

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ТЕХНОЛОГІЯ НАГРІВУ
ТА НАГРІВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ**

до виконання практичних робіт

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавр за освітніми
програмами: Прикладна механіка пластичності матеріалів,
Технологія виробництва літальних апаратів
спеціальності 131 «Прикладна механіка»*

Київ 2021

Технологія нагріву та нагрівальне обладнання: до виконання практичних робіт [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.М. Горностай, С.Ф. Сабол, А.Д. Лавріненко. Електронні текстові дані (1 файл: 678 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 22 с.

Гриф надано Методичною радою ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 13.05.2021 р.) за поданням Вченої ради Механіко-машинобудівного інституту (протокол № 7 від 22.02.2021 р.)

Електронне мережеве видання

ТЕХНОЛОГІЯ НАГРІВУ ТА НАГРІВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ

до виконання практичних робіт

Укладачі: *Горностай Вадим Миколайович*, канд. техн. наук,
Сабол Сергій Францович, канд. техн. наук, доц.
Лавріненко Антон Дмитрович, канд. техн. наук

Відповідальний редактор Піманов В.В., к.т.н

Рецензент Ковальов В.А., д.т.н., проф., професор кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки механіко-машинобудівного інституту

Навчальний посібник призначений для закріплення знань отриманих з лекційного курсу «Технологія нагріву та нагрівальне обладнання. Розглянуті питання практичного визначення таких важливих параметрів процесу нагрівання металів як: окалиноутворення, втрати тепла при транспортуванні заготовки від нагрівального пристрою до технологічного обладнання, визначення теоретичного та експериментального значення коефіцієнту корисної дії електропечі та визначення параметрів, що впливають на його значення. Наведено порядок визначення характеристик процесу індукційного нагрівання заготовок. Представлено методику визначення градієнта температур та коефіцієнта теплопередачі.

Вступ

При вивченні дисципліни «Технологія нагріву та нагрівальне обладнання» розглядаються наступні питання: нагрів металу перед обробкою тиском, зокрема, як нагрів впливає на структуру та фізико-механічні властивості металу, розглядаються основні параметри, які характеризують процес нагріву заготовок, способи нагріву переваги та недоліки.

Практичні заняття присвячені закріпленню знань отриманих на лекціях та розглядають практичні задачі по визначенню параметрів технологічного процесу нагрівання металу, вибору температурних інтервалів нагрівання, втрат металу при різних способах нагрівання та ін..

Практичне заняття №1

Тема: Визначення окалиноутворення при нагріві сталевих заготовок.

Мета: Визначити втрати матеріалу від його окислення при нагріві в електричній печі в атмосфері повітря, а також вплив на окалиноутворення тривалість та температура нагріву.

Теоретичні відомості

При нагріві металів в вогняних печах крім процесів, пов'язаних з передачею тепла, відбуваються також процеси хімічної взаємодії між продуктами горіння та поверхнею металу що нагрівається. В склад продуктів горіння зазвичай входять вуглекислий газ CO_2 , кисень O_2 , водяна пара H_2O , азот N_2 , а також невелика кількість оксиду сірки SO_2 , оксид вуглецю CO і водень H_2 . При високих температурах кисень, пари води, вуглекислий газ та оксиди сірки можуть окислювати метал в наслідок дифузії кисню із продуктів горіння в поверхню заготовок що нагріваються, абсорбція його на поверхні, дифузії реагуючих речовин через шар окалини на зустріч кисню та кристалографічних перетворень. При цьому утворюються оксиди заліза FeO , Fe_2O_3 , а також їх суміш Fe_3O_4 .

При окисленні металів в вогняних печах на величину угару впливає склад газів, температура і тривалість нагріву, форма і розміри заготовок, хімічний склад металу та інші фактори.

Втрати металу від окислення можна кількісно визначити наступними величинами:

1) масовим окалиноутворенням – кількість металу, окисленими в процесі нагріву і вираженими в процентах від його початкової маси.

