

Устройство для определения краевого угла смачивания жидкостей на плоских поверхностях

А.И. Симонов, Н.М. Антонова

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им.
М.И. Платова, Новочеркасск*

Аннотация: Разработано устройство, позволяющее измерять краевой угол смачивания жидкостью плоских поверхностей. Устройство отличается простотой реализации, невысокой стоимостью, позволяет упростить процесс измерений и нивелировать погрешности, связанные с индивидуальными особенностями наблюдателя. В качестве примера с помощью определения краевого угла смачивания исследованы гидрофильность (гидрофобность) поверхностей – фторопласта, стали и стали с разделительным покрытием на основе состава Пента-100 при их смачивании водой. Изучена зависимость краевого угла смачивания исходного состава Пента-100 в жидком состоянии от жизнеспособности раствора. Показана корреляция краевого угла смачивания раствора Пента-100 с пористостью сформированного покрытия с поверхностью. Предложенное устройство может использоваться в учебных и производственных лабораториях для экспресс-оценки состояния различных поверхностей.

Ключевые слова: поверхность, краевой угол смачивания, вода, покрытие.

Введение

Объективной характеристикой смачивания жидкостью поверхности является краевой угол смачивания ($\theta, ^\circ$). Реальные поверхности имеют различный микрорельеф, химически неоднородны и при взаимодействии с эталонной рабочей жидкостью могут оцениваться как гидрофобные или гидрофильные поверхности. Такая оценка позволяет делать выводы о состоянии поверхности функциональных материалов различного назначения. Изучение динамики изменения θ в процессе пропитки пористых материалов смачивающими растворами позволяет оптимизировать технологии нанесения покрытий [1]. Анализ явления смачиваемости положен в основу разработанного метода экспресс-оценки смачиваемости порошкообразных материалов [2]. Большое внимание в работах исследователей уделяется и отклику угла смачивания на физико-химические свойства жидких систем, как способа отследить структурные изменения в системах. Так, оценка связи

«состав-смачиваемость» путем регистрации краевого угла для суспензий дисперсных строительных материалов рассматривается в работе [3], изменение структуры суспензий глины и цемента под действием ультразвуковых колебаний – в работе [4], взаимосвязь текстуры покрытий TiO_2 с гидрофобными свойствами поверхности в работе [5]. Вопросы оптимизации смачивающих свойств покрытий из оксида иттрия с опорой на θ изучены авторами в исследованиях [6]. Анализ доступных литературных источников позволяет сделать вывод, что краевой угол смачивания является востребованной объективной количественной характеристикой поверхностных свойств как используемых подложек, так и наносимых на них жидких составов.

Поэтому задача повышения точности измерений и совершенствование методов определения краевого угла является актуальной, а ее решение позволяет оценивать и корректировать состояние как реальных поверхностей, так жидких систем, контактирующих с поверхностями, для улучшения эксплуатационных характеристик формируемых изделий.

Известно довольно большое число методов, связанных с оценкой краевого угла – гониометрический метод, диаграммы отраженного света, по профилю пузырька, лежащей капли и другие. Наиболее известным методом является метод лежащей капли [7]. Исследуемая капля, диаметром не более 5 мм, высаживается из пипетки, шприца или дозатора на подготовленную поверхность, после чего изображение капли проектируется на экран. При всей простоте и доступности метода ему свойственна невысокая точность, обусловленная ограниченными размерами капли и субъективными визуальными оценками изображения капли.

Цель работы: разработка устройства, позволяющего повысить точность измерения краевого угла смачивания поверхности жидкостью.

Краевой угол смачивания θ является количественной характеристикой смачивания подложки жидкостью (рисунок 1). Точка А на рисунке 1 – точка соприкосновения твердой, жидкой и газообразной фаз. Если провести касательную через эту точку к поверхности капли, то угол между касательной и подложкой и будет углом θ , где точка А – вершина угла.

При расчете угла θ использовали формулу Юнга – Лапласа:

$$\cos \theta = \frac{(d/2)^2 - h^2}{(d/2)^2 + h^2} \quad (1)$$

здесь d и h - диаметр основания и высота капли.

