

4. Overtop D.E., Meadows M.E. Storm water modeling.– Academic Press. New York, NY, 1976.–р. 58-88.

5. Жук В.М., Вовк Л.І. Гідрографи притоку поверхневих стічних вод при різних моделях концентрації стоку // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація: Вісник НУ "Львівська політехніка", №461, 2004.– С. 16-19.

6. Жук В.М., Вовк Л.І. Радіальна модель концентрації дощових стічних вод // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник. Випуск 4. – К.: КНУБА, 2005.– С. 84–96.

7. Жук В.М., Вовк Л.І. Гідрографи притоку поверхневих стічних вод з прямокутних в плані басейнів стоку // Промислова гідравліка і пневматика: Всеукраїнський науково-технічний журнал. №1 (7), 2005.– С. 12–16.

УДК 621.9.06-533

А.Я.Куліченко, к.т.н., доцент (Львівський факультет Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту)

ПОШИРЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ПРИ ТЕРМОМЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ ДИСКОВИМИ ЩІТКАМИ

У даній статті автор пропонує методику теоретичного прогнозування поширення теплових полів і температури нагрівання поверхні листової сталі котлів залізничних цистерн, які обробляються методом термомеханічної очистки дисковими секційними щітками з гнучкими робочими елементами.

Застосовування методу термомеханічної обробки інструментом дискової конструкції з гнучкими робочими елементами (ГРЕ) для очищення зовнішньої поверхні котлів залізничних цистерн від атмосферного і технічного бруду, шару старої фарби, корозійних утворень з одночасною якісною підготовкою поверхні до нанесення нового шару антикорозійного покриття, поряд із традиційними методами (гідроабразивна, шрото- і піскоструменева обробка, миття струменями гарячої води з домішками хімреактивів тощо), зарекомендувало свою ефективність і незначну вартість обладнання та інструменту.

Термомеханічна очистка поверхні металу дисковими секційними щітками базується на комбінованій дії теплових імпульсів електророзряду і механічного тертя пучками ГРЕ, що зумовлено конструкцією інструменту, виготовленого з послідовно розміщених струмопровідних секцій ГРЕ і секцій ізольованих від контакту з електрострумом [1]. Особливість застосування даного методу обробки саме для поверхні залізничних цистерн полягає у тому, що процес очистки супроводжується значним локальним нагріванням матеріалу котла, внутрішня порожнина якого призначена для зберігання і транспортування токсичних, вогне- і вибухонебезпечних матеріалів. Хоча у процесі підготовки цистерни перед обробкою її зовнішньої поверхні проводиться очистка порожнин котлів від загуслих залишків транспортованих продуктів і природне провітрювання, існує небезпека накопичення і тривалого утримування вогнебезпечних випарів, які під впливом теплових процесів термомеханічної обробки можуть сприяти виникненню вибухонебезпечної ситуації.

У даній статті представлена методику теоретичного прогнозування поширення теплових полів і температури нагрівання поверхні листової сталі котлів залізничних цистерн,

що обробляється методом термомеханічної очистки дисковими секційними щітками, в залежності від технологічних режимів процесу обробки.

Для встановлення температурного режиму при поверхневому впливі розсіяних по контактуючій робочій ширині інструменту миттєвих високотемпературних електродугових розрядів застосовуємо принцип накладання циклічно діючих на початку кожного циклу теплових джерел за методом суперпозиції, тобто прийнято, що вплив теплоти кожного імпульсу між елементарним ГРЕ і поверхнею обробки поширюється незалежно від впливу інших лінійно розташованих дугових розрядів, а теплофізичні властивості матеріалу котла не залежать від температури. Поверхню котла цистерни розглядаємо як напівобмежене тіло, що періодично (циклічно) контактує з робочою поверхнею інструменту при постійних значеннях часу температурного впливу електророзряду t_i і його періодичності $t_{ци}$. Температурне поле $T(x, t)$ напівобмеженого тіла внаслідок впливу миттєвого плоского джерела при адіабатичній границі визначається згідно з відомою залежністю [2]

$$T(x, t) = \frac{q}{b_1 \sqrt{\pi \cdot t}} e^{-\frac{x^2}{4a_1 t}}, \quad (1)$$

де x – координата на поверхні контактування; t – час; b_1 – коефіцієнт акумулювання теплоти у матеріалі обробки; a_1 – температуропровідність матеріалу котла.