Масовий угар, %:

$$\lambda = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \cdot 100, \text{ де } q_1, q_2 - \text{ вага заготовки відповідно до і після нагріву}$$

та очищення, г;

2) поверхневим окалиноутворенням – відношення кількості окисленого металу до одиниці площі заготовки що нагрівається, г/см² :

$$a = \frac{q_1 - q_2}{S}, \text{ де } S - \text{ повна площа поверхні заготовки, см}^2;$$

3) швидкістю окислення – відношення величини поверхневого окалиноутворення до часу нагрівання, г/(см² год):

$$\omega = \frac{q_1 - q_2}{S \cdot \tau}, \text{ де } \tau - \text{ час нагріву заготовки, год.}$$

Вихідні данні для розрахунку.

Заготовки для теоретичного дослідження процесу окалиноутворення – з вуглецевої сталі \varnothing 4 мм та довжиною 60 мм, \varnothing 6 та довжиною мм 70 мм (поверхневі дефекти та сліди корозії на заготовках не допускаються); Приймаємо нагрівання в електричній нагрівальній пічці (нагрівальний елементи – ніхромові спіралі або силітові стержні); температура печі регулюється і задається за допомогою електронного автоматичного потенціометра, наприклад, типу ПСР. Датчиком регулятора температури служить платинова термопара. Матеріал футеровки печі – шамотна цегла класу А.

Порядок виконання роботи.

Для теоретичних розрахунків змодельємо процес нагрівання заготовок за наступними етапами.

Чотири чистих сталєних заготовки з дрота зважити на аналітичних вагах з точністю до 0,001 г. Після цього заготовки в шамотні підставки та загрузити в піч. Підставки повинні бути пронумеровані.

Температуру печі доводять до необхідної, в залежності від марки сталі, а потім фіксують температуру кожних 3 хвилини.

Для виявлення впливу тривалості нагріву на окалино утворення, заготовки виймати з печі кожних 10 хвилин, потім охолодити їх в посудині з водою для того, щоб до втрат металу від окислення в печі не добавились

втрати від окалиноутворення на повітрі при охолодженні заготовки. Охолоджену заготовку очистити від окалини наждачним папером.

Після очищення кожену заготовку зважити повторно та визначити величину окалиноутворення та швидкість окислення.

При визначенні поверхневого окалиноутворення торцевими площами заготовок знехтувати в зв'язку з їх незначними розмірами.

Результати вимірів та розрахунків занести до таблиці 1.

Визначимо теоретичним шляхом вплив окалиноутворення на втрати металу для наступних вихідних даних (таблиця 2)

Таблиця 1

№ Заготовки	Маса заготовки до нагріву, г	Середня температура печі, °С	Тривалість нагріву, год	Маса заготовки після нагріву, г	Угар		Швидкість окислення, г/(см ² год)
					Масовий, %	Поверхневий, г/см ²	

Таблиця 2

Діаметр/Довжина, мм	Маса заготовки до нагріву, г	Середня температура печі, °С	Тривалість нагріву, год	Маса заготовки після нагріву, г	Угар		Швидкість окислення, г/(см ² год)
					Масовий, %	Поверхневий, г/см ²	
Ø 4/60		1200°С	30хв		5%		
Ø 4/60		1200°С	40хв		7%		
Ø 4/60		1200°С	50хв		9%		
Ø 4/60		1200°С	60хв		12%		
Ø 6/70		1200°С	30хв		6%		
Ø 6/70		1200°С	40хв		9%		
Ø 6/70		1200°С	50хв		12%		
Ø 6/70		1200°С	60хв		15%		

Практичне заняття №2

Тема: Визначення втрат теплоти при транспортуванні заготовки до ковальського обладнання

Мета: Теоретично та експериментально визначити температуру поверхні та центральної частини нагрітих заготовок до моменту початку пластичної деформації

Теоретичні відомості

Під час транспортування, за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем, заготовки охолоджуються. При чому температура поверхні заготовки охолоджується швидше ніж центральної частини. До початку кування-штампування в поперечному перерізі заготовки виникає перепад температур.

Для розрахунку роботи деформації, а також вибору потужності ковальсько-штампувального обладнання необхідно знати температуру заготовки в момент початку деформації.

Якщо відома температура нагріву металу в нагрівальному пристрої, тривалість та спосіб транспортування, габаритні розміри заготовки та теплофізичні параметри металу, то зміна температури поверхні та глибинних шарів заготовки можна визначити по наступній методиці.

