

УДК 681.2.08

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ПРОЦЕСУ ЗМОЧУВАННЯ РІДИНАМИ ТВЕРДИХ ПОВЕРХОНЬ

Лопатін В. В.

*Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України
вул. Сімферопольська 2а, м Дніпро, 49005. тел. (0562) 46-01-51, факс (0562)46-24-26
e-mail nanu@igtm.dp.ua*

Проведений аналіз різних способів оцінки змочувальної здатності рідин при їх розтіканні поверхнею твердого тіла, вказані їх недоліки. Детально розглянутий спосіб, оснований на розтіканні крапель рідин твердою поверхнею. Описаний уточнений спосіб оцінки змочувальної здатності рідин, який дозволяє оцінювати змочувальну здатність рідин за розміром плями розтікання їх крапель з урахуванням впливу густини, в'язкості і випаровуваності рідин.

Ключові слова: капілярна дефектоскопія, змочувальна здатність, розтікання, в'язкість рідини, випаровування рідини.

Проведенный анализ различных способов оценки смачивающей способности жидкостей при их растекании поверхностью твердого тела, указаны их недостатки. Подробно рассмотрен способ, основанный на растекании капель жидкостей твердой поверхностью. Описанный уточненный способ оценки смачивающей способности жидкостей, который позволяет оценивать смачивающую способность жидкостей по размеру пятна растекания их капель с учетом влияния плотности, вязкости и испаряемости жидкостей.

Ключевые слова: капиллярная дефектоскопия, смачивающая способность, растекание, вязкость жидкости, испарение жидкости.

An analysis of various methods for assessing the wettability of liquids when they are spread by the surface of a solid are carried out, their disadvantages are indicated. A method is considered in detail, based on the diffusion of droplets of liquids by a solid surface. The refined method of estimating the wetting ability of liquids is described, which allows to evaluate the wettability of liquids by the size of the spots of their dispersal droplets taking into account the influence of density, viscosity and evaporation of liquids.

Keywords: capillary defectoscopy., wettability, spreading, liquid viscosity, liquid evaporation.

Контроль процесу змочування рідинами твердих поверхонь необхідно здійснювати в багатьох технологічних процесах, у різних галузях господарства. Взаємодія рідин і твердих тіл безпосередньо пов'язана із явищем змочування. Рідиною може бути пластовий флюїд, пенетрант, фарба, мастило, чорнило, розплавлений метал, гербіциди, тощо. При розробленні і підборі рідин для використання досліджують їх різні фізичні і функціонально-технологічні властивості: поверхневий натяг, в'язкість, розчинювальну здатність, дифузійні і колірні характеристики, корозійну активність і т.д. Серед цих властивостей одним з найбільш важливих є змочувальна здатність рідин по відношенню до поверхні твердого тіла. Особливо важливим є контроль цього параметру при проведенні капілярної дефектоскопії.

Відомо декілька способів оцінки змочувальної здатності рідин по відношенню до твердих матеріалів. Проте не всі вони придатні для матеріалів, використовуваних для капілярної дефектоскопії. Змочувальну здатність визначають, фіксуючи висоту рівноважного підняття рідин у вертикальних наскрізних капілярах або вимірюючи статичний краєвий кут змочування (безпосередньо визначаючи кут між проекцією краплі рідини і підкладки). Відомий також спосіб оцінки змочувальної здатності за значенням крайових кутів змочування, оснований на вимірюванні тиску, з яким одна рідина заміщає іншу на спресованому в циліндрі порошку, або витрати рідини, що вбирається в порошок. Застосовуються також інші способи.

Вказані способи непридатні для оцінки змочувальної здатності рідин, призначених для капілярної дефектоскопії, з ряду причин. У цих рідин відсутній статичний рівноважний

крайовий кут змочування, оскільки вони добре розтікаються поверхнею твердого тіла, утворюючи змінний (динамічний) кут змочування, значення якого близьке до нуля. При оцінці змочувальної здатності за висотою капілярного підняття рідин необхідно використовувати капіляри з матеріалів, по відношенню до яких оцінюється змочувальна здатність даних рідин, — в основному металів. Визначати з необхідною точністю висоту підняття рідин в таких непрозорих капілярах, а також виготовляти їх є складно. Також змочувальна здатність рідин по відношенню до порошоків не відповідає змочувальній здатності до монолітного матеріалу того ж складу з причини додаткового впливу капілярності і різної шорсткості поверхні на процес заміщення рідин.

