

*А.Г.АНДРЕЄВ*, канд. техн. наук, НТУ «ХП»;  
*О.М.МАРКІН*; УПА, Харків; *О.В.ЩЕПКИН*, НТУ «ХП»

## **ОПТИМІЗАЦІЯ НАГРІВАННЯ ПРИ ВИПЛАВЛЯННІ РЕЧОВИНИ З ДЕТАЛЕЙ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ**

Стаття присвячена оптимізації нагрівання артилерійського снаряда з метою виплавляння його вмісту в технологічному процесі розрядки застарілих боеприпасів. Нагрівання здійснюється за допомогою індукційно-нагрівального пристрою. Чисельні дослідження виконуються програмним комплексом із застосуванням методу скінченних елементів. Оптимізація виконується симплексним методом Нелдера-Міда.

The heat optimization for artillery shell to smelt its content in technological process of unloading the out-of-date ammunition is the subject of this article. The heat is carried out by inductive-heating device. The computational investigation is made by the finite element method. The simplex method by J.A.Nelder and R.Mead is applied for optimization.

**Актуальність теми.** Інциденти, які відбувалися в останні роки, на складах боеприпасів, що залишилися на території України після розпаду СРСР, вимагають утилізації боеприпасів, термін збереження яких минув. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки таких способів утилізації, які б поєднали ряд вимог, серед яких – безпека, економічність, технологічність, ефективність.

Найбільш перспективним представляється нагрівання виробів за допомогою індукційно-нагрівальних пристроїв струмом промислової частоти [1], які забезпечують високу економічність, легко вбудовуються в автоматичну лінію, дозволяють витримувати необхідний температурний режим. Технологічні процеси утилізації боеприпасів повинні бути строго регламентовані за температурними й часовими характеристиками, за споживаною потужністю в залежності від виду виробу. Таким чином, технологічний режим повинен забезпечувати оптимальні витрати енергії при дотриманні температурних, часових і інших умов з урахуванням специфіки виробів.

**Об'єктам дослідження** є деталі у вигляді тіл обертання, внутрішня порожнина яких заповнена вибуховою речовиною (ВР). Уміст цієї порожнини повинний бути максимально швидко й економічно виплавлений та вилучений при дотриманні вимог техніки безпеки й охорони навколишнього середовища.

Найбільше ефективно це можна зробити, нагріваючи деталь за допомогою індукційно-нагрівального пристрою до температури плавлення ВР, що забезпечить вихід ВР через отвір у виробі. Тому для розробки відповідної технології необхідно вирішити такі задачі:

- розв'язання нестационарної температурної задачі для тіла обертання, яке складається із зовнішньої сталеві деталі та внутрішньої порожнини, заповненої ВР;

- розв'язання задачі оптимізації енерговитрат процесу нагрівання виробу з температурними та часовими обмеженнями;
- створення відповідної розрахункової схеми, алгоритму й програмного забезпечення;
- виконати розрахунок нагрівання конкретних виробів в умовах розробленого технологічного процесу.

Для розв'язання температурної задачі був застосований метод скінченних елементів [2]. З'єднання, яке розраховується, апроксимується тороїдальними скінченними елементами (СЕ) трикутного поперечного перерізу з трьома вузлами; також використовуються стикувальні елементи, які моделюють теплопередачу між корпусом та ВР [3,4]. Розв'язання нестационарної температурної задачі здійснюється із застосуванням центральної різницевої схеми [5]. Для обернення матриці й обчислення переміщень застосований метод квадратного кореня [6], що враховує смугову структуру матриці температуропровідності конструкції.

Для оптимізації використовувався метод прямого пошуку, який не потребує обчислення похідних досліджуваної функції – метод комплексів [7]. Цей метод є модифікацією симплексного методу Нелдера-Міда, яка дозволяє враховувати обмеження. Завдання оптимізації полягає в мінімізації функції енергії  $W = W(\bar{q})$  [кВт], затрачуваної на нагрівання деталі. Параметром оптимізації є розподіл в осьовому напрямку потужності теплового потоку  $q$  [кВт/м<sup>2</sup>] на бічній поверхні деталі.