Тривалість руху заготовки від нагрівального пристрою до ковальсько-штампувального обладнання

$$\tau = \frac{S}{V},$$

де, S – відстань між нагрівальним пристроєм та ковальсько-штампувальним обладнанням, м;

V – середня швидкість руху заготовки, м/год.

Критерії Фур'є та Біо для моменту початку кування-штампування

$$F_0 = \frac{\alpha \cdot \tau}{\ell^2},$$

де, α – температуропровідність, $\text{м}^2 / \text{год}$;

τ – час транспортування заготовки, год;

ℓ – характерний лінійний розмір, що дорівнює, наприклад, для циліндричної заготовки її радіусу, мм;

$$Bi = \frac{d \cdot \alpha}{\lambda}$$

де, α – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м² · К);

d – діаметр заготовки, м;

λ – теплопровідність, Вт/(мК).

Температура поверхні заготовки до моменту початку пластичної деформації:

$$t_n = \theta_n \cdot (t_0 - t_c) + t_c,$$

де, θ_n - безрозмірна відносна температура поверхні заготовки,

$$\theta_n = f(F_0, Bi);$$

t_0, t_c - температура заготовки одразу після нагріву та навколишнього середовища відповідно, °С.

Температура в центральній частині заготовки до моменту початку деформації:

$$t_y = \theta_y (t_0 - t_c) + t_c,$$

де, $\theta_y = f(F_0; Bi)$ - безрозмірна відносна температура в центральній

частині заготовки.

Розглянемо для прикладу наступну задачу.

Визначити гранично допустиму розбіжність температури у перетині пластинчатої заготовки зі сталі 20 при її нагріві від 200⁰ до 300⁰С .(Довідка: для сталі 20 $\sigma_s = 280$ МПа, $E=1,945 \cdot 10^5$ МПа, $\beta=12,1 \cdot 10^{-6}$ 1/°С)

Розв'язок:

Температурні напруження, які виникають при нагріві тіла можна визначити за формулою $\sigma = K_\phi * \beta * E * \Delta t$, де K_ϕ – коефіцієнт форми перетину деталі = 0,95, якщо у перетині деталі прямокутник і 0,74, якщо в перетині

деталі коло, β - коефіцієнт лінійного розширення матеріалу деталі, E - модуль Юнга матеріалу деталі, Δt - різниця температур між поверхневим шаром і центральним шаром у перетині заготовки.

Граничну допустиму розбіжність температур у перетині заготовки можна розрахувати за формулою $\Delta t_{сп.} = \sigma_{\phi} / k_{\phi} * \beta * E = 280 \text{ МПа} / 1,945 * 10^5 \text{ МПа} * 12,1 * 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C} * 0,95 = 125^\circ\text{C}$

Завдання для самостійної роботи

ЗАВДАННЯ №1

Визначити гранично допустиму розбіжність температури у перетині циліндричної заготовки зі сталі 40 при її нагріві від 20° до 100°C .

Довідка: для сталі 40 $\sigma_{\phi} = 500 \text{ МПа}$, $E = 1,887 * 10^5 \text{ МПа}$, $\beta = 14,5 * 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (Відповідь: 256°C)

ЗАВДАННЯ №2

Чи можливо допустити різницю температур 200°C між поверхнею та серединою циліндричної заготовки зі сталі 30 при її нагріві від 200° до 300°C .

Довідка: для сталі 30 $\sigma_{\phi} = 280 \text{ МПа}$, $E = 1,97 * 10^5 \text{ МПа}$, $\beta = 13,9 * 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (Відповідь: Ні. Температурні напруження перевищать межу міцності матеріалу.)

ЗАВДАННЯ №3

Нагріта заготовка $\varnothing 120 \times 300$ транспортується до преса. Критерій Фур'є, визначений за номограмою $\theta = f(F_0, V_i)$ в момент обробки має становити $1,2 * 10^{-2}$. Яка максимальна відстань від печі до преса якщо швидкість транспортера становить 1 м/с .

