

# Технологія машинобудування

УДК 629.3

Бойков І.В., канд. техн. наук

## ПРОЦЕС ВИПАРОВУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ТВЕРДОГО МАТЕРІАЛУ НА ПРИКЛАДІ САЖОВОГО ФІЛЬТРУ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

**Постановка проблеми.** Будь-яка речовина може перебувати в трьох агрегатних станах - твердому, рідкому і газоподібному. Тверда речовина зберігає форму, а рідке розтікається і приймає форму посудини. Однак це визначення недостатньо для характеристики стану речовини. Для металевої поверхні рідкий стан настає після нагрівання до температури плавлення. Зворотний перехід настає в міру зниження температури, і металева поверхня приймає твердий стан. Тому можна розглядати твердий стан металевої поверхні як застигле або загусле рідкий стан. Отже, перехід з одного стану в інший відбувається при певній температурі і супроводжується зміною властивостей матеріалу.

Однак в техніці зустрічаються випадки, коли має місце нестационарне температурне поле в твердому матеріалі. Такі випадки трапляються в конструкціях техніки, коли відбувається короткочасне підвищення температури на поверхні і температура нагрівання не доходить до температури плавлення металу. Таким чином, утворюються рухомі кордону на поверхнях матеріалу: одна схильна до різкого підвищення температури і зворотна, на якій не відбувається значного підвищення температури. В результаті фізико-хімічних процесів, що відбуваються на поверхні і в шарах, прилеглих до цієї поверхні, твердий матеріал переходить з одного фазового стану в інше з виділенням або поглинанням теплоти.

Процес нагрівання поверхні матеріалу характеризується тим, що відбуваються різні фізико-хімічні перетворення поверхневого шару матеріалу. Даним перетворенням супроводжує зона підготовчих процесів, які протікають в конденсованій фазі. При цьому в конденсованій фазі на різних видаленнях поверхні матеріалу від температури горіння з різною інтенсивністю відбувається втрата газоподібних, рідких і твердих продуктів теплового розкладання матеріалу конструкції. У процесі теплового розкладання матеріалу конструкції поверхнева частина твердого матеріалу може безпосередньо переходити з твердого стану в газоподібний, минаючи рідку фазу.

Таким чином, процес підвищення температури на поверхні матеріалу являє собою складний процес, який може відбуватися в газоподібному конденсованій фазі в конструкціях техніки.

У звичайних умовах при температурах близьких до навколишнього повітря випаровування твердих матеріалів настільки повільно, що втрати їх можуть не враховуватися. Перехід з твердого стану в газоподібний стан відбувається при певній температурі і супроводжується різкою зміною властивостей металевих поверхонь конструкції.

**Аналіз літературних джерел.** У ряді робіт [1-7] процеси випаровування поверхні матеріалів описуються за допомогою рівняння Клапейрона - Клаузіуса. Дане рівняння є термодинамічним рівнянням, яке відноситься до процесів переходу речовини з однієї фази в іншу (випаровування, плавлення, сублімація, поліморфне перетворення та ін.). Згідно рівняння Клапейрона - Клаузіуса теплота фазового переходу при рівноважно протікаючому процесі визначається наступним виразом:

© І.В. Бойков, 2018

$$L = T \cdot \frac{dP}{dT} \cdot (V_1 - V_2) , \quad (1)$$

де  $T$  – температура переходу (процес ізотермічний);  $dP/dT$  – значення похідної від тиску по температурі при даній температурі переходу;  $(V_1 - V_2)$  – зміна обсягу речовини при переході його з першої фази в другу.

Використовуючи рівняння Клапейрона - Клаузіуса можна уявити діаграму станів системи в координатах  $P, T$  (рис.1). На цій діаграмі показані криві, які поділяють різні стани матеріалу. Стан матеріалу в залежності від значень  $P, T$  може перебувати в одному з трьох агрегатних станів - твердому, рідкому, газоподібному. Самі криві є зонами рівноважного стану двох фаз станів. Точки, що лежать праворуч або ліворуч від кривих, характеризують фазний стан матеріалу. При цьому є точка (потрійна точка) яка описує рівноважний стан відразу трьох фаз: твердої, рідкої і газоподібної.