Потужність q електродугового джерела визначається кількістю теплоти, що передається одиничним контактуванням елементарного ГРЕ:

$$q_2 = \frac{2(T_2 - T_1) f_{\kappa}}{\left(\frac{1}{b_1} + \frac{1}{b_3}\right)} \sqrt{\frac{t_i}{\pi}}, \quad (2)$$

де $f_{\kappa} = 1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2K} (1 - \operatorname{erfc} K \exp K^2)$ $K = \alpha_{\kappa} \sqrt{t_i} \left(\frac{1}{b_1} + \frac{1}{b_3}\right)$, в яких складові: f_{κ} – функція,

що враховує неідеальність контакту ГРЕ з поверхнею обробки, значення якої встановлюється згідно з номограмою (рис.3) [3]; K – критерій контактного теплообміну; α_{κ} – коефіцієнт тепловіддачі проміжку між торцями ГРЕ і поверхнею, що утворений за рахунок нерівномірності поверхні обробки; T_1 і T_2 – температура, відповідно, матеріалу котла і електродугового розряду; b_3 – коефіцієнт поглинання теплоти ГРЕ секції очистки.

При рішенні циклічної задачі методом миттєвих імпульсів враховувалось підвищення температури нагрівання поверхні завдяки тепловому впливові попередніх циклів. Для цього за початкову температуру поверхні котла при визначенні q у будь-якому n -циклі згідно з формулою (2) приймаємо температуру кінця попереднього $(n-1)$ -го циклу – $T_{(n-1)ци}(0, t)$.

Таким чином, температуру нагрівання поверхні котла цистерни внаслідок багатоциклового теплового впливу електродугового розряду в кінці n -го циклу $T_{nци}(x, t)$ можна представити у вигляді суми

$$T_{nци} = T_1 + \frac{2b_3 f_{\kappa}}{\pi(b_1 + b_3)} \sqrt{\frac{t_i}{t_{ци}}} \left[\frac{T_2 - T_1}{\sqrt{n}} e^{-\frac{x^2}{4a_1 n_{ци}}} + \frac{T_2 - T_{2ци}(0, t)}{\sqrt{n-1}} e^{-\frac{x^2}{4a_1 (n-1)_{ци}}} + \dots + \frac{T_2 - T_{(n-2)ци}(0, t)}{\sqrt{2}} e^{-\frac{x^2}{4a_1 2_{ци}}} + \frac{T_2 - T_{(n-1)ци}(0, t)}{\sqrt{1}} e^{-\frac{x^2}{4a_1 1_{ци}}} \right] \quad (3)$$

Для спрощення наступних обчислень в останнє рівняння введемо безрозмірні параметри і змінні величини

$$\Theta_n^k = \frac{T_{n_{II}}(x,t) - T_1}{T_2 - T_1}; \quad D_k = \frac{2b_3 f_K}{\pi(b_1 + b_3)} \sqrt{\frac{t_i}{t_{II}}};$$

$$\eta = \frac{x}{2\sqrt{a_1 t_{II}}}; \quad \Theta_i^0 = \frac{T_{i_{II}}(0,t) - T_1}{T_2 - T_1}.$$

Після відповідних перетворень рівняння (3) набуде такого виду

$$\Theta_n^k = D_k \sum_{i=0}^{n-1} (1 - \Theta_i^0) \frac{1}{\sqrt{n-i}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{n-i}\right); \quad \Theta_0^0 = 0. \quad (4)$$

Максимальна температура нагрівання поверхневого шару матеріалу котла цистерни внаслідок послідовного впливу електродугового розряду і тертя ГРЕ секції механічної очистки у кожному з циклів розраховується згідно з формулою [3]:

$$\Theta_{n_{max}}^H = \frac{T_{n_{II}}(0, t_{n-1} + t_i) - T_{(n-1)_{II}}(0, t_{n-1})}{T_2 - T_{(n-1)_{II}}(0, t_{n-1})} = \frac{K_\epsilon}{1 + K_\epsilon} (1 - \operatorname{erfc} K \exp K^2) = \frac{K_\epsilon}{1 + K_\epsilon} f_1, \quad (5)$$

де $K_\epsilon = (b_3 / b_1)$ - теплова активність матеріалу ГРЕ секції очистки по відношенню до матеріалу котла.