Довідка: коефіцієнт теплопровідності матеріалу заготовки $a = 0,56 * 10^{-5}$, втратою тепла через бічні поверхні заготовки знехтувати. (відповідь $7,7 \text{ м}$)

ЗАВДАННЯ №4

Визначити гранично допустиму розбіжність температури у перетині пластинчатої заготовки зі сталі 30X при її нагріві від 20° до 100°С .

Довідка: для сталі 30X $\sigma_s = 640$ МПа, $E=2,18 \cdot 10^5$ МПа, $\beta = 13,4 \cdot 10^{-6}$ 1/°С (відповідь 230°С)

ЗАВДАННЯ №5

Визначити гранично допустиму розбіжність температури у перетині циліндричної заготовки зі сталі 20 при її нагріві від 20° до 100°С.

Довідка: для сталі 20 $\sigma_s = 470$ МПа, $E=2,02 \cdot 10^5$ МПа, $\beta = 11,7 \cdot 10^{-6}$ 1/°С (відповідь 278°С)

Завдання для експериментальних робіт

Матеріал, інструмент, обладнання

Циліндричні заготовки з вуглецевої сталі $\varnothing 40$, 70, 100 мм та довжиною 150 мм – по 3 шт. кожного розміру; платиново-родій-платинова термопара, гарячий спай якої вмонтований в внутрішню поверхню губок клешні, що служать для вилучення заготовок із нагрівального пристрою. Термопара приєднана до мілівольтметра, який проградуєований в (°С); камерна лабораторна електропіч, що має систему керування тепловим режимом. Для запобігання появи окалини на нагрітому металі та впливу її на процес виміру температури поверхні, робочу камеру печі слід заповнити інертним газом, наприклад аргоном.

Порядок виконання роботи

Всі заготовки помістити в піч з температурою в робочій зоні біля 1300° С та нагріти по режиму, що відповідає прийнятій марці сталі. Час нагріву заготовок в залежності від їх геометричних параметрів приймаємо при $\varnothing 40$ мм - 7...8 хв; $\varnothing 70$ мм – 12...13 хв; $\varnothing 100$ мм – 18...20 хв.

Після нагріву до технологічно максимальних температур заготовки $\varnothing 40$ мм по одній вилучити з печі клешнями з термопарою. Зафіксувати температуру нагріву поверхневих шарів заготовки в момент вилучення.

В цілях варіювання часу транспортування заготовки до ковальсько-штампувального обладнання виміряти поверхневу температуру першої заготовки через 0,5 хв, другої через 1,0 хв, третьої через 1,5...2,0 хв.

Аналогічно провести заміри для заготовок $\varnothing 70\text{мм}$ та $\varnothing 100\text{мм}$.

Для теоретичного визначення поверхневих та серединних шарів заготовок до початку кування-штампування знайти критерії F_0 та Vi . За даними критеріями визначити безрозмірну відносну температуру поверхневих та серединних шарів заготовок за методикою, наведеною у відповідній літературі.

Підрахувати теоретичну температуру в момент початку пластичної деформації для прийнятих умов транспортування.

Результати вимірювань та розрахунків занести до таблиці.

Діаметр заготовки, мм	Температура, °		Час транспортування τ , хв	Температура поверхні заготовки перед початком деформування, °С		Теоретична температура центральної частини заготовки $t_{\tau}^{теор}$, °
	Заготовк и одразу після нагріву, t_0	Навколи шнього середовища, t_c		$t_n^{екс}$	$t_{\tau}^{теор}$	

Практичне заняття №3

Тема: Визначення ККД електропечі

Мета роботи: Визначити теоретичне значення ККД лабораторної електричної печі при нагріванні сталених заготовок

Теоретичні відомості

При розрахунку параметрів теплової роботи печі, а також для порівняльної оцінки нагрівальних пристроїв розрізняють термічний та ефективний ККД пічних агрегатів.

Термічний ККД являє собою відношення кількості корисної теплоти, що затрачається на нагрів металу, до загальної кількості теплоти, яка утворилася в нагрівальному пристрої при його тепловій роботі:

$$\eta_T = \frac{Q_M}{Q_T} \cdot 100,$$

де Q_M, Q_T - кількість теплоти, відповідно, що йде на нагрів металу та загальна її кількість, утворена в печі при спалюванні палива, кДж.