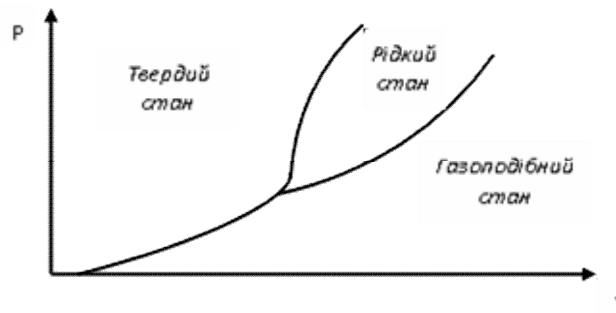


Рисунок 1 – Області станів матеріалу від температури і тиску

Рівняння Клапейрона - Клаузіуса може служити для розрахунку будь-якої з величин, що входять в рівняння, якщо інші відомі. Однак для вирішення рівняння Клапейрона - Клаузіуса необхідно знати, як змінюються з температурою і тиском величини  $L, V_1$  і  $V_2$ , що представляє складну задачу. Зазвичай цю залежність встановлюють емпірично і після цього вирішують рівняння Клапейрона - Клаузіуса чисельно.

В роботі [8] проблема теплообміну формулюється в умовах плоскої задачі про випаровуванні поверхні тіла, теплофізичні властивості якого вважаються постійними з використанням асимптотичного інтегрування по Лапласа. Розглядається стаціонарний режим виносу маси матеріалу, коли хвиля розриву газового потоку від твердого тіла рухається з постійною швидкістю. Постановка завдання наводиться у вигляді системи диференціальних рівнянь з граничними умовами на зовнішній стороні прикордонного шару і на хвилі випаровування.

Рішення даного завдання ускладнено знанням теплофізичних властивостей матеріалу, наявністю системи диференціальних рівнянь з граничними умовами. Тому для розрахунків випаровування поверхні твердого матеріалу може бути недоцільним.

У роботі [9] розглядаються питання горіння поверхні матеріалу і процеси, що протікають при цьому. У роботі вказується, що математична постановка задачі є спільною для всіх процесів. Однак кожен процес при нагріванні поверхні матеріалу має свої специфічні особливості протікання. Формулювання завдання про теплопровідності в нагрітому матеріалі з урахуванням рухомих кордонів нагрітого матеріалу може відрізнятися від реальних процесів.

**Мета статті.** Провести теоретичні дослідження процесу випаровування металевих поверхонь сажового фільтру дизельних двигунів в залежності від матеріалу конструкції фільтра та температури процесу спалювання сажі.

**Виклад основного матеріалу.** Рішення задачі випаровування поверхні твердого матеріалу з одного боку досить складний, а з іншого боку дозволяє встановити зміну розмірів прикордонного шару поверхні металевого матеріалу.

Аналіз явища випаровування на основі уявлень молекулярно-кінетичної теорії дозволяє встановити найважливіше співвідношення між термодинамічними (тиск пара) і кінетичними (швидкість випаровування) параметрами цього процесу [7, 8, 10].

Відповідно до теорії Ленгмюра, в умовах рівноваги число молекул газу, що зіштовхуються в одиницю часу з поверхнею судини в якому знаходиться газ, так само (молекули підкоряються статистиці Больцмана):

$$N = \frac{P_e}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot m \cdot k \cdot T}}, \quad (2)$$

де  $P_e$  – рівноважний тиск газу при температурі  $T$ ;  $m$  – маса молекули;  $k$  – постійна Больцмана.