Тому метою даної роботи є розроблення удосконаленого способу комплексної оцінки процесу змочування рідинами поверхонь твердих тіл

Найбільш поширений в капілярній дефектоскопії спосіб порівняльної оцінки змочувальної здатності рідин шляхом вимірювання радіуса або діаметра плями, утвореного краплею нормованого об'єму випробовуваної рідини, що розтікається на горизонтальній твердій поверхні при заданій температурі за встановлений час, або визначення діаметру цієї плями з часом (швидкості розтікання).. Вважається, що чим більший радіус (діаметр або площа) плями розтікання за інших рівних умов, то тим краща змочувальна здатність рідини.

Основним недоліком вказаного способу є вплив на вимірювані параметри, крім змочувальної здатності, також інших чинників: густини рідини, її в'язкості і летючості (а також пов'язаною з нею швидкості випаровування). Наприклад, чим вища летючість рідини, тим більша маса її випаровується за час розтікання краплі, тим меншим за інших рівних умов буде радіус плями розтікання. Виділити складову радіуса (діаметра, площі) плями або швидкості її зміни, визначувану тільки змочувальною здатністю рідини, при цьому способі неможливо. Фактично таким чином оцінюється не змочувальна здатність як ступінь взаємодії твердого тіла і рідини і їх здатність утворювати стійку поверхню розділу рідина - тверде тіло, а розтікання. Але змочування і розтікання — два різних, хоч і пов'язаних один з одним фізико-хімічних явища, яким відповідають два різних параметра якості рідин.

Під змочувальною здатністю рідин розуміють прояв взаємодії молекул на трифазній

межі існування твердої, рідкої і газоподібної фаз, що виражається в розтіканні рідини поверхнею твердого тіла і утворення стійкої поверхні розділу рідина - тверде тіло. При неповному змочуванні змочувальну здатність рідини оцінюють за допомогою рівноважного крайового кута змочування на площині, для якого справедливе рівняння Юнга [1]

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{m.g} - \sigma_{m.p.}}{\sigma_{p.g.}} \quad (1)$$

де $\sigma_{m.g.}$ — поверхневий натяг на межі тіло - газ (повітря); $\sigma_{m.p.}$ — те ж на межі тверде тіло - рідина; $\sigma_{p.g.}$ — те ж на межі рідина — газ.

При повному змочуванні, яке спостерігається в капілярній дефектоскопії, рівноважний крайовий кут не встановлюється. Про ефективність змочування судять за коефіцієнтом розтікання, що є термодинамічною характеристикою змочувальної здатності рідини:

$$S = \sigma_{m.g.} - \sigma_{m.p.} - \sigma_{p.g.} \quad (2)$$

Як видно, в будь-якій ситуації змочувальна здатність є функцією поверхневого натягу (питомої вільної поверхневої енергії) і ніяк не залежить від в'язкості, щільності і інших параметрів рідини (вона може залежати тільки від температури). Розтікання рідин — це явище двомірнього мимовільного руху рідин по поверхні, обумовлене дією змочувальної здатності, в'язкості рідини, її щільності і маси. Оскільки розтікання є функцією вказаних параметрів, дослідження зміни радіуса (діаметра або площі) плями розтікання залежно від цих параметрів цілком природно.

І змочувальна здатність, і розтікання є важливими характеристиками рідин для капілярного контролю і повинні оцінюватися і аналізуватися при розробці нових, виборі або порівнянні відомих капілярно-дефектоскопічних матеріалів. Обидві ці характеристики можна оцінити в ході одного експерименту. При цьому розтікання визначають, як завжди, вимірюванням параметрів плями розтікання або швидкості переміщення фронту рідини твердою поверхнею. Змочувальну здатність рідин по відношенню до твердої поверхні оцінюють таким чином. У відомому способі, що полягає у вимірюванні радіуса (діаметра, площі) плями розтікання крапель рідин нормованого об'єму на твердій горизонтальній поверхні при заданій температурі за встановлений час, додатково вимірюють також щільність, в'язкість і випаровуваність рідин, а змочувальну здатність