Ефективний ККД – відношення кількості корисно використаної теплоти в нагрівальному пристрої до кількості теплоти, що залишилась в печі:

$$\eta_z = \frac{Q_M}{Q_{oc}} \cdot 100,$$

де Q_{oc} - кількість теплоти, що залишилась в печі при згорянні палива, кДж.

Для нагрівальних пристроїв найбільш показовим є теоретичний ККД.

Застосовується до електричних печей опору можна визначити наступні величини:

Потужність яку витрачає піч, кВт:

$$W = \frac{I \cdot U}{1000},$$

де I – сила струму, А; U – напруження в силовому ланцюгу, В.

Загальну кількість теплової енергії, еквівалентну електричній, кДж:

$$Q_T = 0,206 \cdot W_{cp} \cdot \tau,$$

де W_{cp} - середня потужність під час нагріву, кВт; τ - тривалість роботи печі, год.

Кількість теплоти що затрачається на нагрів металу, кДж:

$$Q_M = q \cdot (c_2 t_2 - c_1 t_1),$$

де q – маса заготовки, кг; C_1, C_2 - відповідно початкова та кінцева теплоємність матеріалу заготовки, кДж/(кг К), t_1, t_2 - відповідно початкова та кінцева температура заготовки, °С.

В залежності від типу нагрівального пристрою, його конструктивного виконання, роду палива, степеню використання теплоти відхідних пічних газів термічний ККД може коливатися в широких межах (8-35%).

Матеріали, інструменти, обладнання для експериментальних досліджень.

Заготовки з вуглецевої сталі $\varnothing 50 \dots 60$ мм та $L=150$ мм (в заготовці просвердлений отвір $\varnothing 2 \dots 4$ мм на глибину 25 ... 30 мм для встановлення платино родій-платинової термопари, що являється датчиком для визначення температури матеріалу, що нагрівається); лабораторна однофазна електрична піч (електрична енергія перетворюється в теплову в опорах, виготовлених у вигляді спіралі з ніхромової проволочки або селітрових стрижнів); амперметр та вольтметр, які вмикаються в силовий ланцюг печі для визначення параметрів використовуваного струму. Піч оснащується системою автоматичного керування тепловим режимом з електронним потенціометром; платино родій-платинова термопара та мілівольтметр, проградуєований в градусах, для визначення температури заготовки.

Порядок виконання роботи

Мета роботи визначити загальну кількість енергії, що витрачає піч протягом нагріву, та кількості енергії, що корисно використовується на нагрів металу.

Заготовку зважити, в наперед просвердлений отвір встановити гарячий спай термопари та помістити в робочу зону печі.

Увімкнути піч, автоматичним електронним потенціометром задати певну температуру нагріву.

Через кожних 5 ... 7 хв знімати покази амперметра, вольтметра та мілівольтметра.

Після того як температура заготовки досягне заданої, вимкнути піч та зафіксувати час припинення дослідів.

Покази приладів занести до таблиці.

Час, хв.	I, А	U, В	W, кВт	Температура, °С	Примітки

Практичне заняття №4

Тема: Експлуатація та характеристика ковальського індукційного нагріву (КІН)

Мета роботи: Ознайомитися з принципом дії та конструкцією КІН в лабораторних чи заводських умовах; визначити час нагріву та необхідну потужність для нагріву циліндричних заготовок з вуглецевої сталі в КІН.

Теоретичні відомості

Один з самих прогресивних видів нагріву металу перед штамповкою – нагрів струмами високої та промислової частот (СВЧ та СПЧ) в КІН.

Суть індукційного нагріву в тому, що металічна заготовка, поміщена в магнітне поле, нагрівається за рахунок теплоти, що виникла в ній за рахунок індукційних вихрових струмів. ЕРС та струм розподіляються по перерізу заготовки що нагрівається не рівномірно і відповідає експоненціальному закону від поверхні до центру заготовки.