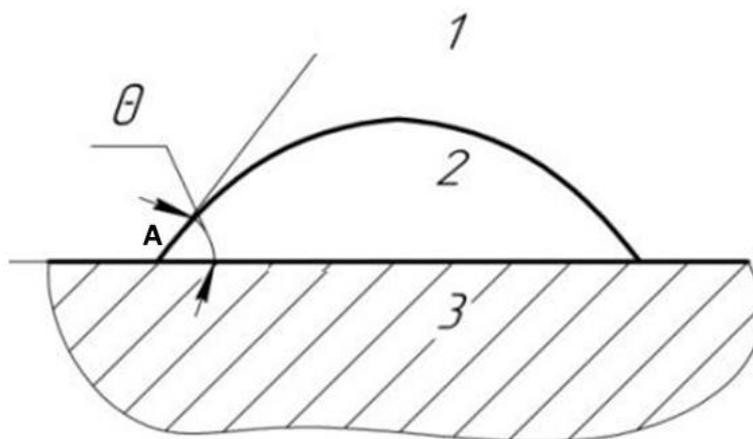


Рис. 1. – Метод лежащей капли:

газ (1), жидкость (2), твердая поверхность (3), θ - краевой угол смачивания

Для измерения краевых углов смачивания авторами была предложена установка, общий вид и структурная схема которой приведены на рисунках 2 и 3. Установка состоит из подъемного столика для лазерного уровня (Hilda, 90x90 мм), исследуемого образца с каплями, цифрового микроскопа DigiMicro (с увеличением до 1600X и подсветкой), связанного с компьютером. Обработка изображений производилась с помощью программного обеспечения ADF Image Capture, позволяющего получать достоверные снимки с корректным балансом белого и проводить измерения на

микроскопе. Применение обеспечения дает возможность автоматически наносить масштабные метки на цифровые изображения капель, как в линейных единицах измерения, так и в пикселях.

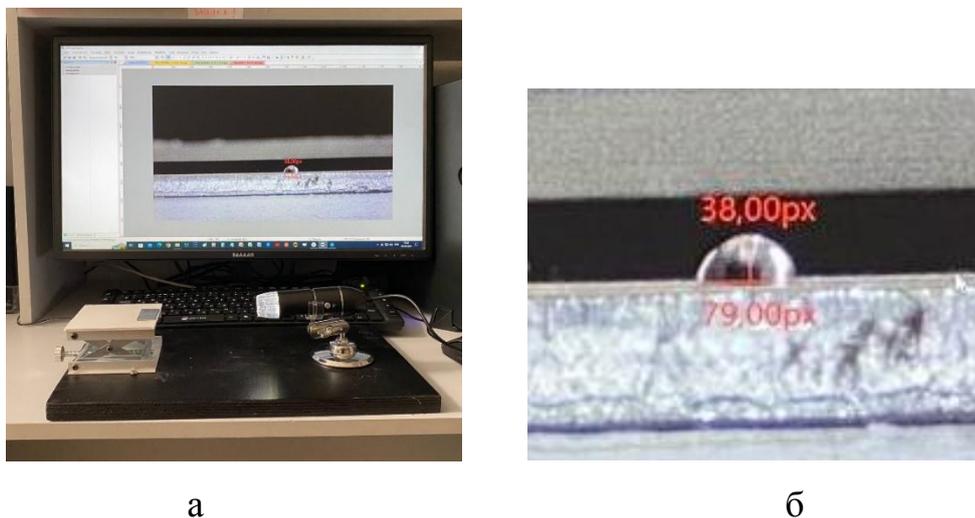


Рис. 2. – Определение краевого угла смачивания жидкостей на подложках: вид устройства (а), фрагмент изображения капли с цифровой разметкой (б)