Метод оптимізації є ітераційним. Передбачається, що відома кількість варіюємих перемінних  $n$ , кількість обмежень  $m$  і початкова точка  $\bar{q}_0 = (q_1^0, q_2^0, \dots, q_n^0)$ , яка задовольняє всім обмеженням. Потім створюється початковий симплекс, тобто за формулою  $\bar{q}_k = \bar{q}_0 \pm [R] \Delta \bar{q}_0$  знаходиться  $k$  точок, які задовольняють обмеженням;  $[R]$  – діагональна матриця розміром  $n \times n$ , елементи діагоналі якої містять випадкові числа, розподілені в інтервалі  $(0,1)$ . Матриця  $\Delta \bar{q}_0$  визначає відстань між елементами симплекса: занадто мале її значення приведе до подовження процесу оптимізації, занадто велике – до великих витрат часу на пошук спробних точок, що задовольняють всім обмеженням. Далі обчислюється цільова функція  $W(\bar{q})$  у всіх  $k$  точках, причому  $k = 2n$  [8].

Ітераційна процедура методу комплексів робить пошук мінімуму переміщенням у напрямку до мінімуму усередині області обмежень. Для цієї процедури необхідні наступні кроки:

1. Знайти найгіршу точку симплекса  $\bar{q}_m$  з найбільшим значенням функції  $W(\bar{q})$  і знайти центр  $\bar{q}_c$  інших  $k-1$  точок  $\bar{q}_i = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^{k-1} \bar{q}_i$  (рис. 1).
2. Спробувати зміститися від точки  $\bar{q}_m$  й одержати при цьому точку  $\bar{q}_r$  відображенням точки  $\bar{q}_m$  відносно точки  $\bar{q}_c$ , використовуючи коефіцієнт ві-

дображення  $\alpha = 1,3$ , що можна записати як  $\bar{q}_r = (1 + \alpha)\bar{q}_c - \alpha\bar{q}_m$ .

3. Якщо точка  $\bar{q}_r$  є припустимою, то обчислюється значення функції в цій точці  $W(\bar{q}_r)$  і порівнюється з  $W(\bar{q}_m)$  – найбільшим значенням функції. Якщо  $W(\bar{q}_r) > W(\bar{q}_m)$  тобто «гірше», ніж найбільше значення, отримане раніше, або не виконуються обмеження, то послідовно перевіряються точки  $\bar{q}_{r1}, \bar{q}_{r2}, \dots$ , які є ближче до центра  $\bar{q}_c$ :

$$\bar{q}_r = (1 + \beta \cdot \alpha)\bar{q}_c - \beta \cdot \alpha\bar{q}_m,$$

де  $\beta$  послідовно приймає значення  $\beta_1, \beta_1^2, \beta_1^3, \dots$ . Рекомендоване значення  $\beta_1$  – від 0,5 до 0,8. Якщо при цьому не вдається одержати нову точку, слід забрати  $\bar{q}_m$  із симплекса і повернутися на крок 1 з меншим симплексом.

Якщо  $W(\bar{q}_r) < W(\bar{q}_m)$  то точка  $\bar{q}_m$  замінюється на точку  $\bar{q}_r$ , потім точки і значення функції комплексу знову упорядковуються і процес повертається на крок 1.

При перевірці збіжності методу використовуються: середнє квадратичне відхилення  $\sigma$  для  $k$  значень функції і максимальна відстань  $d$  між двома точками комплексу:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(W(\bar{q}_i) - \bar{f})^2}{k}, \quad \text{де} \quad \bar{f} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k W(\bar{q}_i).$$

Величини  $\sigma$  і  $d$  перевіряються на збіжність. Якщо ці обидві величини досить малі, то процедура пошуку мінімуму закінчується. У протилежному випадку необхідно повернутися на крок 1 і повторити процедуру.

Вибір  $k = 2n$  і  $\alpha = 1,3$  є емпіричним правилом. Перше значення частково запобігає передчасному стиску комплексу. Коефіцієнт відображення  $\alpha > 1$  дозволяє комплексу розширюватися і переміщатися в потрібному напрямі. Переміщення від точки  $\bar{q}_r$  до центра  $\bar{q}_c$  (див. рис. 1) стискають комплекс. Тому комплекс може переміщатися усередині припустимої області уздовж границь і обгинати кути в місцях перетинання обмежень.