Товщина поверхневого шару заготовки, по якому проходить змінний високочастотний струм, називається глибиною проникнення, см:

$$\Delta = 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}},$$

де ρ – питомий електричний опір, $\rho=10^{-2}$ Ом·м; μ - магнітна проникність, Гн/м; f – частота струму, Гц.

Процес нагріву металу в індукторі можна розглядати, як нагрівання металу, розташованого:

- 1) В межах глибини проникнення струму, що відбувається за рахунок проходження електричного струму;
- 2) В центрі заготовки, за межами глибини проникнення струму, що відбувається за рахунок теплопровідності поверхневих шарів.

Необхідна для нагріву потужність:

$$N = \frac{ct_M qn}{\tau},$$

де c – середня теплоємність сталі при температурі нагріву, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; t_M – максимальна температура нагріву, $^{\circ}\text{C}$; q – маса заготовки що нагрівається, кг ; n – кількість одночасно заготовок, що нагріваються; τ – час нагріву, с .

Для того щоб індукційний нагрів був ефективним та економічно вигідним, необхідно мати максимальний ККД нагрівального пристрою. Оскільки для одного і того ж матеріалу заготовки глибина проникнення струму в основному залежить від його частоти. То практичним вибір частоти вважається коли відношення діаметру заготовки до глибини проникнення струму знаходиться в межах 2,5 ... 5,0.

Матеріали, інструменти, обладнання

Електричний силовий ланцюг КІН, що складається з наступних елементів:

1) Високочастотний генератор, призначений для живлення індукційної установки. Найбільш поширені машинні генератори, що складаються з електродвигуна трьохфазного струму (асинхронного чи синхронного), що підключається в мережу промислової частоти. На одному валу з двигуном монтується генератор, що складається з зубчастого ротора який обертається в середині статора. В обмотках останнього генерується змінний струм підвищеної частоти;

2) Індуктора, що являється основним елементом КІН. Від його геометричних розмірів та конструкції в значній мірі залежить ККД та експлуатаційні якості всієї установки. Форма індуктора в залежності від розмірів та форми заготовок може бути циліндричною, овальною, квадратною та щілинною. Індуктор складається із індукційного проводу (мідна трубка квадратного перерізу, що охолоджується водою), закрученого в спіраль, тепло та електроізоляції, напрямних полос та системи охолодження. Ці елементи поміщені в корпус з листової сталі;

3) Конденсаторної батареї, що служить для підвищення коефіцієнту потужності ($\cos\phi$). Якщо індуктор виконує роль акумулятора електромагнітної енергії, то конденсатори, по суті, являються накопичувачами електростатичної енергії. Це призводить до підвищення номінально активної потужності генератора та ККД всієї установки;

4) Комплекту вимірювальних пристроїв: вольтметра, амперметра, вартметра та фазометра;

5) Виштовхувачів (пневматичних, гідравлічних та механічних) для подачі та виштовхування заготовок з індуктора;

6) Спеціальних пристроїв (бункерного чи лоткового типу) для завантаження заготовок в КІН;

7) Оптичних чи фотоелектричних пірометрів для заміру температури заготовок, що нагріваються в індукторі КІН;

8) Контактів.

При визначенні часу нагріву в КІН, наприклад з частотою струму 2500 Гц, беруться заготовки з вуглецевої сталі довжиною 200мм та $\varnothing 30, 50, 70, 90$ мм (по 3 шт. кожного перерізу).

Порядок виконання експериментальних досліджень

Вивчити принцип дії, призначення та конструктивні особливості системи високочастотний генератора – КІН в лабораторних або заводських умовах з зняттям огорожень та щитів блокування. Зняти параметри основних елементів КІН, вивчити основні положення інструкції по його експлуатації, зважити заготовки.

Для визначення часу нагріву заготовок в індикаторі пірометр необхідно встановити нерухомо на підставці так, щоб його оптична вісь перетиналася з центром торцю встановленого в індикатор заготовки. Увімкнути одночасно індикатор та секундомір.

При досягненні заданої в залежності від марки сталі температури нагріву, контрольованої за пірометром, відключити КІН та зафіксувати час.

Практичне заняття №5

Тема: Визначення градієнта температур по перерізу заготовки та коефіцієнту тепловіддачі металу при нагріві

Мета роботи: Визначити градієнт температур по розрізу заготовки циліндричної форми при нагріванні в камерній електропечі, а також середній коефіцієнт тепловіддачі на поверхні заготовки при нагріві.