При рівновазі парової фази з поверхнею твердого тіла число частинок  $N_c$ , які залишають поверхню, дорівнює числу частинок  $N_k$ , які конденсуються з пара на цій поверхні за той же час. Таким чином обидва процеси відбуваються одночасно і з рівними швидкостями.

Швидкість конденсації молекул з урахуванням можливості їх часткового відображення дорівнює

$$N_k = \alpha \cdot N_c, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт конденсації.

Тому для швидкості випаровування (сублімації) справедлива формула:

$$N_c = \frac{\alpha \cdot P_e}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot m \cdot k \cdot T}}. \quad (4)$$

Для однорідних металів  $\alpha$  можна вважати рівною одиниці. Для неоднорідних поверхонь металів можливо відображення і отже  $\alpha < 1$ .

Для більш складних багатокомпонентних і багатофазних сплавів можливість отримання навіть наближеної оцінки в даний час відсутня. У подібних випадках єдиним засобом визначення сумарної швидкості випаровування сплаву або парціальних швидкостей випаровування його компонентів залишається безпосереднє їх вимір експериментальним шляхом.

Формула (4) має важливе практичне значення. Вона дозволяє оцінювати випаровування твердих речовин за відомими значеннями тиску насичених парів при заданій температурі.

Швидкість випаровування з поверхні твердих матеріалів може визначатися з

урахуванням формули (4) в наступному вигляді:

$$W = \alpha \cdot \frac{P}{17,4} \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (5)$$

де  $W$  – швидкість випаровування, г/см<sup>2</sup>·с;  $P$  – парціальний тиск парів матеріалу, мм. рт. ст.;  $M$  – молекулярна маса матеріалу;  $T$  – температура, К;  $\alpha$  – коефіцієнт акомодатії.

Тиск парів може бути визначено за рівнянням Клаузіуса-Клайперона:

$$\ln P = \frac{c}{R} - \frac{L_o}{4,57 \cdot T}, \quad (6)$$

де  $c$  – константа,  $R$  – універсальна газова постійна,  $L_o$  – прихована теплота випаровування.

З рівняння (5) за умови, що жодна молекула не повертається на поверхню матеріалу, тобто коефіцієнт акомодатії дорівнює одиниці, можна отримати рівняння для швидкості убування товщини стінки матеріалу, яке має наступний вигляд:

$$\delta = 1,85 \cdot 10^6 \cdot P \cdot \rho \cdot \left(\frac{M}{T}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

де  $\delta$  – швидкість убування товщини стінки, см/рік.;  $\rho$  – щільність твердого матеріалу, г/см<sup>3</sup>.

Умова не повернення молекул на поверхню матеріалу близька до процесів, які протікають в сажовому фільтрі.

На рисунку 2 приведені криві зміни тиску металів, з яких можуть виготовлятися сажові фільтри за умови, що коефіцієнт акомодатії дорівнює нулю.

Наведені залежності дають граничні значення визначених величин. Крім того, слід зазначити, що величини зміни тиску парів металів збільшуються з ростом температури, хоча формально залежність повинна була б бути іншою. Справа в тому, що тиск парів матеріалів збільшується зі зростанням температури значно швидше, ніж пропорційно  $T$ .

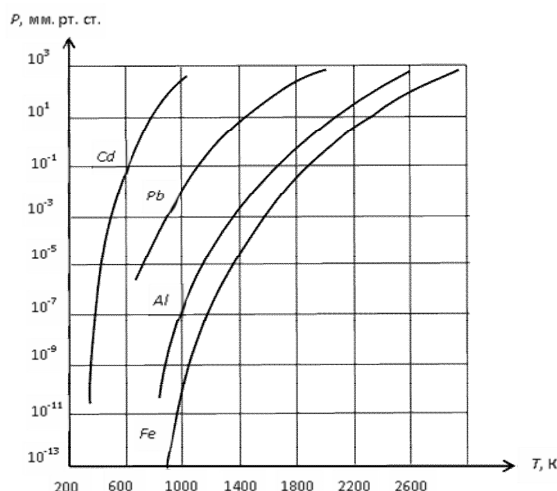


Рисунок 2 – Зміна тиску парів металів від температури

У таблиці 1 наведені результати зміни товщина стінок однокомпонентних металевих поверхонь.