однієї рідини по відношенню до іншої оцінюють за співвідношенням коефіцієнтів розтікання, визначуваних з урахуванням впливу кожного вказаного вище чинника на розміри плями розтікання. Цей спосіб базується на відомій закономірності зміни радіуса краплі, що розтікається, залежно від часу. Процес розтікання краплі є двовимірним — змочена площа є кругом. Тривалість розтікання проникаючих рідин для капілярної дефектоскопії, зазвичай, складає від десятків секунд до декількох хвилин. В цьому випадку розтікання відбувається за так званим гідродинамічним в'язким режимом, при якому радіус плями розтікання рівний [2]

$$r = (4 \cdot \Delta\sigma \cdot m / \chi \cdot \pi \cdot \rho \cdot \eta)^{1/4} \cdot t^{1/4} \quad (3)$$

де r — радіус краплі у момент часу t ; $\Delta\sigma$ — рушійна сила, віднесена до одиниці довжини периметра змочування (при повному змочуванні, яке повинні забезпечувати рідини для капілярної дефектоскопії, $\Delta\sigma = S$ — вказаний вище коефіцієнт розтікання, безпосередній розрахунок значення S , зазвичай, неможливий, оскільки невідомі $\sigma_{m,c}$ і $\sigma_{m,p}$; m — маса краплі рідини, що розтікається; χ — коефіцієнт, рівний наближено 10, враховує збільшення сил тертя в рідині через наявність кутових компонентів швидкості її течії (оскільки кожний елементарний струмінь при русі по радіусу одночасно розширюється); ρ — густина рідини; η — в'язкість рідини.

Для рідини, що випаровується, у формулі (3) замість m необхідно записати $m - m_i$, де m — маса краплі рідини в початковий момент розтікання; m_i — маса частини рідини, що випарувалася за час розтікання краплі. Кількість рідини, що випарувалася, може бути визначена зважуванням або розрахунком за формулою:

$$m_i = a \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2 \cdot \Delta t_i \quad (4)$$

де a — експериментально визначувана питома випаровуваність рідини (інтенсивність випаровування), тобто маса рідини, що випаровується з одиниці площі поверхні в одиницю часу; n — кількість вимірювань радіуса (діаметра, площі) плями розтікання; Δt_i — проміжок часу між i -м та $(i-1)$ -м вимірюваннями розміру плями; r_i — радіус плями в i -й момент вимірювання.

Для двох рідин 1 і 2, змочувальна здатність яких порівнюється, за допомогою формули (3) можна скласти співвідношення

$$\frac{r_1}{r_2} = \left(\frac{\Delta\sigma_1 \cdot m_1 \cdot \rho_2 \cdot \eta_2}{\Delta\sigma_2 \cdot m_2 \cdot \rho_1 \cdot \eta_1} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^{1/4} \quad (5)$$

Звівши обидві частини рівності в четверту степінь і перемістивши відношення радіусів в праву частину рівності, а відношення $\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2} = \frac{S_1}{S_2}$ — у ліву, а також ввівши поправку на випаровування рідини, отримаємо

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{r_1^4}{r_2^4} \cdot \frac{\rho_1 \cdot \eta_1}{\rho_2 \cdot \eta_2} \cdot \frac{m_2 - m_{2i}}{m_1 - m_{1i}} \cdot \frac{t_2}{t_1} \quad (6)$$

де S_1, S_2 — коефіцієнти розтікання рідин 1 і 2; r_1, r_2 — радіус плями розтікання тих же рідин за час t_1 і t_2 відповідно; ρ_1, ρ_2 — густина рідин 1 і 2; η_1, η_2 — в'язкість вказаних рідин; m_1, m_2 — маса крапель рідин в початковий момент розтікання, яка визначається, наприклад, за формулою $m = \rho \cdot V$, де V — нормований об'єм краплі рідини; m_{1i}, m_{2i} — маса частини крапель рідин, що випаровується за час t_1 і t_2 .

