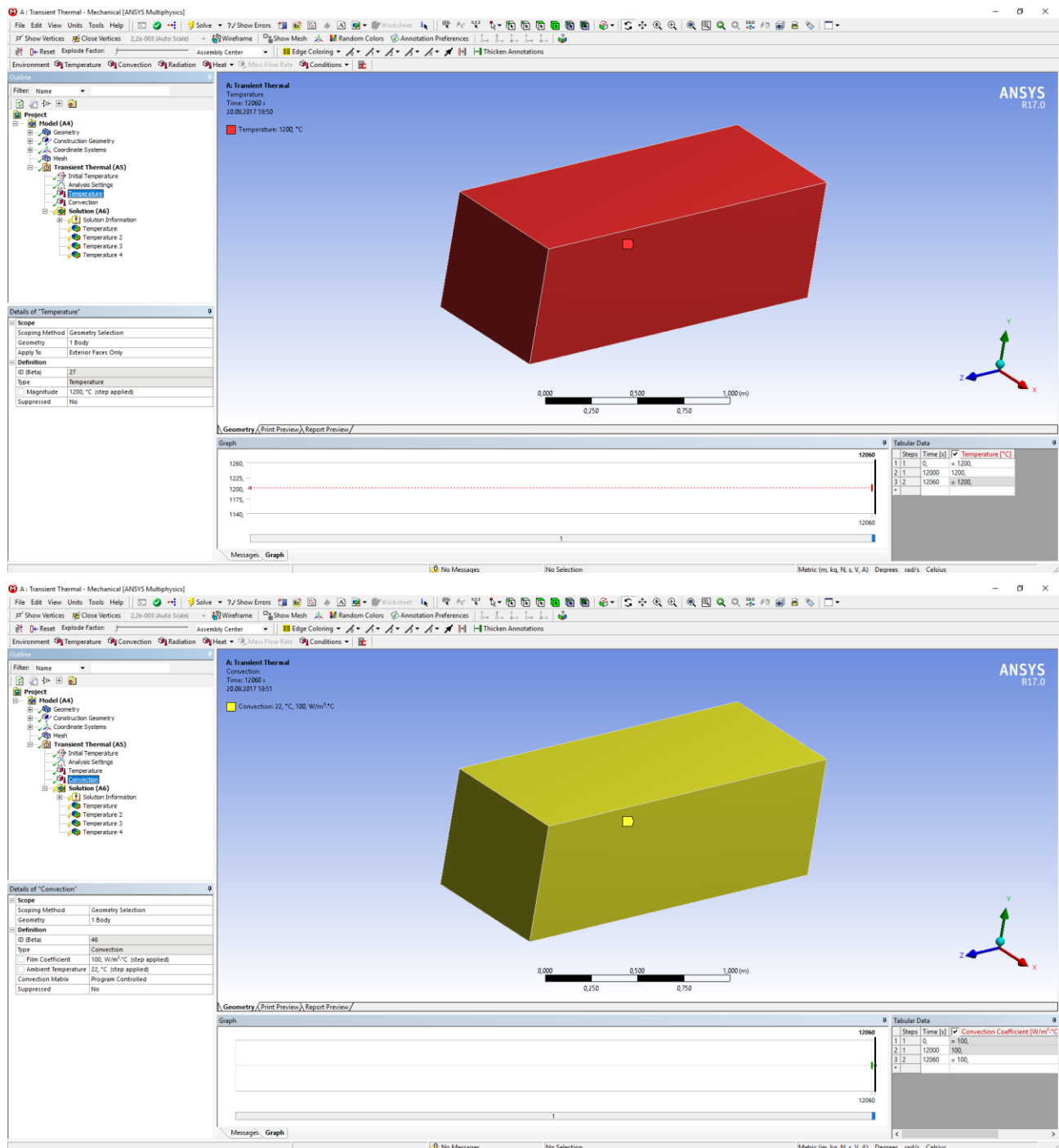
### Генерація сітки скінчених елементів.



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.