Описаний алгоритм реалізує програма MKE-D мовою Fortran.

Були розроблені режими нагрівання для виплавляння ВВ із корпусів снарядів. Розбивка цих деталей на СЕ показано на рис. 2, 3. На тих же рисунках приведена система координат, використовувана на графіках. Потужність теплового потоку  $q$  задається, відповідно, у 18 і 16 точках в осьовому напрямі поперечного перерізу деталі (рис. 2,3) і змінюється між ними за лінійним законом. Оскільки вплив параметрів оптимізації, які задаються в суміжних точ-

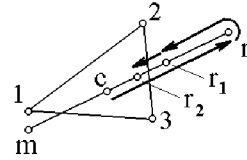


Рисунок 1 – Схема пошуку нової точки: 1-3,m – елементи симплекса, m – найгірша його точка, z – центр симплекса, r, r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub> – варіанти нової точки

ках, на розподіл тепла в деталі відрізняється незначно, для практичного використання слід усереднити значення параметрів. Це досягається введенням функції оптимізації у формі  $W_o = W(\bar{q}) + \delta \sum_{i=1}^{n-1} |q_i - q_{i-1}|$ , де  $\delta$  – емпірично встановлюваний коефіцієнт. Обмеження за температурою для ВР можуть установлюватися на стику виплавленої речовини і сталі або для всієї конструкції в цілому.

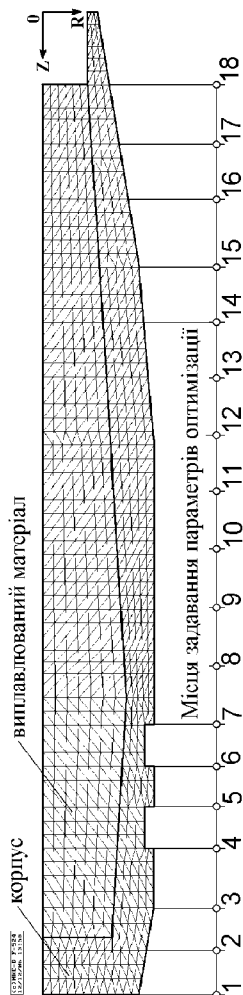


Рисунок 2 – Розбивка корпусу ОФ–412 з виплавленою речовиною на СЕ

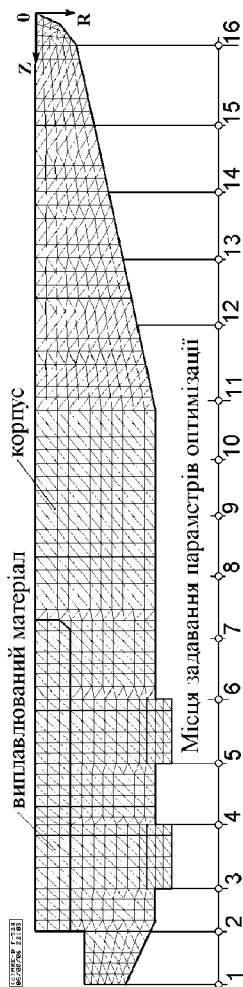


Рисунок 3 – Розбивка корпусу УБР–412Б з виплавленою речовиною на СЕ

### **Оптимізація нагрівання деталей ОФ–412, ОФ–415.**

Оптимізація нагрівання полягає в мінімізації витрат енергії на нагрівання деталі. Обмеження за температурою для ВР – 81-190 град. – установлюється на стику виплавленої речовини і стали.

Тривалість нагрівання деталі ОФ–412 прийнята 90 с. На рис. 4-6 приведений розподіл температури в поперечному перерізі деталі, розподіл в осьовому напрямі потужності нагрівання бокової поверхні, температура на зовнішній поверхні деталі, температура на стику сталі і виплавленої речовини. Дані приведені для моменту закінчення нагрівання в 90 с. Витрати енергії склали 304,5 кДж, потужність нагрівання – 3,38 кВт.

