

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ НА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

*Докт. техн. наук, проф. КИСЕЛЕВ М. Г., САВИЧ В. В., ПАВИЧ Т. П.*

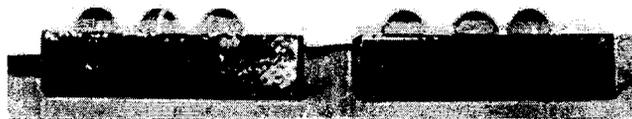
*Белорусский национальный технический университет,  
Институт порошковой металлургии НАН Беларуси*

Мерой смачивания жидкостью твердых тел является краевой угол. Обычно при измерениях предполагается, что поверхность твердого тела абсолютно гладкая и однородная [1]. Поверхность же реальных твердых тел далека от идеальной: неоднородная по химическому составу и негладкая [2, 3]. Необходимость определения характеристик смачивания в системе «реальное твердое тело – жидкость» обусловлена широким использованием данного явления в различных устройствах и технологических процессах [4, 5]. Так, применение различных технологий при изготовлении деталей имплантатов, особенно на финишных операциях, позволяет существенно изменять как механические, так и физико-химические свойства их поверхности [6]. Последние могут быть оценены различными методами, среди которых главным сегодня является метод, основанный на определении краевого угла смачивания [7]. Хорошее смачивание поверхности имплантата физиологическими жидкостями, кровью является необходимым условием стабильной и скорой интеграции имплантатов в костные, мышечные и иные ткани организма [8]. Поэтому совершенствование методов и средств определения краевого угла смачивания, повышение точности его измерения имеют важное практическое значение для объективной оценки влияния поверхностной обработки имплантатов на их эксплуатационные показатели, в частности на биоактивность [6].

**Обзор методов и устройств для определения краевого угла смачивания.** Известен ряд методов измерения краевого угла смачивания [9]: по профилю пузырька; по давлению газа,

компенсирующему капиллярное давление (для пористых твердых тел и капилляров); по скорости капиллярного поднятия (также для пористых твердых тел и капилляров); метод прямой пластины (метод Вильгельми); метод наклонной пластины; по величине капель; по профилю капли. Из них последний – наиболее прост в аппаратном оформлении, не требует знания поверхностного натяжения жидкости, однако представляет определенные технические проблемы в случае хорошего смачивания (краевой угол – меньше 45–60°).

Метод лежащей капли относится к статическим методам определения поверхностного натяжения, т. е. поверхность неподвижна в момент измерения. В основе метода – определение параметров профиля капли, лежащей на плоской поверхности твердого тела. Для этого каплю необходимо сфотографировать и по фотографии (рис. 1) определить необходимые для расчета краевого угла смачивания ее параметры.



*Рис. 1. Фотография образцов титанового сплава BT1-0 с нанесенными на их поверхность каплями физиологического раствора [10]*

Краевой угол смачивания  $\theta$  [9] образуется векторами сил поверхностного натяжения, направленными по касательной к поверхностям раздела «твердое тело – жидкость» и «жидкость – воздух». При полном смачивании  $\theta = 0^\circ$ , при полном несмачивании –  $180^\circ$ .

Для определения краевого угла смачивания на плоских поверхностях могут быть использованы различные устройства.

Известно устройство для определения краевого угла смачивания, которое состоит из: исследуемого образца твердого материала, выполненного в виде пластины, расположенного на поддерживающем столике; пипетки для формирования капли исследуемой жидкости на поверхности образца и лампы для проектирования изображения капли на экран. Причем на экран нанесена шкала, по которой снимают показания обычной угловой величины и величины, связанной с линией поворота, проходящей через точку касания капли с поверхностью образца и самую верхнюю точку капли, а величину краевого угла смачивания определяют по шкале транспортира [11].

Недостаток этого устройства – невысокая точность измерений, связанная с возможной погрешностью, вносимой оператором при интерпретации результатов непосредственных измерений по шкале транспортира. Измерения, проведенные с использованием данного устройства, длительны и имеют малую производительность. Еще одним отрицательным фактором является невозможность достоверного и точного измерения краевых углов на шероховатых поверхностях.

Для определения краевого угла смачивания можно также использовать устройство, которое состоит из: основания, на котором закрепляется исследуемый образец в горизонтальном положении; коллиматора, формирующего основной параллельный пучок света перпендикулярно поверхности образца; устройства формирования капли; экрана с отверстием для прохождения пучка света от коллиматора и определения диаметра отраженной проекции капли. Причем экран параллелен поверхности образца и установлен на известном расстоянии от нее [12].