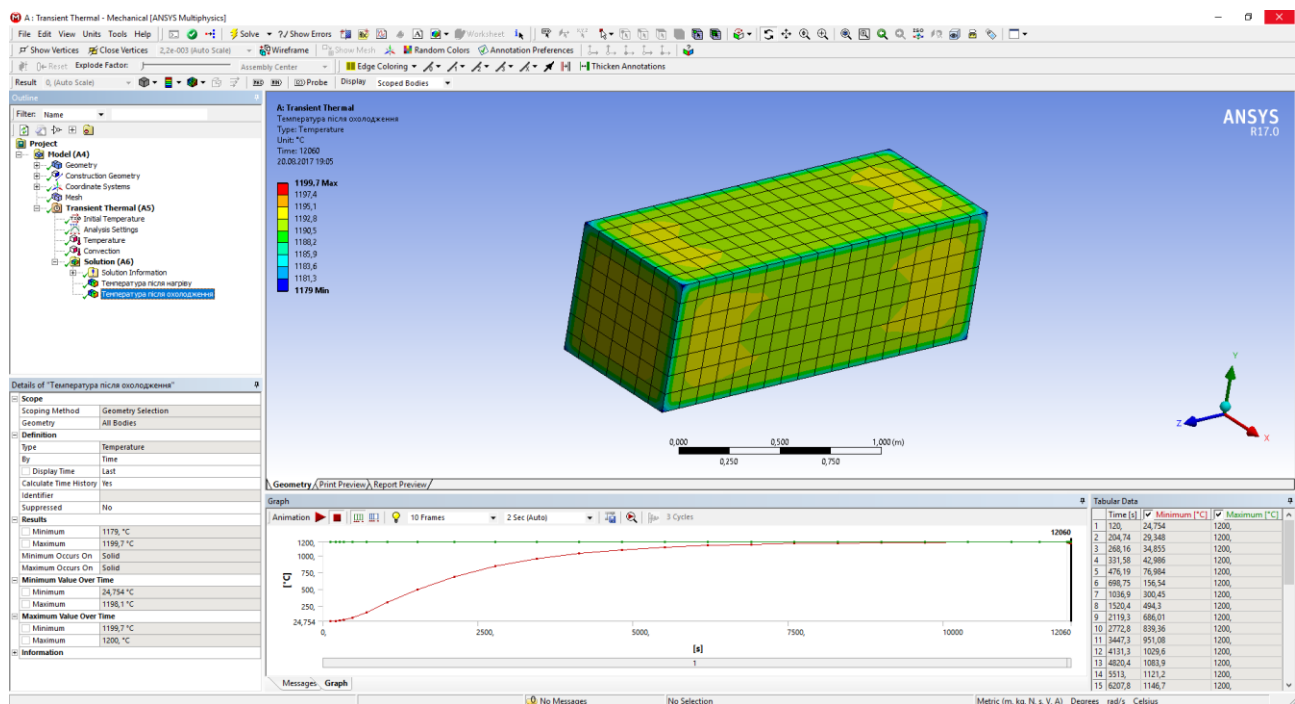
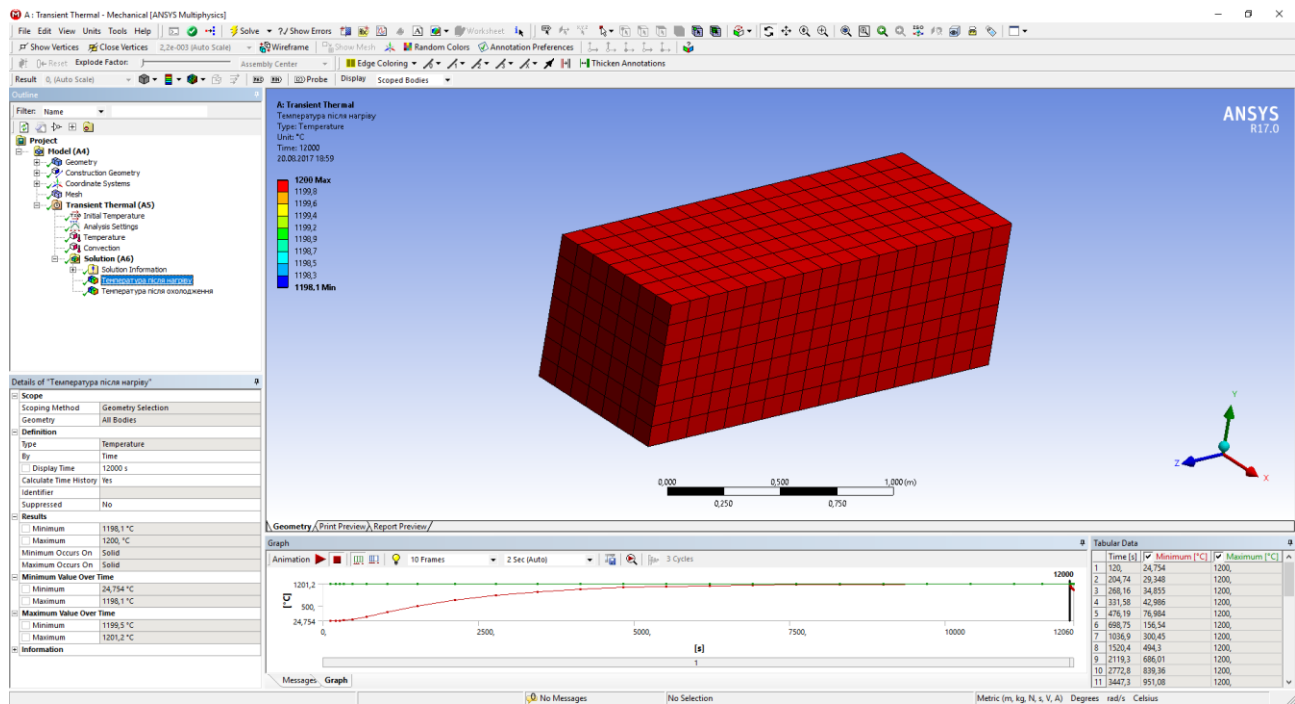
Граничні умови – температура 1200 °C на всі поверхні заготовки на першому етапі моделювання, конвективний теплообмін по всій поверхні з величиною коефіцієнта тепловіддачі 10 Вт/м<sup>2</sup>·К (що відповідає теплообміну з атмосферою).