На рис. 4, 5 приведені результати оптимізації нагрівання деталі ОФ–415: розподіл температури в поперечному перерізі деталі, розподіл потужності нагрівання. Дані приведені для моменту закінчення нагрівання. Тривалість нагрівання складає 140 с. Витрати енергії – 330,2 кДж, потужність нагрівання – 2,36 кВт.

### **Оптимізація нагрівання деталі УБР–412Б**

Оптимізація нагрівання полягає в мінімізації витрат енергії на нагрівання деталі. Обмеження по температурі 88-170 град. діє на стику виплавленої речовини і стали. Тривалість нагрівання прийнята 15 с. Приблизно через 30 с. після закінчення нагрівання температура на стику ВР і стали досягає максимуму, тому розподіл на стику ВР і стали слід контролювати в момент часу 45 с. з початку нагрівання. Температура на зовнішній поверхні деталі не лімітується. Потужність теплового потоку на поверхні деталі задається в 16 точках в осьовому напрямку (див. рис. 3) і міняється між ними за лінійним законом. На рис. 7-9 приведений розподіл потужності нагрівання на зовнішній поверхні деталі в осьовому напрямі, розподіл температур на зовнішній поверхні деталі, на стику сталі і виплавленої речовини, у поперечному перерізі деталі. Витрати енергії склали 287,6 кДж, потужність нагрівання – 19,2 кВт.

У випадку введення додаткового обмеження за температурою для всього об'єму деталі в 170 град. необхідна температура 88 град. на стику ВР і стали досягається лише після двох включень індуктора – у моменти часу 0-15 с. і 45-50 с. На рис. 7, 10 приведений рекомендований варіант нагрівання, побудований на основі оптимального розрахунку при обмеженні за температурою для деталі в 170 град. Загальні витрати енергії склали 351,9 кДж, потужність нагрівання – 17,6 кВт.

**Висновки.** Було проведено дослідження теплового стану деталей у вигляді тіл обертання при їхньому нагріванні індукційно-нагрівальними пристроями для виплавлення з них речовини з метою оптимізації технологічного процесу.

Результати розрахунку деталей типу ОФ показали: на початковому етапі необхідне додаткове нагрівання донної частини деталі, яке може знижуватися