Технические возможности данного устройства ограничены: невозможно измерить краевой угол для оптически прозрачных жидкостей (измерения сложны из-за необходимости поддержания строгой параллельности экрана и исследуемого образца), а также невозможно определить краевые углы на шероховатых поверхностях.

Также известны: устройство, состоящее из столика с исследуемым образцом, помещенного в герметичный корпус, и устройства формирования капли, газовакуумной системы, оптической системы, выполненной в виде цифровой камеры, соединенной с компьютером, и источника света с рассеивающим светофильтром [13].

Описанное выше устройство имеет невысокую точность измерений, связанную с возможным искажением действительного профиля и размеров капли, вызванным искажениями светового потока на рассеивающем светофильтре. Недостатком известного устройства является также невозможность определения краевых углов на шероховатых поверхностях, связанная с явлениями, установленными законом Венцеля – Дерягина.

**Совершенствование методики и средств для определения краевого угла смачивания по методу лежащей капли.** Для повышения точности измерения краевых углов смачивания с учетом шероховатости поверхности исследуемого образца, повышения достоверности полученных результатов авторами был предложен комплекс устройств, структурная схема которого приведена на рис. 2.

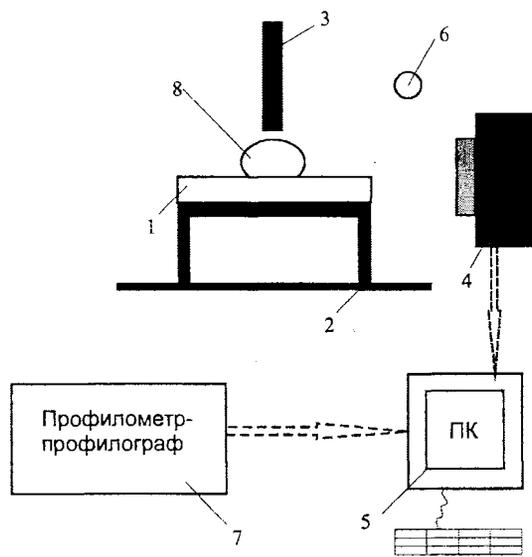


Рис. 2. Структурная схема комплекса устройств для определения краевого угла смачивания на плоских поверхностях

Он состоит из столика 2 с исследуемым образцом 1, устройства формирования капли 3,

оптической системы, включающей цифровой фотоаппарат 4, связанный с компьютером 5, и источник света 6, выполненный в виде конденсора или полупроводникового лазера. В состав комплекса входит также профилограф-профилометр 7 для измерения параметров шероховатости поверхности образцов. Результаты измерений обрабатываются при помощи персонального компьютера.

Процедура измерения включает следующие действия. На столик устанавливается исследуемый образец. На его предварительно очищенную поверхность при помощи устройства формирования капли (например, шприца с иглой внутренним диаметром 0,1 мм) наносится капля жидкости (например, физраствор – 0,1%-й раствор NaCl). Затем каплю освещают источником света, а ее профиль фиксируют при помощи цифровой камеры (например, Hewlett-Packard HP575: x3 (оптическое); x6 (цифровое); матрица 4,2 МПксл), связанной с компьютером. Полученное изображение увеличивается до необходимого размера и по фотографии капли (рис. 3) или по ее электронному аналогу (рис. 4) определяют параметры капли, необходимые для расчета краевого угла смачивания. Измерения производят при помощи стандартного (например, CorelDraw) или специального программного обеспечения. Предварительно с помощью профилометра-профилографа определяются стандартные параметры шероховатости  $R_a$ ,  $R_z$  поверхности образцов с обработкой полученных профилограмм на компьютере.



Рис. 3. Фотография капли на поверхности образца титанового сплава BT1-0, подвергнутого струйно-абразивной обработке ( $R_a = 2,67$  мкм)

Краевой угол рассчитывают по формуле, полученной авторами экспериментально-теоретическим путем:

$$\sin(\theta/2) = \frac{lhk^2}{(l/2)^2 k^4 + h^2}, \quad (1)$$

где  $k = R_{a(\text{шер})}/R_{a(\text{полир})}$  – коэффициент шероховатости;  $R_{a(\text{шер})}$ ,  $R_{a(\text{полир})}$  – соответственно высотный показатель микрогеометрии поверхности образца и его значение для полированной поверхности;  $h$  – высота капли;  $l$  – длина хорды капли.