**Виконуємо розрахунок за допомогою кнопки Solve**

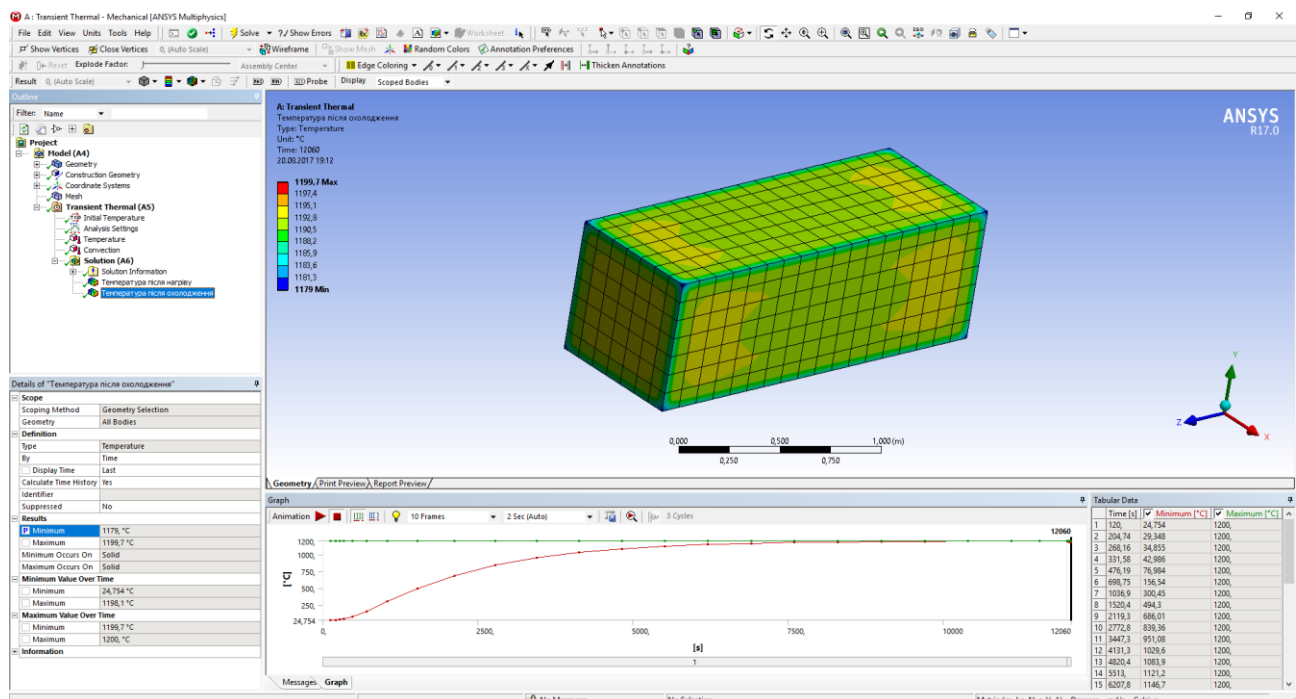
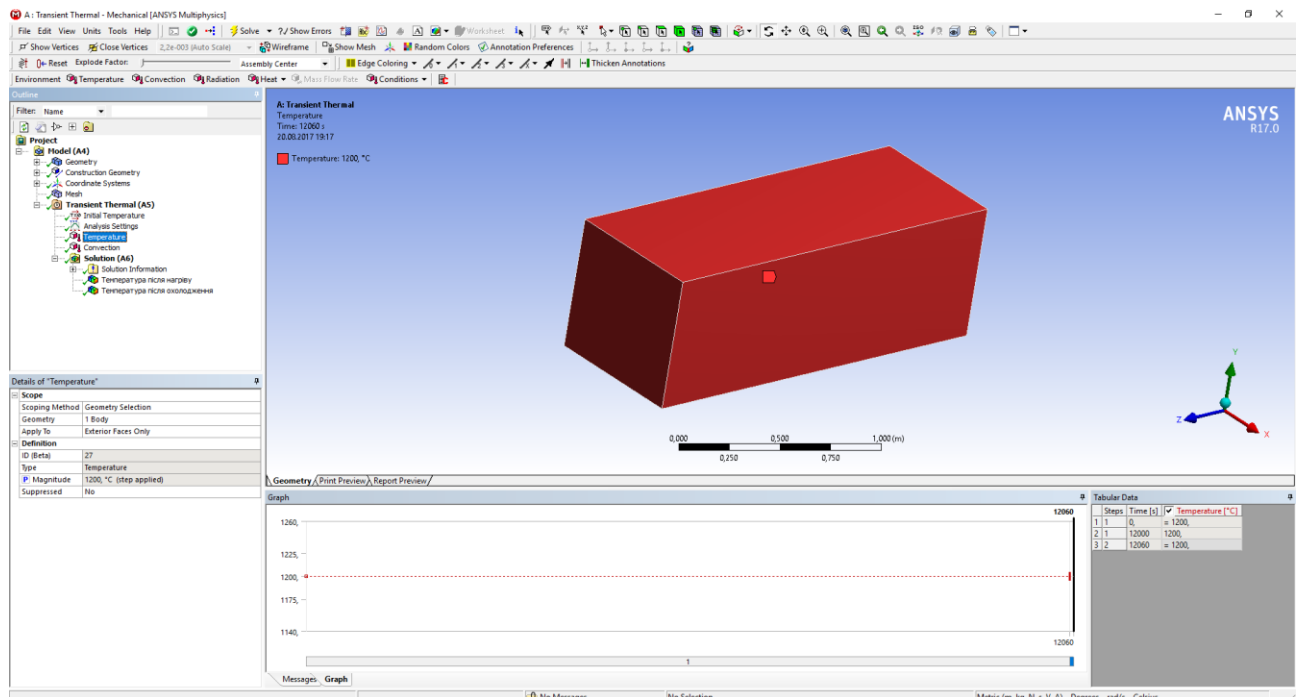
Після закінчення розрахунку додаємо в «дерево» моделі візуалізацію розподілу температур як результат після першого (нагрів) та другого етапів