Наведені формули (4) і (5) запрограмовані у системі прикладних програм MatCAD і за допомогою сучасних засобів ЕВТ розраховані, на основі чого побудовані графіки відповідних залежностей (рис.1 і рис.2).

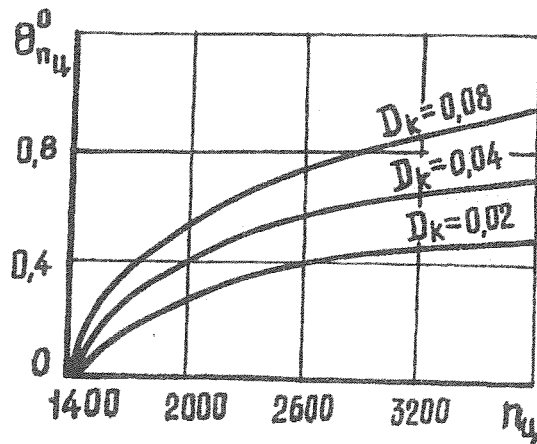


Рис.1. Графік функції відносної температури поверхні котла в кінці n -го циклу $\Theta_{n_{II}}^0 = f(n)$ при $D_k = \text{const}$.

Як видно з рис.1, при циклічному впливові на поверхню обробки суміщеного теплового джерела (електродуговий розряд + механічне тертя ГРЕ очистки) при адиабатичних умовах, коли кількість поверхневої теплоти відводиться лише в матеріал котла цистерни, відбувається безперервне підвищення температури поверхневого шару металу виробу.

Якщо кількість циклів контактування секцій інструменту з поверхнею збільшувати до значної величини (наприклад, $n \rightarrow \infty$), то при розрахунках не варто враховувати вплив початкових температурних показників поверхні. Якщо враховувати наближено, що $\Theta_{n-1}^0 = \Theta_n^0$, то для $x=0$ отримуємо

$$\Theta_{\infty}^0 = \frac{T_{n_{\text{ц}}}(0, t) - T_1}{T_2 - T_1} \approx D_k (1 - \Theta_n^0) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad \text{або} \quad \Theta_{\infty}^0 \approx D_k (1 - \Theta_n^0) \sum_{n=0}^{\infty} n^{-\frac{1}{2}},$$

де $\sum_{n=1}^{\infty} n^{-\zeta}$ - дзета-ряд Рімана, що розходиться при $\zeta = \frac{1}{2} < 1$ і доводить неперервність процесу підвищення температури із збільшенням кількості контактів. При цьому $T_{n_{\text{ц}}}(0, t) \rightarrow T_{n_{\text{ц}}}$, тобто при постійному збільшенні кількості циклів у процесі обробки (контактів з поверхнею), температура поверхневого шару сягатиме температури плавлення ($T_{n_{\text{ц}}}$) матеріалу котла цистерни, що є неприпустимим, оскільки принцип очистки зовнішньої поверхні залізничних цистерн термомеханічним методом інструментом з ГРЕ полягає у руйнуванні монолітності і видаленні лише зайвого поверхневого нашарування (шари старої фарби і корозії), на завдаючи руйнувань поверхневому шару основного металу котла цистерни.

Побудова графіка на рис.1 базувалась на умові, що з конструктивних міркувань і технологічних вимог до отримання необхідної шорсткості поверхні мінімальна частота обертання інструменту становить $n_{\text{min}} = 350 \text{ хв}^{-1}$, що при діаметрі інструменту $D_{\text{ин}} = 0,3 \text{ м}$ колова швидкість буде $V_{\text{ин}} = 5,49 \text{ м/с}$. Як вказувалось вище, конструкція даної дискової щітки складається з послідовно встановлених струмопровідних секцій механічної очистки. Для досліджень були виготовлені інструменти з різною кількістю пар секцій – $Z = Z_{\text{в/с}} \times Z_{\text{м/ч}} = 4 \times 4 = 5 \times 5 = 6 \times 6$ секцій. Кількість циклів встановлювалось в залежності від кількості пар секцій, оскільки при одному оберті інструменту, наприклад, з частотою $n = 500 \text{ хв}^{-1}$ при кількості пар $Z = (4 \times 4)$ секцій, кількість циклів контактування становитиме $n_{\text{ц}} = (4 \times 500) = 2000$ циклів.