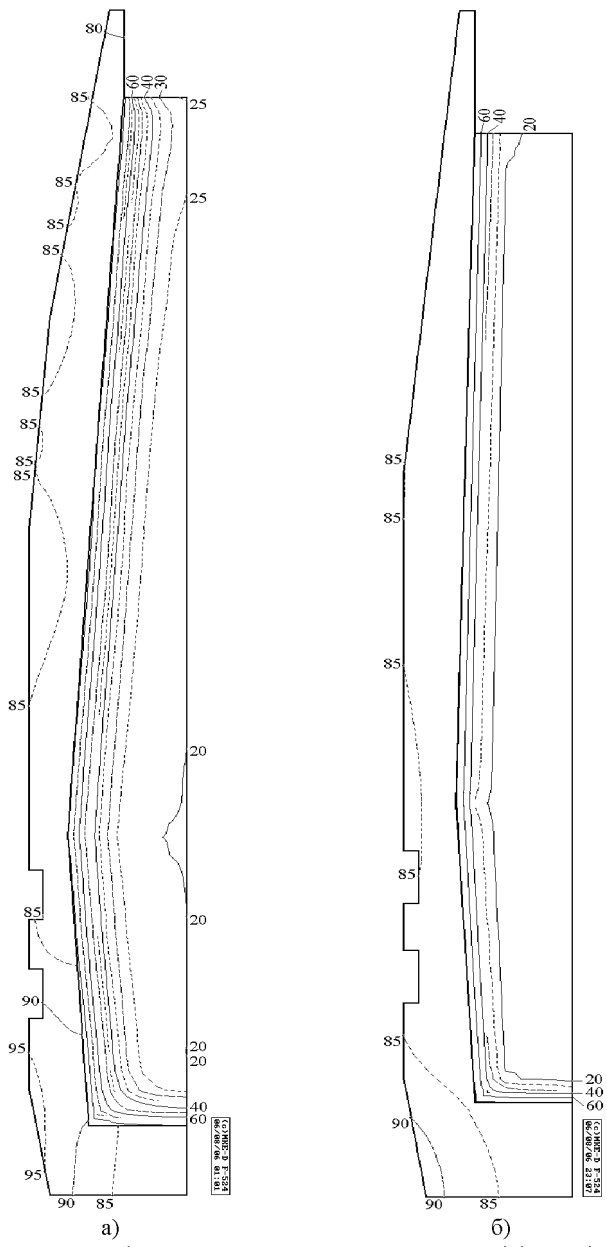


Рисунок 4 – Розподіл температури в поперечному перерізі деталі ОФ–412 при оптимальному нагріванні тривалістю 90 с.(а) і деталі ОФ–415 при нагріванні тривалістю 140 с. (б) у момент закінчення нагрівання, град.

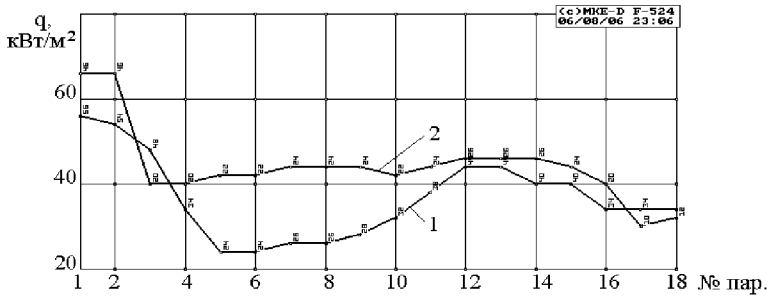
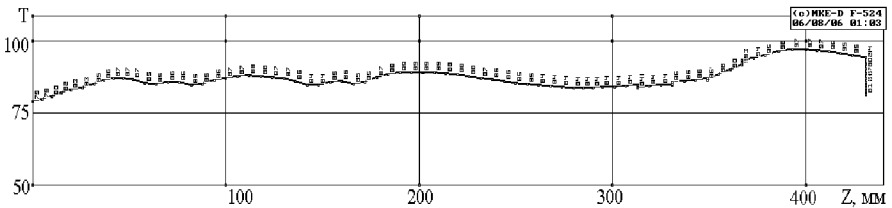
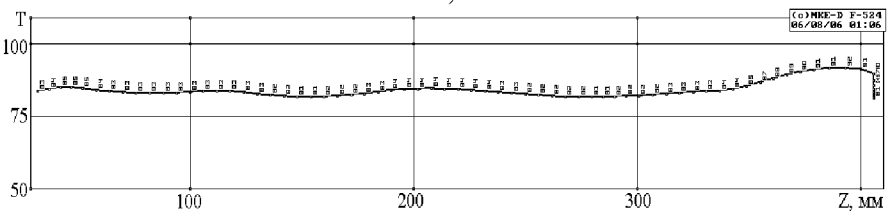


Рисунок 5 – Рекомендований розподіл потужності нагрівання  $q$  [кВт/м<sup>2</sup>] на зовнішній поверхні деталей: 1. деталь ОФ–412 при тривалості нагрівання 90 с.; 2. деталь ОФ–415, при тривалості нагрівання 140 с.



а)



б)

Рисунок 6 – Розподіл температури на зовнішній поверхні (а), на стику сталі і ВР (б) деталі ОФ–412 при тривалості нагрівання 90 с., град.

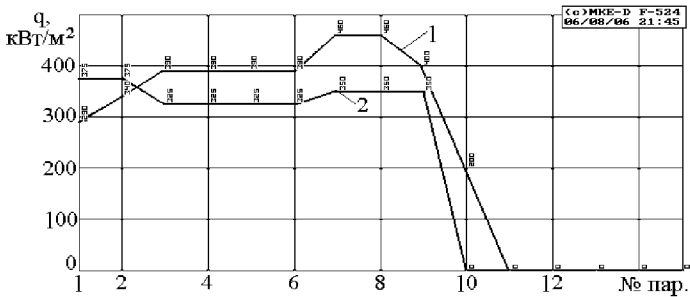


Рисунок 7 – Рекомендований розподіл потужності нагрівання на зовнішній поверхні деталі УБР–412Б  $q$ , кВт/м<sup>2</sup> при обмеженні за температурою в 170 град. 1 – на стику сталі і ВР; 2 – по всьому об'єму деталі