розрахунку. Візуалізацію також можливо зробити також по будь-якому перерізу заготовки.

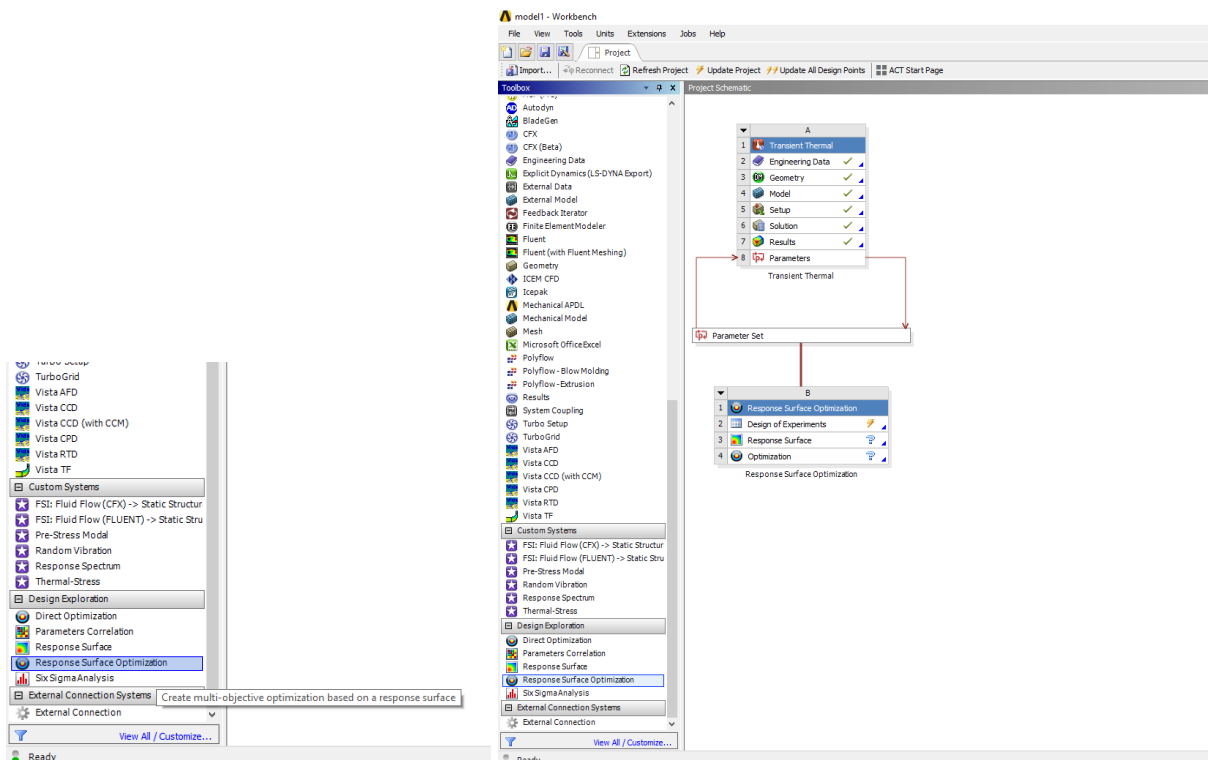


Як видно з отриманих результатів, мінімальна температура заготовки після моделювання нагріву склала 1198,1 °C, а після моделювання охолодження – 1179 °C.