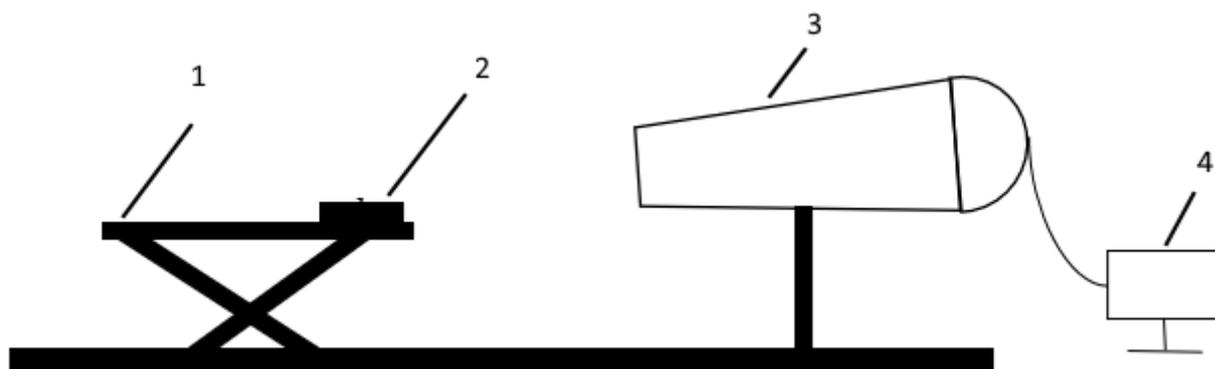


Рис. 3. – Структурная схема устройства для измерения краевого угла смачивания: подъемный столик (1), образец с каплей (2), цифровой микроскоп (3), персональный компьютер (4)

Из преимуществ разработанной установки стоит отметить следующие:
- Наличие в комплекте установки цифрового микроскопа позволяет получить снимки капель хорошего качества, а разметка изображения с помощью

программного обеспечения – избежать грубых погрешностей, связанных с визуальной оценкой наблюдателя. Поскольку результатом расчета по формуле (1) является безразмерная величина, совершенно не принципиально, какую разметку наносит наблюдатель на изображение: в линейных единицах измерения или пикселях. Необходимость использовать для расчета углов такой прибор, как гониометр, в этом случае отпадает.

- Небольшие габариты (вес используемого цифрового микроскопа и подъемного столика суммарно не превышает 0,5 кг), дают возможность производить экспресс-оценку угла θ в полевых условиях; столик и микроскоп DigiMicro имеют относительно невысокую стоимость.

- Грузоподъемность столика (до 5 кг) позволяет исследовать смачивание произвольных поверхностей, минуя стадию подготовки образцов заданных размеров.

- Немаловажным является и соображение избежать затрат на приобретение такого дорогостоящего оборудования для измерения угла смачивания, как, например, прибор Kruss DSA-30 (стоимость ~1 500 000 рублей).

Установку тестировали для следующих поверхностей: фторопласт, сталь 40Х, сталь 40Х с нанесенным антиадгезионным покрытием Пента-100. Фторопласт использовали как полимерную поверхность сравнения, особенности смачивания которой хорошо изучены и освещены в справочной литературе. Тестовой жидкостью служила дистиллированная вода.

Покрытие Пента-100 используется в промышленности для защиты конструкций от коррозии, в качестве защитной пленки для стекла, наносится при формировании композиционных изделий на пресс-формы. Оно должно иметь хорошее сцепление с оснасткой и легко отделяться от формовки. Покрытие Пента-100 наносили в соответствии с рекомендациями изготовителя. Подложки перед испытаниями обезжировали с помощью спирта. Величину θ определяли спустя 60 секунд после нанесения капли, по

пяти счетным измерениям [8]. Испытания проводили при температуре (23 ± 1) °С. Результаты измерений среднего краевого угла смачивания приведены в таблице 1.

Полученные результаты хорошо коррелируют с данными доступных литературных источников. В эксперименте поверхности стали 40Х и оргстекла проявляют гидрофильные свойства, поверхности фторопласта и покрытия Пента-100 ближе к гидрофобным (известно, что при $\theta > 90^\circ$ поверхность гидрофобная), что обеспечивает хорошее отделение формуемых изделий от защищаемой покрытием Пента-100 оснастки.

Таблица 1.