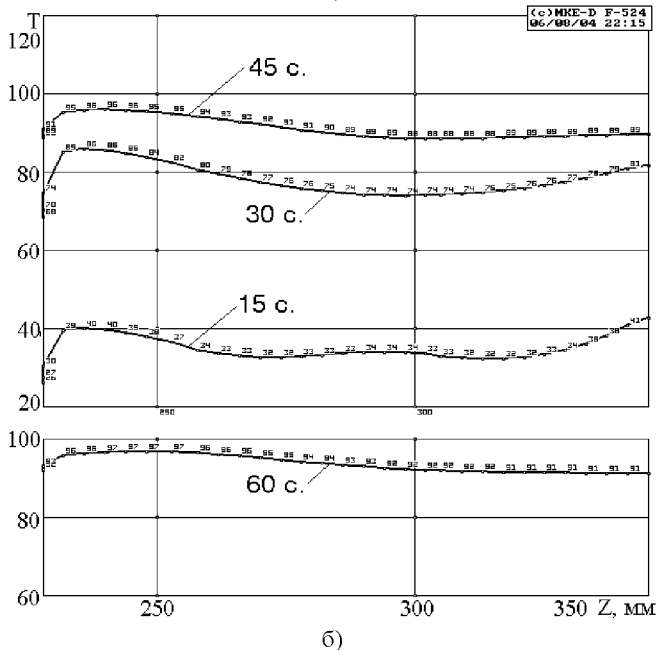
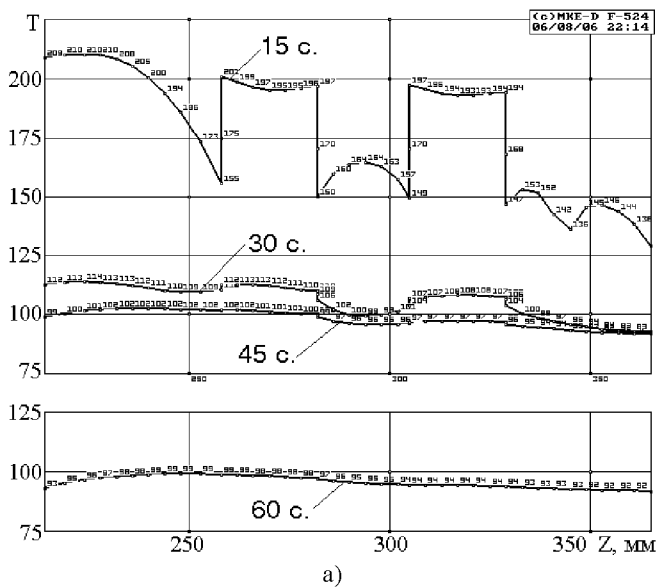


Рисунок 8 – Розподіл температури на зовнішній поверхні (а), на стику сталі і ВР (б) деталі УБР-412Б. Обмеження за температурою в 170 град. діє на стику сталі і ВР