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.

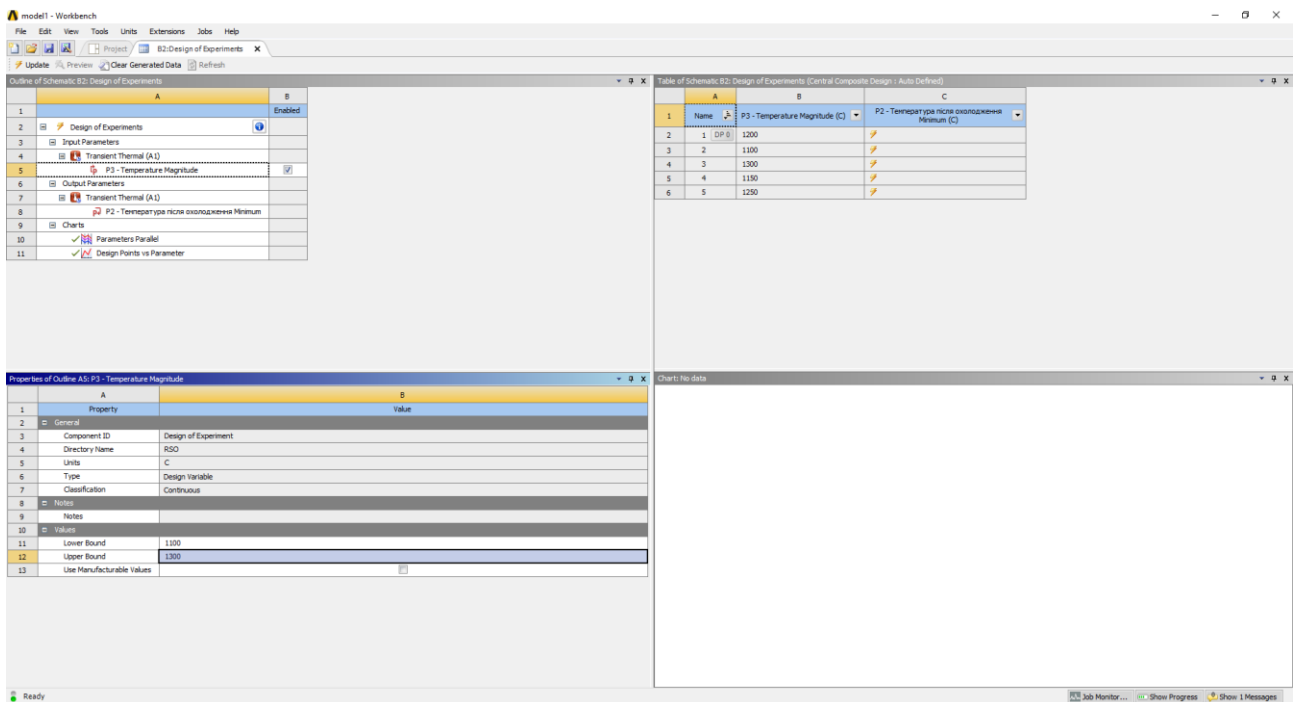


Після визначення пов'язаних параметрів відкриваємо вікно проекту і додаємо модуль оптимізації з використанням поверхні відгуку.