Теоретичні відомості

При оптимальному технологічному режимі нагріву металу для ковки та штамповки необхідно уникати утворення тріщини. Причиною утворення тріщини являються внутрішні напруження, обумовлені різницею температур по перерізу матеріалу що нагрівається.

Розглянемо механізм даного процесу. Поверхневі шари металу, нагріті до більш високої температури, розширюються більше, чим внутрішні. Але їх розширення гальмується сусідніми внутрішніми шарами, які будуть розтягуватися за рахунок розширення зовнішніх. В результаті такої взаємодії зовнішні шари металу при нагріві будуть піддаватись стискаючим напруженням, а внутрішні – розтягуючим.

Ці напруження, виникають в наслідок нерівномірного нагріву, називають також температурні. Вони будуть тим більші, чим більший перепад температур в різних частинах матеріалу заготовки. При певній різниці температур в середині матеріалу температурні напруження можуть на стільки зрости, що перевищать межу міцності та послужить причиною утворення тріщин. Це явище особливо небезпечне при швидкому нагріві низько пластичних сталей, наприклад високо вуглецевих та легованих а також габаритних заготовок в цілому. Величина внутрішніх напружень залежить не тільки від характеру зміни об'єму металу під впливом температурного розширення, але і від зміни об'єму в наслідок структурних перетворень.

Матеріали, інструменти, обладнання

Заготовки з вуглецевої сталі ($\varnothing 40 \dots 50$ мм, $l=100 \dots 120$ мм); камерна електропіч.

Порядок виконання роботи

Заготовку з вуглецевої сталі зважити та заміряти, після чого встановити її на пристрій, а в отвір встановити термомпари на різній глибині.

По закінченню підготовчих робіт заготовку помістити в піч (попередньо нагріту до необхідної температури) та зафіксувати час початку нагріву. Через кожні 0,5 ... 1,0 хв записувати температуру поверхні та центру заготовки.

Результати вимірів температури заготовки по її перерізу занести до таблиці.

Час початку дослідження	Температура, °С			Примітки
	Печі	Поверхні заготовки	Центру заготовки	

Після того як температура центру заготовки стане рівною температурі печі (або буде відрізнятися від неї не більше чим на 20°C), заготовку вийняти з печі та зафіксувати час закінчення нагріву.

Явище, що проходить в матеріалі при нагріві, характеризується теплофізичними величинами, до яких слід віднести теплопровідність, теплоємність, а також коефіцієнт теплопередачі.

Середній коефіцієнт теплопередачі, Дж/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$):

$$\alpha = \frac{q \cdot c_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1)}{F \cdot \tau \cdot (t_{\text{печі}} - t_{\text{нов}})},$$

де q – маса зразка що нагрівається, кг; $c_{t_1}^{t_2}$ – середня в межах t_1 та t_2 теплоємність, Дж/(кг·К); t_1 та t_2 – початкова та кінцева температура зразка при нагріві, °С; F – площа бокової поверхні зразка, м^2 ; τ – час

нагріву зразка, год; $t_{печи}, t_{нов}$ - середня температура відповідно печі та поверхні заготовки, що визначається як середнє арифметичне показів термопар, що встановлені між центром та поверхнею заготовки, °С.

Література

1. Скворцов А.А., Акименко А.Д., Кузелев Н.Д. Нагревательные устройства. –М.: Высшая школа, 1965.- 443с.
2. Касенков М. А. Нагревательные устройства кузнечного производства.- М.: ГНТИ, 1962.- 472с.
3. Золотухин Н. М. Нагрев и охлаждение металла. -М. :Машиностроение, 1973.-192с
4. Казанцев Е. И. Промышленные печи. –М. :Металлургия, 1975.- 367с.
- 5 .Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением.- М.: Машиностроения, 1977.-423с.
6. Соколов Л. Н. и др. Теория и технологияковки. –К. :Высшая школа , 1989.-317с.
7. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металла и его промышленное применение. – М., Л. : Энергия, 1965. – 552 с.