Наведена автором методика дозволяє, попередньо визначивши характер, особливості розташування і фізико-механічні характеристики матеріалу поверхневого нашарування, теоретично прогнозувати оптимальні технологічні режими обробки, тобто, регулюючи частоту обертання інструменту і його подачу, забезпечити необхідний температурний режим для руйнування і видалення поверхневих накопичень.

Криві на графіку (рис.2) показують, що при малих значеннях η , тобто у поверхневих шарах основного металу котла, у кінці кожного циклу відбувається незначна зміна відносної температури.

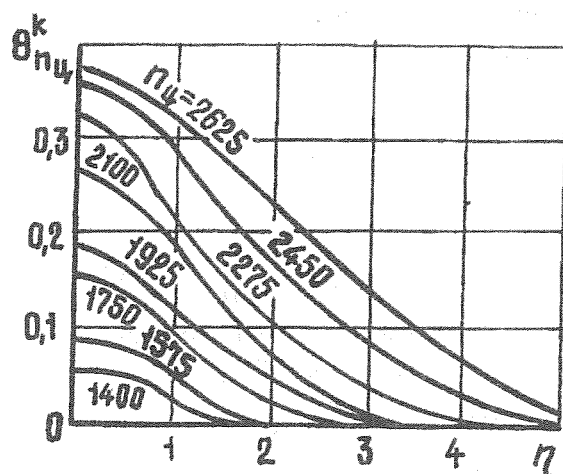


Рис.2. Графік функції відносної температури $\Theta_{n_{\text{ц}}}^k = f(\eta)$ для визначення температури матеріалу у перерізі (координата x) кінці n -го циклу при $D_k = 0,04$.

На рис.3 представлена номограма для визначення відносної температури нагрівання поверхні металу для будь-якого циклу контактування.

Дослідне визначення температури нагрівання поверхневого шару металу у процесі термомеханічної очистки після $n_y=1925$ циклу проводилось для матеріалу котла цистерни марки 09Г2С-12 (ГОСТ 19281-89), покритого шаром іржі (оксид заліза Fe_3O_4 з температурою плавлення – $T_{пл.ірж.} = 950 K$). Теплові характеристики матеріалу обробки: теплопровідність – $\lambda = 39,8 Bm/(m \cdot ^\circ C)$; температуропровідність – $a_1 = 6,1 Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$. Коефіцієнти: поглинання теплоти матеріалів, відповідно, цистерни і ГРЕ – $b_1 = 130 \cdot 10^{-2} (Bm \cdot c) / K$; $b_3 = 110 \cdot 10^{-2} (Bm \cdot c) / K$; тепловіддачі повітряного прошарку – $\alpha_k = 2,0 \cdot 10^4 Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$. Тривалість миттєвого впливу розряду електродуги – $t_k = 0,047 c$; тривалість циклу теплового впливу – $t_y = 0,16 c$. Температурний режим, відповідно, матеріалу котла цистерни і дугового розряду: $T_1 = 20 ^\circ C$ та $T_2 = 1460 ^\circ C$.

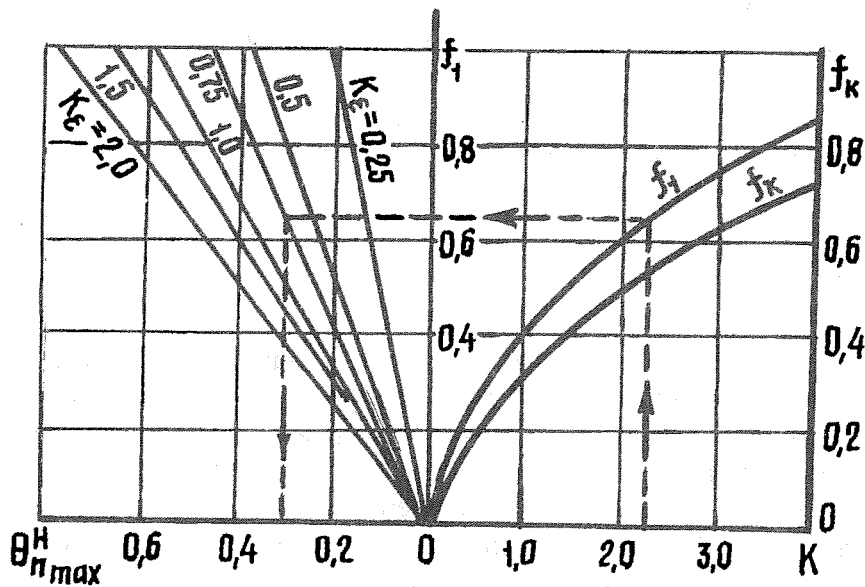


Рис.3. Номограма визначення температури нагрівання поверхні матеріалу котла цистерни на n -му циклі.