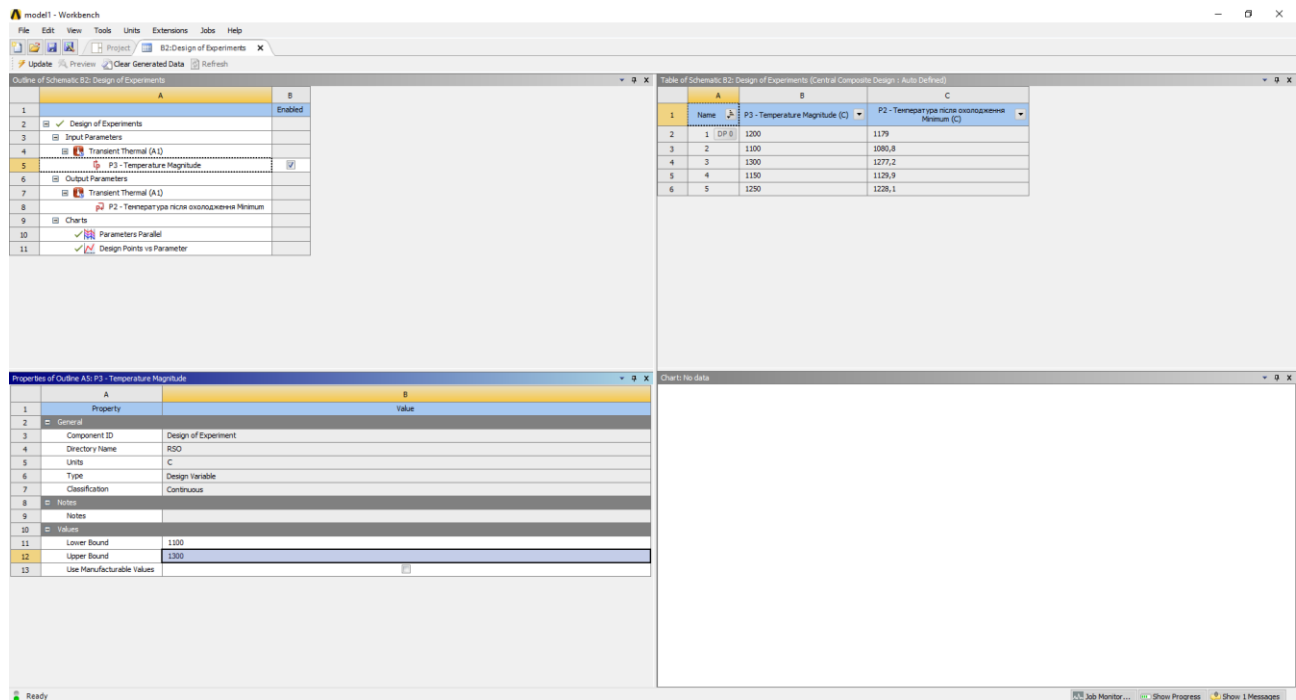
В модулі оптимізації відкриваємо Design of Experiments, обираємо температуру підігріву як вхідний параметр та встановлюємо діапазон, в якому він буде змінюватись під час моделювання. Мінімальна та максимальна величини за умови завдання – 1100 °C та 1300 °C відповідно.

Для перегляду плану експерименту натискаємо кнопку .