Таблиця 1 – Зміни товщини стінок металевих поверхонь

Матеріал	Температура, при якій матеріали сублімують, °С			Атомна маса	Точка плавлення, °С	Щільність матеріалу, г/см <sup>3</sup>
	10 <sup>-5</sup> см/год. <sup>-1</sup>	10 <sup>-3</sup> см/год. <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup> см/год. <sup>-1</sup>			
Кадмій	40	80	120	112,41	320	8,64
Свинець	270	330	430	207,19	330	11,34
Алюміній	550	680	810	26,98	660	2,70
Залізо	770	900	1050	55,85	1540	7,85

З таблиці випливає, що зростання температури, яке має місце в фільтрі сажі дизельного двигуна, впливає на різні металеві поверхні. При цьому на швидкість зміни товщини стінки поверхні впливають як характеристики матеріалу сажового фільтру, так і процеси в яких беруть участь поверхні матеріалів сажового фільтру.

На процес випаровування металу великий вплив робить стан поверхні, і в першу чергу слід вказати на стан оксидної плівки металів. Так, для зменшення випаровування поліровані металеві поверхні можуть бути схильні до оксидуванню, тобто штучно збільшена товщина плівки.

**Висновки.** За результатами проведених досліджень був приведений підхід до визначення розмірів шару металевих поверхонь на прикладі сажового фільтру дизельного двигуна автомобільної техніки.

При дослідженні процесу випаровування металевих поверхонь з'ясовано:

1 Випаровування металів походить не з усього об'єму, а тільки з поверхневого шару, який безпосередньо контактує з нагрівом.

2. Наявність поверхневої оксидної плівки може істотно змінити кінетику випаровування матеріалів.

3. При підвищеній температурі небезпека може представляти випаровування з меж зерен шару поверхні, оскільки відбувається найбільше руйнування у вказаній зоні.

**Література:** 1. Курс физической химии [Текст] / Я. И. Герасимов, В. П. Древинг, Е. Н. Еремин и др.; под общ. ред. Я. И. Герасимова. – 2-е изд. – М. : Химия, 1970. – Т. 1. – 592 с. 2. Еремин В. В. Основы физической химии. Теория и задачи [Текст]: учеб. пособие для вузов / В. В. Еремин, С. И. Каргов, И. А. Успенская, И. А. Кузьменко, В. В. Лунин. – М. : Изд-во Экзамен, 2005. – 480 с. 3. Базаров И. П. Термодинамика [Текст] / И. П. Базаров. – 5-е изд. – СПб.– М.–Краснодар: Лань, 2010. – 384 с. 4. Сивухин Д. В. Обиций курс физики. Том 2. Термодинамика и молекулярная физика [Текст]/ Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1990. – 592 с. 5. Исаев С. И. Термодинамика [Текст]/ С. И. Исаев. – М. : Издание МГТУ, 2000. – 413 с. 6. Ренке Г. Неравновесная статистическая механика [Текст] / Г. Ренке. – М. : Мир, 1990. – 320 с. 7. Кириллин В. А. Техническая термодинамика [Текст] / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндин. – М. : Издательство МЭИ, 2008. – 496 с. 8. Котляр Я. М. Методы и задачи тепломассообмена: Учеб. пособие для авиационных вузов [Текст] / Я. М. Котляр, В. Д. Совершенный, Д. С. Стриженов. – М. : Машиностроение, 1987. – 320 с. 9. Кузьмин М. П. Электрическое моделирование неста-