Співвідношення (6) дозволяє оцінювати змочувальну здатність рідин за розміром плями розтікання їх крапель з урахуванням впливу густини, в'язкості і випаровуваності рідин. Кожний окремо з цих параметрів широко використовується для оцінки якості рідин. Їх визначають відомими способами, або (для раніше досліджених рідин) беруть їх значення з опублікованих робіт. Густину рідин, наприклад, знаходять ареометричним або пікнометричним способами, або способом гідростатичного зважування і т.д. В'язкість рідин вимірюють за допомогою скляних віскозиметрів ВПЖ-2, Пінкевіча або інших. Питому випаровуваність рідин визначають, наприклад, зважуючи пробу випробовуваної рідини, залитої в чашку Петрі відомого діаметру до і після її витримки на повітрі при 20°C протягом 30-60хв., і розраховуючи масу рідини, що випарувалася за 1 хв. з 1 см² площі поверхні рідини.

Після визначення вказаних фізичних властивостей рідин вимірюють розміри плями розтікання досліджуваних рідин нормованого об'єму на твердій горизонтальній поверхні (напр., на сталевій шліфованій пластині) при заданій температурі у фіксовані моменти часу, наприклад, через кожні 0,5хв. Для цього, наприклад, краплю заданого об'єму з мікробюретки наносять на шліфовану металеву пластинку; розташовану горизонтально, і вимірюють діаметр краплі циркулем-вимірником через кожні 0,5 хв.

Процес розтікання краплі може бути знятий разом з масштабною лінійкою на відеокамеру, і розміри краплі в кожен момент часу можуть бути встановлені за проекцією її зображення.

Викладений спосіб використаний для оцінки якості рідин для капілярної дефектоскопії, змочувальна здатність (точніше, розтікання)

яких була раніше визначена [3]. В якості зразка порівняння також використана рідина 4.

Результати порівняльної оцінки змочувальної здатності рідин відомим і запропонованим способами наведені в таблиці.

Таблиця 1 – Порівняльна оцінка змочувальної здатності рідин

№ рідини	Склад рідини, %	Діаметр плями розтікання через зразку (Сталь 3), $\text{м} \cdot 10^{-3}$	Характеристика змочувальної властивості рідини, визначена відомим методом		Фізичні властивості рідини при 20°C			Початкова маса краплі, $\text{кг} \cdot 10^{-6}$	Маса рідини, яка випарувалась з поверхні краплі за 300 с, $\text{кг} \cdot 10^{-6}$	Х-ка змочувальної властивості рідини, визначена запропонованим методом	
			Відносна змочувальність	Ранг рідини за змочувальності	Динамічна в'язкість, $\text{мПа} \cdot \text{с}$	Густина, $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot 10^3$	Литома випаровуваність, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot 10^4$			Відносна змочувальність	Ранг рідини за змочувальності
1	Гас-50, бензин-25, трансф. масло-25	61,3	2,04	5	1,72	0,814	0,11	32,56	21,52	55,51	2
2	Гас-65, скипідар-5, трансф. масло-30	70,0	2,33	2	2,48	0,831	0,018	33,24	4,83	53,98	3
3	Гас-80, скипідар-5, трансф. масло-15	73,0	2,43	1	2,39	0,816	0,022	32,64	5,91	64,24	1
4	Бензол-95, трансф. масло-5, червона проникаюча рідина Д-5	30,0	1,00	9	0,68	0,867	0,32	34,68	19,87	1,00	9
5	Гас-50, норіол-50	33,0	1,10	8	15,50	0,876	0,013	35,04	0,82	14,59	7
6	Гас-50, трансф. масло-15	68,0	2,26	3	1,78	0,819	0,0226	32,76	5,43	35,56	5
7	Гас-85, авіамасло-15	62,0	2,07	4	3,44	0,822	0,0226	32,88	4,53	45,69	4
8	Червона проникаюча рідина «К»	51,0	1,70	6	0,73	0,911	0,163	36,44	30,27	22,56	6
9	Люмінесцентна проникаюча рідина ЛЖ-6А	38,0	1,27	7	4,81	0,925	0,01	37,00	0,73	7,93	8

Потім для кожної досліджуваної рідини, приймаючи її за рідину 1, за допомогою формули (6) складають співвідношення коефіцієнтів розтікання, використовуючи як зразок порівняння (рідину 2) одну з досліджуваних рідин. За наслідками експерименту всі рідини можна розташувати в ряд по зменшенню або зростанню змочувальної здатності, вважаючи, що більшому значенню відносного коефіцієнта розтікання відповідає вища змочувальна здатність рідини.