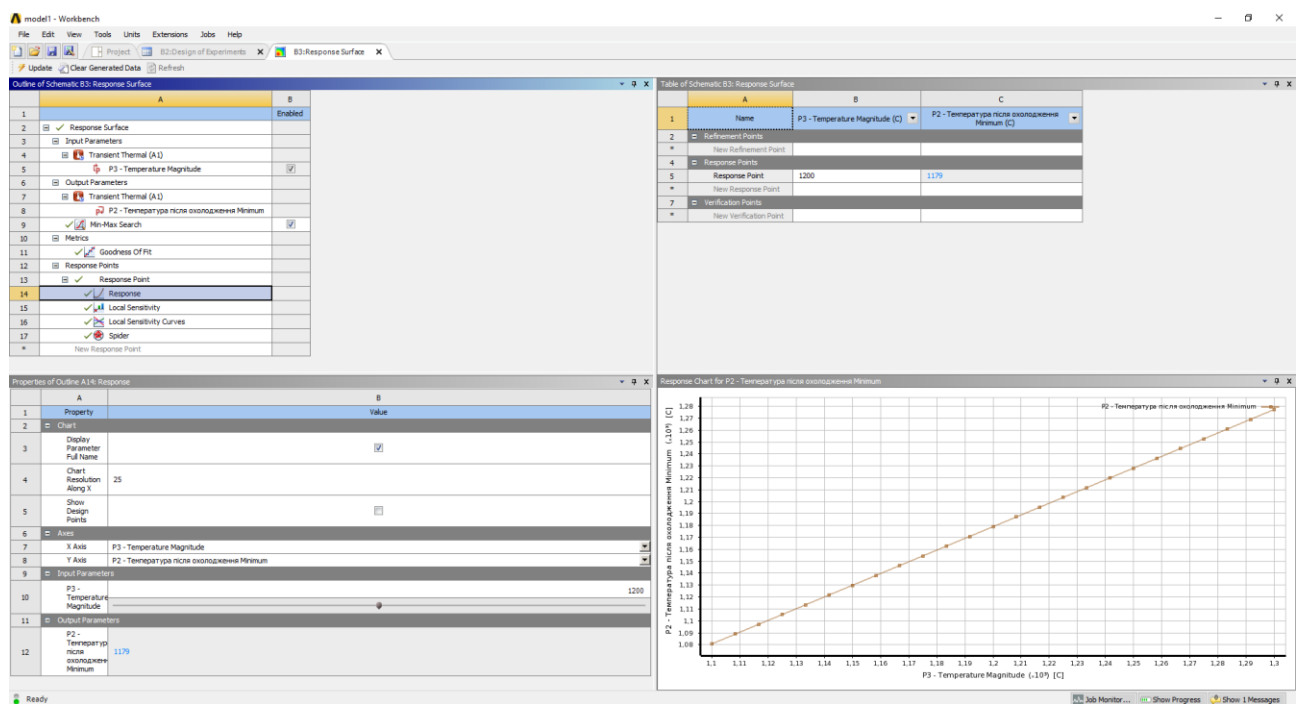




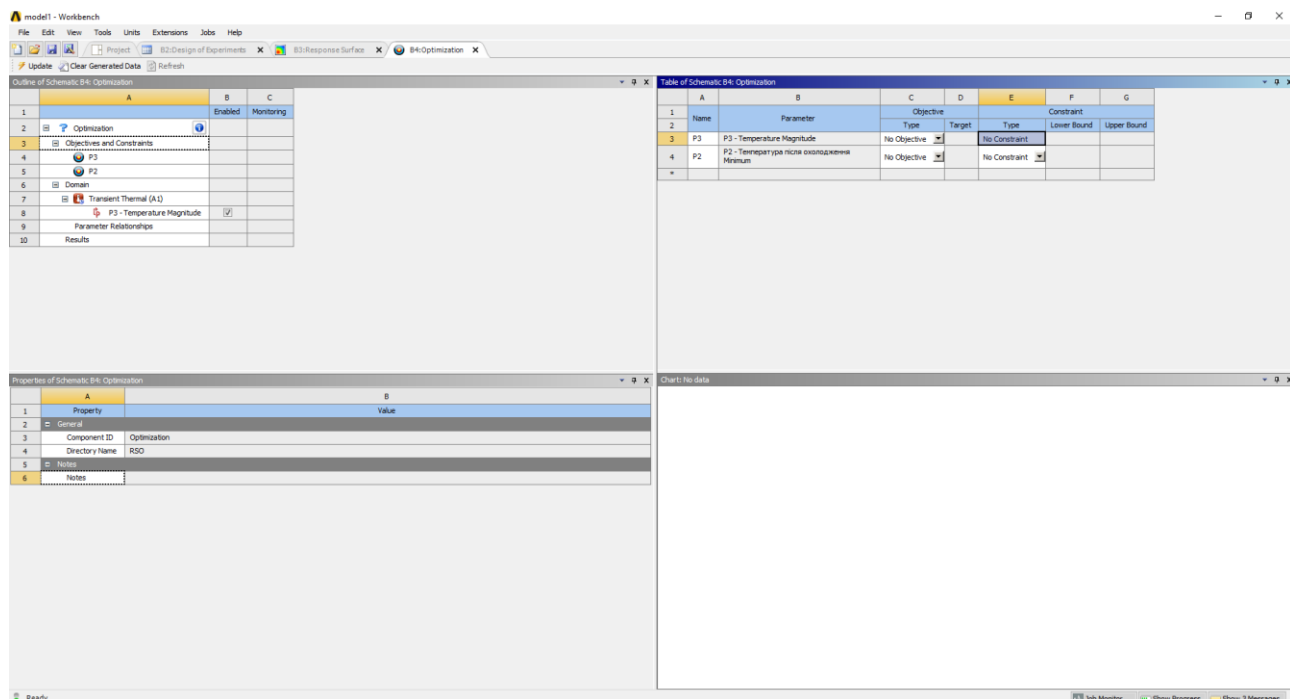
Після натискання кнопки Update автоматично буде проведено низку розрахунків зі значеннями температури підігріву відповідно до плану експерименту. Результати розрахунків наведено в таблиці.