Подложка	Жидкая среда	$\theta, ^\circ$
Фторопласт	Вода	80
Сталь 40Х	Вода	75
Сталь 40Х + Пента 100	Вода	83

Функциональное покрытие Пента-100 используется для защиты металлических поверхностей, поэтому на эксплуатационные показатели покрытия влияют образующиеся на его поверхности поры. Для двухкомпонентного состава, которым является Пента-100, порообразование в значительной мере зависит от жизнеспособности исходного раствора. В технологическом процессе от жизнеспособности зависит стабильность жидкой системы, т.е. промежуток времени, в течение которого система имеет хорошую текучесть. Потеря текучести приводит к генерации множественных дефектов – пор, кратеров, потеков, вязкость растворов растет. Изготовители состава Пента-100 определяют срок жизнеспособности в 96 часов. В нормативной документации предусмотрен контроль вязкости жидких двухкомпонентных составов для получения качественных покрытий. Однако даже при равных исходных условиях (температура, соотношения массовых

долей компонентов) значения вязкости растворов зависят от используемых марок вискозиметров, пробирок, нагрузок на индектор вискозиметра. Промывка сопел вискозиметра после контакта с полимерными системами, обладающими высокой адгезией к контактным поверхностям прибора также затруднена. Измерения краевого угла позволяют получить оперативную оценку состояния жидкой системы при смачивании ею конкретной поверхности.

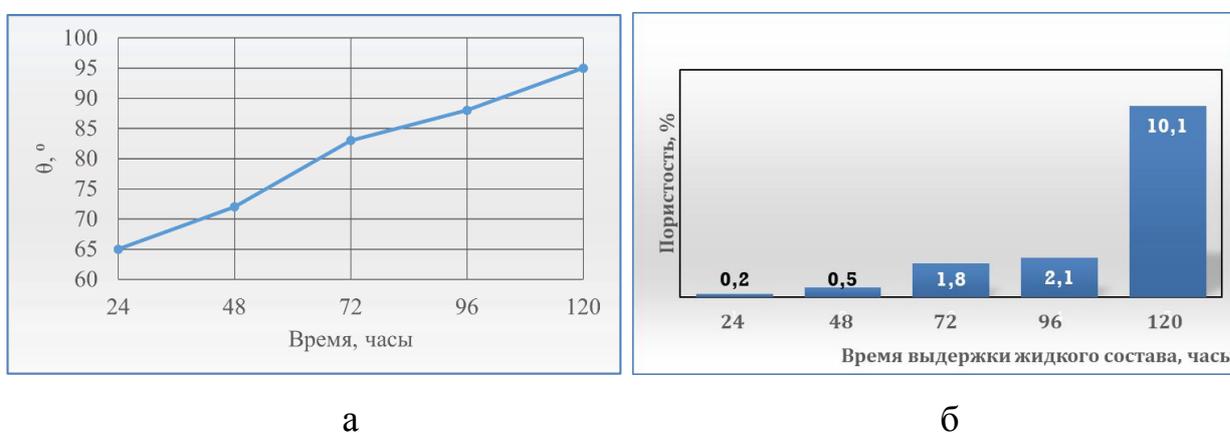


Рис. 4. – Влияние времени выдержки растворов Пента-100 на: краевой угол смачивания (а), пористость сформированного покрытия (б)

Поэтому с помощью разработанной установки исследовали динамику изменения краевого угла к стальной поверхности по мере увеличения срока выдержки жидкого состава и определяли изменение поверхностной пористости покрытий, изготовленных из растворов, спустя различные интервалы времени после смешивания компонентов (24, 48, 72, 96 часов). Дополнительно исследовали аналогичные характеристики для промежутка времени 120 часов. Поверхностную пористость определяли по методике, изложенной в работе [9]. Результаты измерений представлены на рисунке 4, а-б. Из результатов эксперимента следует, что вязкость раствора заметно повышается спустя 96 часов выдержки ($\theta=87^\circ$), при времени 120 часов

Заключение

Предложено устройство для определения краевого угла смачивания жидкостями поверхностей, отличающаяся простотой конструкции и позволяющая повысить точность проводимых измерений. Устройство может быть использовано для оперативной оценки гидрофобных – гидрофильных свойств поверхностей в таких отраслях, как строительство или машиностроение.

Устройство разработано в рамках научно-исследовательской деятельности СНО «Композит» Каменского технологического института (филиала) ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова и апробировано в лабораторных условиях для оценки по краевому углу смачивания поверхностных свойств функциональных покрытий [10].