Питома випаровуваність рідин визначена експериментально зважуванням проби рідини, залитої в чашку Петрі діаметром 95 мм, до і після витримки на повітрі при 20°C протягом 30-60 хв. Змочувальна здатність розрахована відомим способом по співвідношенню діаметру плями крапель рідин через 5 хв. розтікання по відношенню до рідини 4. Змочувальна здатність запропонованим способом знайдена за співвідношенням (6) з урахуванням впливу на процес розтікання в'язкості, густини і випаровуваності рідин.

Як видно, результати оцінки змочувальної здатності деяких рідин (3, 4, 7, 8) відомим і запропонованим способами співпадають. Проте рідина 1, яка, як вважалося на підставі оцінок відомим способом, володіє зниженою змочувальною здатністю (5-е місце по цьому параметру серед досліджених рідин), фактично володіє високою здатністю (2-е місце при оцінці запропонованим способом), а відносно малий діаметр плями розтікання рідини обумовлений її високою випаровуваністю із-за наявності в її складі бензину (питома випаровуваність цієї рідини рівна $6,605 \cdot 10^4$ г/см²·хв., тоді як для інших рідин, що займали за змочувальною здатністю перші чотири місця, вона не перевищує $1,36 \cdot 10^4$ г/см²·хв.). Навпаки, рідина 2 володіє дещо зниженою змочувальною здатністю (3-е місце при оцінці запропонованим способом), а великий діаметр плями її розтікання (і, відповідно, висока оцінка змочувальної здатності відомим способом) обумовлений зниженою випаровуваністю ($1,08510^4$ г/см²·хв.). Рідина 6 фактично властива низька змочуюча здатність (5-е місце при оцінці запропонованим способом), а при оцінці відомим способом ця характеристика завищувалася (2-е місце). Це обумовлено її низькою в'язкістю при малій випаровуваності. Так, в'язкість цієї рідини рівна 1,78 мПа·с, тоді як для інших рідин, що займали 1—4-і місця по змочуючій здатності, встановленій відомим способом, в'язкість складає від 2,39 до 3,44 мПа·с. Питома випаровуваність цієї рідини

рівна $1,36 \cdot 10^4$ г/см²·хв, а, наприклад, для рідини 1— $6,605 \cdot 10^4$ г/см²·хв.

Наведені результати доводять, що запропонований спосіб дозволяє точніше оцінювати змочувальну здатність рідин для капілярної дефектоскопії, якщо враховувати вплив на процес розтікання цих рідин в'язкості, густини і випаровуваності.

1. Використовуваний в капілярній дефектоскопії спосіб оцінки змочувальної здатності рідин шляхом вимірювання радіуса (діаметра, площі) плями розтікання крапель нормованого об'єму на твердій горизонтальній поверхні при заданій температурі за встановлений час фактично дозволяє оцінювати розтікання цих рідин.

2. При реалізації запропонованого способу порівняльної оцінки змочувальної здатності рідин на основі вимірювання розміру плями розтікання додатково вимірюють також густину, в'язкість і випаровуваність рідин, а змочувальну здатність однієї рідини по відношенню до іншої оцінюють за співвідношенням коефіцієнтів розтікання, визначуваних з урахуванням впливу кожного вказаного чинника на розміри плями розтікання. Це дає можливість здійснювати оптимальний вибір рідини, що забезпечують високу ефективність контролю.

1 Зимон А. Д. *Адгезия жидкости и смачивание* / А. Д. Зимон. — М.: Химия, 1974. - 388 с.

2 Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. *Физико-химические основы смачивания и растекания* / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. — М.: Химия, 1976. - 264.

3 Аксельруд Г. А., Альтшулер М. А. *Введение в капиллярно-химическую технологию* / Г. А. Аксельруд, М. А. Альтшулер. — М.: Химия, 1983 - 136 с.

Поступила в редакцію 18.05.2018 р.
Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Середюк О. Є., докт. техн. наук, проф. Костишин В. С.