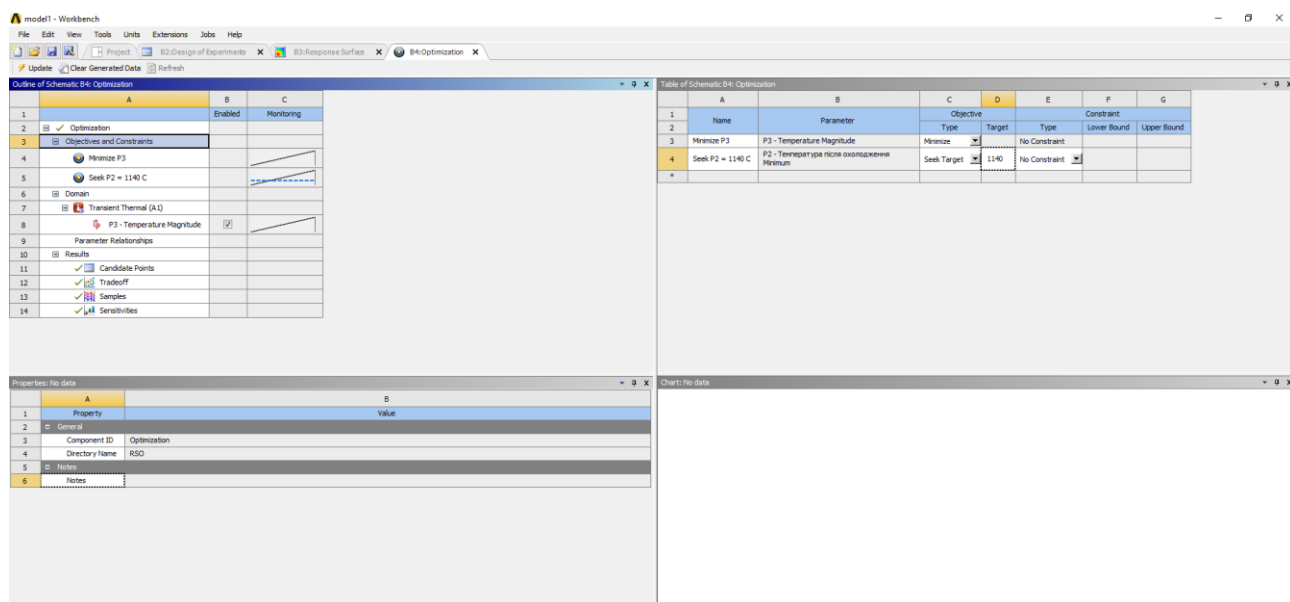
Повертаємось до вікна проекту та в модулі оптимізації відкриваємо Response Surface, далі натискаємо кнопку Update. Після розрахунку можливо оцінити математичні характеристики отриманої поверхні відгуку (в даному випадку – двовимірної).




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 °C.



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 методом скінчених елементів.

The screenshot displays the model1-Workbench interface for an optimization study. The 'Outline of Schematic B4: Optimization' panel on the left shows a tree view with 'Optimization' selected. The 'Table of Schematic B4: Optimization' panel on the right shows the optimization study details, including the goal 'Seek P2 = 1140 C' and the optimization method 'Screening'. The 'Properties of Schematic B4: Optimization' panel at the bottom shows the general properties of the optimization study.

Перший варіант є найбільш прийнятним (температура підігріву – 1159,9 °C). Натискаємо праву кнопку «миші» та у меню обираємо **Verify by Design Point Update**. 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.

The screenshot displays the model1-Workbench interface for an optimization study. The 'Table of Schematic B4: Optimization' panel on the right shows the optimization study details, including the goal 'Seek P2 = 1150 C' and the optimization method 'Screening'. The 'Properties of Schematic B4: Optimization' panel at the bottom shows the optimization status, including 'Converged: Yes' and 'Number of Evaluations: 1000'.

### 3.3 Варіанти вихідних даних

Студенти обирають варіанти відповідно до двох останніх цифр залікової книжки.

Якщо останні дві цифри залікової книжки перевищують 30, то для визначення номеру варіанта необхідно від числа із залікової книжки відняти 30, 60 або 90. Наприклад, якщо останні цифри залікової книжки становлять 78, то студенту необхідно виконувати варіант № 18 ( $78-60=18$ ). Вихідні дані наведено в таблиці 3.1.

Заготовка прямокутного поперечного перерізу;

матеріал заготовки – вуглецева сталь;

$h$  – висота заготовки, мм;

$b$  – ширина заготовки, мм;

$l$  – висота 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;

$t_o$  – час охолодження, с;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup>·К;

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

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для виконання індивідуального завдання

№ варіанта	$h$	$b$	$l$	$t_n$	$T_n$	$T_{n \min}$	$T_{n \max}$	$t_o$	$\alpha$	$T_{z \min}$
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

Продовження таблиці 2.1

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

### Рекомендована література

1. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – Москва: Машиностроение, 1980. – 304 с. – (София, Техника)
2. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва: Наука, 1976. – 278 с.
3. ANSYS Free Student Product [Електронний ресурс] // ANSYS. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.ansys.com/products/academic/ansys-student>.
4. Инженерный анализ в ANSYS Workbench / [В. А. Бруйка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова та ін.]. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. – 271 с.
5. Оптимизация [Електронний ресурс] // ПЛМ Урал – Режим доступу до ресурсу: <http://cae-expert.ru/discipline/optimizaciya>.