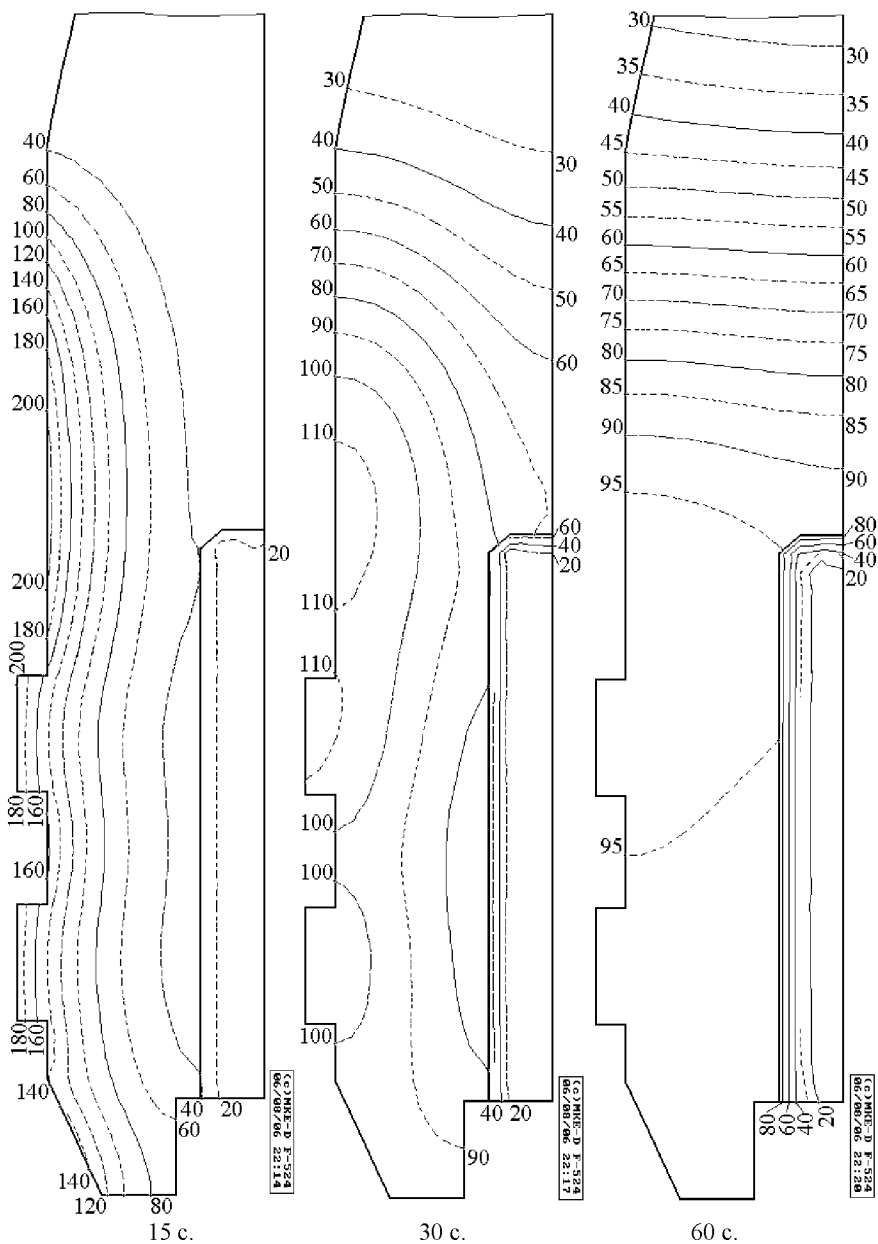
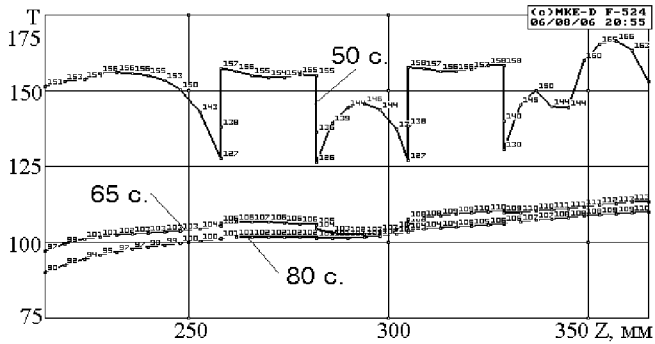
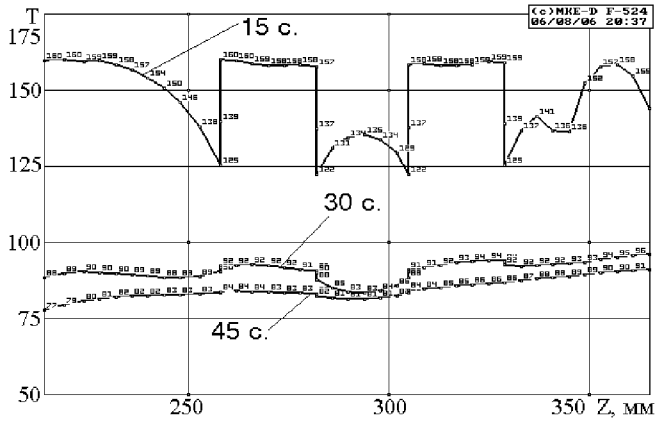
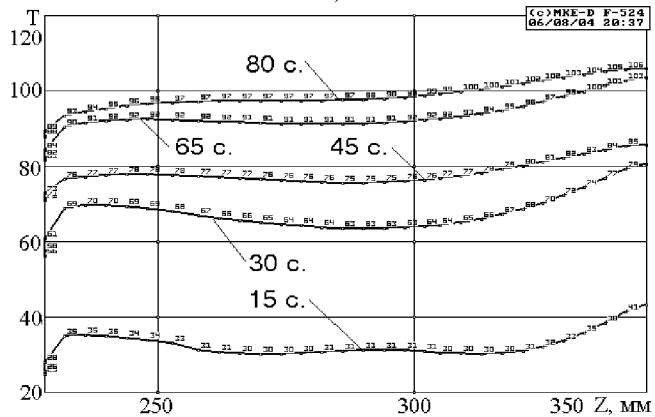