Литература

1. Старостин А. Г., Лановецкий С. В., Пойлов В. З. Влияние характеристик поверхностных явлений нитрата марганца на пропитку танталового анода конденсатора // Инженерный вестник Дона. 2013. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1728.

2. Федотова О. А., Черепанова М. В., Потапов И. С., Пойлови В. З. Исследование процесса смачиваемости пылевидного KCl, содержащего примеси флотореагентов // Инженерный вестник Дона. 2013. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1558.

3. Волков В. В., Гнездилова Е. И., Кукина О. Б., Степанова А. О. Влияние минерального состава суспензий дисперсных строительных материалов на краевой угол смачивания // Химия, физика и механика материалов. 2021. № 4(31). С. 51-62.

4. Вилкова Н. Г., Мишина С. И., Мазурин Н. Н. Влияние ультразвуковых воздействий на краевой угол смачивания

органомодифицированных частиц // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26, № 7. С. 22-26.

5. Sharifi N., Ettouil F. B., Moreau C., Dolatabadi A., Pugh M. Engineering surface texture and hierarchical morphology of suspension plasma sprayed TiO₂ coatings to control wetting behavior and superhydrophobic properties // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 329. pp. 139-148.

6. Wang S., Liu X., Zhang J., Xu P., Wei M., Liu G., Zhan X., Coyle T. W., Mostaghimi J. Tailoring the wetting behaviors and surface structures of yttrium oxide coatings deposited via different plasma spray processes // Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 29. pp. 1924-1936.

7. Киселев М. Г., Савич В. В., Павич Т. П. Определение краевого угла смачивания на плоских поверхностях // Наука и техника, 2006. №1. URL: cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-kraevogo-ugla-smachivaniya-na-ploskih-poverhnostyah.

8. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента: справочное руководство. М.: Наука, 1971. 192 с.

9. Антонова, Н. М., Овчинников О. С. Показатели качества и снижение трудоемкости испытаний лакокрасочных покрытий путем применения цифровых технологий к анализу поверхности покрытий // Инженерный вестник Дона. 2023. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8573.

10. Антонова Н. М., Симонов А. И., Линьков И. С., Хохлова А. Д. Сопоставление энергетических характеристик и адгезионной прочности смазки Пента-100 к стали // Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2024 (ICMSSTE 2024) : Материалы международной научно-практической конференции, Ялта, 28–31 мая 2024 года. Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, 2024. С. 157-162.

References

1. Starostin A. G., Lanovetskiy S. V., Poylov V. Z. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1728.
2. Fedotova O. A., Cherepanova M. V., Potapov I. S., Poylovi V. Z. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1558.
3. Volkov V. V., Gnezdilova YE. I., Kukina O. B., Stepanova A. O. Khimiya, fizika i mekhanika materialov. 2021. № 4(31). pp. 51-62.
4. Vilkoval N. G., Mishina S. I., Mazurin N. N. Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2023. T. 26, № 7. pp. 22-26.
5. Sharifi N., Ettouil F. B., Moreau C., Dolatabadi A., Pugh M. Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 329. pp. 139-148.
6. Wang S. Liu X., Zhang J., Xu P., Wei M., Liu G., Zhan X., Coyle T. W., Mostaghimi J. Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 29. pp. 1924-1936.
7. Kiselev M. G., Savich V. V., Pavich T. P. Nauka i tekhnika, 2006. №1. URL: cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-kraevogo-ugla-smachivaniya-na-ploskih-poverhnostyah.
8. Rumshinskiy, L.Z. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta: spravochnoye rukovodstvo [Mathematical processing of experimental results: a reference guide]. M.: Nauka, 1971. 192 p.
9. Antonova, N. M., Ovchinnikov O. S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8573.
10. Antonova N. M., Simonov A. I., Lin'kov I. S., Khokhlova A. D. Materialovedeniye, formoobrazuyushchiye tekhnologii i oborudovaniye 2024 (ICMSSTE 2024): Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Yalta, 28–31 maya 2024 goda. Simferopol': Krymskiy federal'nyy universitet im. V.I. Vernadskogo, 2024. pp. 157-162.

Дата поступления: 23.09.2024

Дата публикации: 14.11.2024