Згідно з наведеною формулою (2), визначаємо:

$$K = 2,0 \cdot 10^4 \left(\frac{1}{130 \cdot 10^2} + \frac{1}{110 \cdot 10^2} \right) \sqrt{0,047} = 2,3$$

Згідно з графіком на рис.3, визначаємо – $f_k = 0,55$; звідси

$$D_k = \frac{2 \cdot 110 \cdot 10^2 \cdot 0,55}{\pi(130 + 110) \cdot 10^2} \sqrt{\frac{0,047}{0,16}} = 0,0608.$$

З графіка на рис.1 в залежності від кількості циклів і отриманого значення D_k , визначаємо відносну температуру $\Theta_{n_c}^0 = 0,5$. Тоді з рівності

$$0,5 = \frac{T_{n=1925}(0, t) - 20}{1460 - 20} \quad \text{визначаємо температуру нагрівання поверхні котла цистерни -}$$

$$T_{n=1925}(0, t) = 700 ^\circ C.$$

Котел залізничної цистерни виготовляється з листового прокату товщиною $\delta = (8...10) \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Температура нагрівання внутрішньої поверхні матеріалу котла внаслідок високотемпературного впливу дугового розряду на його зовнішній поверхні, тобто нагрівання по координаті x (на товщину листового прокату) встановлюється згідно з графіком на рис.2. Наприклад, для проникнення теплового поля на глибину $x=0,008 \text{ м}$ встановлюємо:

$$\eta = \frac{x}{2\sqrt{a_1 \cdot t_{\eta}}} = \frac{0,008}{2\sqrt{6,1 \cdot 0,16}} = 0,00405.$$

З графіка на рис.2 для $n_{\eta}=1925$ циклів і розрахованого значення $\eta=0,00405$ визначаємо: $0,17 = \frac{T_{n=1925}(0,008;0,16) - 20}{1460 - 20}$, звідки $T_{n=1925}(0,008;0,16) = 244^{\circ}\text{C}$.

Отримана температура прогрівання внутрішньої поверхні порожнини котла цистерни при встановлених технологічних режимах зовнішньої обробки вказує, що при очищуванні цистерн, які транспортують бензин і гас з температурою спалаху парів у повітрі, відповідно, $T_{\text{бенз.}}=255^{\circ}\text{C}$ і $T_{\text{гас.}}=235^{\circ}\text{C}$, слід або зменшити частоту обертання інструменту, або зменшити у конструкції інструменту кількість пар секцій, наприклад - $Z = (3 \times 3)$.

Представлена методика розрахунку дозволяє практично, в умовах виробництва корегувати технологічні режими поверхневої очистки із дотриманням вимог і правил пожежної безпеки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Авт. свид. 1750649 /СССР/ Щетка для очистки металла. Куличенко А.Я., Перетичка Е.В. Оpubл. в Б.И., 1992, № 28.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: «Высшая школа», 1967. –600 с.
3. Куличенко А.Я. Термомеханична поверхнева очисно-зміцнююча обробка металу. Львів: “Кобзар”, 1997. –216 с.

УДК 622.457.2

В.П.Сухоруков, к.т.н. (НИИ горноспасательного дела и пожарной безопасности «Респиратор», г.Донецк)

УПРАВЛЕНИЯ КАССЕТНЫМ ТРУБОПРОВОДОМ ПРИ РАЗГАЗИРОВАНИИ ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКИ ПОСЛЕ ПОЖАРА

Рассмотрена задача распределения воздуха в аэродинамической сети, которая включает кассетный трубопровод и проходное окно регулятора. Получена аналитическая зависимость, позволяющая определить площадь проходного окна регулятора.

Для повышения эффективности добычи угля на шахтах проходятся длинные тупиковые выработки. Процесс проведения таких выработок сопряжен с опасностью возникновения аварийной ситуации при нарушении нормального режима их проветривания [1]. Это обуславливает необходимость оснащения подразделений горноспасательных частей специальным оборудованием, позволяющим повысить безопасность проникновения