Рисунок 9 – Розподіл тепла в поперечному перерізі деталі при нагріванні деталі УБР-412Б, град.  
 Обмеження за температурою в 170 град. діє на стику стали і ВР



a)



б)

Рисунок 10 – Розподіл температури на зовнішній поверхні (а), на стику сталі і ВР (б) деталі УБР-412Б. Обмеження за температурі в 170 град. діє по всьому об'єму деталі

в міру виплавляння речовини. При цьому досягається регламентований для даних деталей інтервал температур 81-190 град., причому різниця температур на зовнішній поверхні деталі та на стику сталі й виплавленої речовини не перевищує 10 град., що дозволяє легко контролювати процес виплавляння.

Результати розрахунку деталі УБР-412Б показали: при рекомендованому обмеженні температури зовнішньої поверхні деталі в 170 град. у процесі однократного нагрівання необхідна мінімальна температура 88 град. на стику сталі й виплавленої речовини не може бути отримана. При нагріванні зовнішньої поверхні деталі до 210 град. через 60 с. після початку нагрівання на стику сталі і ВВ забезпечується температура, необхідна для виплавляння. Різниця температур на зовнішній поверхні деталі і на стику сталі і ВР може досягати 150 град., однак протягом 45 с. практично вирівнюється, що забезпечує можливість контролю технологічного процесу.

Отримані варіанти розрахунку потужності початкової стадії нагрівання дають підстави для створення реальних індукційно-нагрівальних пристроїв.

**Список літератури:** 1. Андреев Г.Я. Тепловая сборка колесных пар. – Харьков, Изд-во Харьковского университета, 1965. – 227 с. 2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – Москва, Мир, 1975. – 541 с. 3. Подгорный А.Н., Гонтаровский П.П., Киркач Б.Н. и др. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. – Киев: Наукова думка, 1989. – 232 с. 4. Миллер В.С. Контактный теплообмен в элементах высокотемпературных машин. – Киев: Наукова думка, 1966. – 164 с. 5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М., Мир, 1979. – 392 с. 6. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М., Физматгиз, 1963. – 660 с. 7. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: в 2-кн. Кн. 2. – М.: Мир, 1986. – 320 с. 8. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. - М.: Радио и связь, 1988. - 128 с.

*Надійшла до редколегії 07.03.2007*

УДК 658.515 (088.8)

*А.Г.АНДРЕЕВ*, канд. техн. наук; *А.В.ЩЕПКИН*, НТУ «ХПИ»

## **РАЗБОРКА ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕРМОВОЗДЕЙСТВИЯ**

У статті описаний спосіб розбирання пресових з'єднань конструкцій типу вал-втулка, який складається з операцій нагрівання з'єднання та наступного швидкого його охолодження рідким азотом.

In the article the press junctions disassembly method of a type the shaft-cartridge is described. The method consists of heat of junction and quick postcooling by liquid nitrogen.

**Актуальность темы.** Известен способ разборки прессовых соединений деталей типа вал-втулка, включающий операции быстрого нагрева втулки до