ционарных процессов теплообмена [Текст]. – М. : Энергия, 1974. – 416 с. **10.** Казанский В. Б. Статистическая физика и термодинамика: Учебное пособие [Текст] / В. Б. Казанский, В. В. Хардигов. – Харьков : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. – 291 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Kurs fizicheskoy himii [Tekst] / Ya. I. Gerasimov, V. P. Dreving, E. N. Eremin i dr.; pod obsch. red. Ya. I. Gerasimova. – 2-e izd. – М. : Himiya, 1970. – Т. I. – 592 s. **2.** Eremin V. V. Osnovyi fizicheskoy himii. Teoriya i zadachi [Tekst]: ucheb. posobie dlya vuzov / V. V. Eremin, S. I. Kargov, I. A. Uspenskaya, I. A. Kuzmenko, V. V. Lunin. – М. : Izd-vo Ekzamen, 2005. – 480 s. **3.** Bazarov I. P. Termodinamika [Tekst] / I. P. Bazarov. – 5-e izd. – SPb.–М.–Krasnodar: Lan, 2010. – 384 s. **4.** Sivuhin D. V. Obschiy kurs fiziki. Tom 2. Termodinamika i molekulyarnaya fizika [Tekst]/ D. V. Sivuhin. – М. : Nauka, 1990. – 592 s. **5.** Isaev S. I. Termodinamika [Tekst]/ S. I. Isaev. – М. : Izdanie MGTU, 2000. – 413 s. **6.** Renke G. Neravnovesnaya statisticheskaya mehanika [Tekst]/ G. Renke. – М. : Mir, 1990. – 320 s. **7.** Kirilillin V. A. Tehnicheskaya termodinamika [Tekst]/ V. A. Kirilillin, V. V. Syichev, A. E. Sheyndlin. – М. : Izdatelstvo MEI, 2008. – 496 s. **8.** Kotlyar Ya. M. Metody i zadachi teplomassoobmena: Ucheb. posobie dlya aviatsionnyih vuzov [Tekst]/ Ya. M. Kotlyar, V. D. Sovershennyiy, D. S. Strizhenov. – М. : Mashinostroenie, 1987. – 320 s. **9.** Kuzmin M. P. Elektricheskoe modelirovanie nestatsionarnyih protsessov teploobmena [Tekst]. – М. : Energiya, 1974. – 416 s. **10.** Kazanskiy V. B. Statisticheskaya fizika i termodinamika: Uchebnoe posobie [Tekst] / V. B. Kazanskiy, V.V. Hardikov. – Harkov: HNU imeni V.N. Karazina, 2013. – 291 s.

Бойков І.В

#### ПРОЦЕС ВИПАРОВУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ТВЕРДОГО МАТЕРІАЛУ НА ПРИКЛАДІ САЖОВОГО ФІЛЬТРУ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Розглянуто процеси, які можуть відбуватися при нагріванні металевих поверхонь. З'ясовано, що процес випаровування на металевих поверхнях може відбуватися, минаючи фазу плавлення. Запропоновано підхід до визначення зміни товщини металеві поверхні сажового фільтру дизельного двигуна автомобільної техніки.

Бойков И.В.

#### ПРОЦЕСС ИСПАРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА НА ПРИМЕРЕ САЖЕВОГО ФИЛЬТРА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрены процессы, которые могут происходить при нагревании металлических поверхностей. Выяснено, что процесс испарения на металлических поверхностях может происходить, минуя фазу плавления. Предложен подход к определению изменения толщины металлической поверхности сажевого фильтра дизельного двигателя автомобильной техники.

I. Boykov

#### EVAPORATION OF SURFACE LAYER OF SOLID MATERIAL ON THE EXAMPLE OF THE SURFACE FILTER OF THE DIESEL ENGINE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

The processes that can occur when the metal surfaces are heated are considered. It was found that the process of evaporation on metallic surfaces can occur, bypassing the melting phase. An approach is proposed for determining the change in the thickness of the metallic surface of a diesel particulate filter of a diesel engine of automotive engineering.