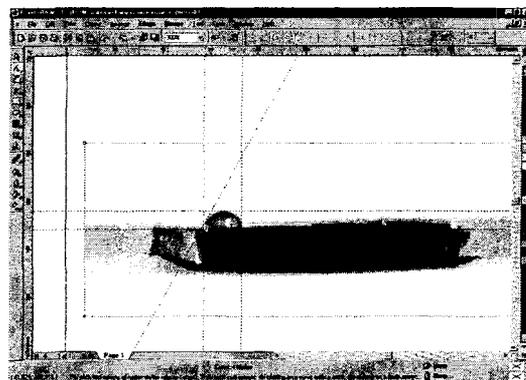


Рис. 4. Определение краевого угла смачивания при помощи ПО CorelDraw

Геометрические параметры капли, измеренные по ее изображению и используемые в расчетах, показаны на рис. 5.

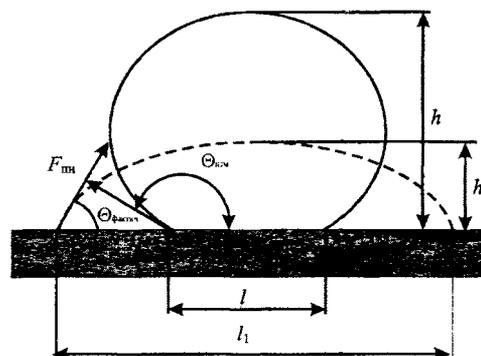


Рис. 5. Геометрические параметры капли, используемые в расчетах по (1)

На фотографии (рис. 4) видно, что прямым измерением краевого угла получается значение  $61^\circ$ . Это противоречит уравнению Венцеля – Дерягина. С использованием результатов измерений шероховатости  $k = R_{a(\text{шер})}/R_{a(\text{полир})} = 2,67/0,7 = 3,814$  получаем значение  $13,5^\circ$ , которое достаточно адекватно соответствует указанным выше закономерностям физической химии.

## ВЫВОДЫ

1. На основе обзора известных методов исследования краевого угла смачивания показано,

что сегодня наиболее приемлемым с точки зрения простоты, универсальности и обеспечения удовлетворительной точности является метод лежащей на поверхности капли.

2. Предложен комплекс устройств и усовершенствована методика определения краевого угла смачивания по методу лежащей на плоской поверхности капли, учитывающие влияние шероховатости поверхности исследуемого образца, что позволило повысить точность его измерений и достоверность их результатов.

3. Получена уточненная формула для расчета краевого угла смачивания, в которой помимо геометрических параметров капли учитывается влияние шероховатости поверхности образца путем введения коэффициента шероховатости, определяемого как отношение высотных параметров микрогеометрии поверхности исследуемого образца к их значениям, соответствующим его полированной поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Адамсон А.** Физическая химия поверхностей. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
2. **Определение** краевого угла в капиллярно-пористых материалах / П. А. Витязь, В. К. Шелег, В. М. Капцевич и др. // Заводская лаборатория. – 1985. – № 4. – С. 53–55.

3. **Метод** определения краевого угла смачивания в пористых порошковых материалах / П. А. Витязь, В. К. Шелег, В. М. Капцевич и др. // Порошковая металлургия. – 1986. – № 4. – С. 52–55.

4. **Зимон А. Д.** Адгезия жидкости и смачивание. – М.: Химия, 1974. – 416 с.

5. **Сумм Б. Д., Горюнов Ю. Б.** Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976. – 240 с.

6. **Савич В. В., Киселев М. Г., Воронович А. И.** Современные материалы хирургических имплантатов и инструментов. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 119 с.

7. **Методика** исследования смачиваемости и адсорбционной способности титановых имплантатов / Т. П. Павич, Д. И. Сарака // Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: Материалы докладов. – Мн.: Геопринт, 2004. – С. 208–211.

8. **Boettcher R.** Fast Bone Regeneration (FBR) – ein Anwenderbericht // Dentale Implantologie. – 2001. – № 3. – С. 8–12.

9. **Поверхностные** явления и поверхностно-активные вещества: Справ. / Под ред. А. А. Абрамзона, Е. Д. Шукина. – Л.: Химия, 1984. – 392 с.

10. **Методика** исследования смачиваемости и адсорбционной способности титановых имплантатов / М. Г. Киселев, В. В. Савич, Т. П. Павич // Наука – образованию, производству, экономике. Материалы Второй междунауч.-техн. конф. – Мн.: БНТУ, 2004. – С. 220–224.

11. **United States patent** 5268733, G 01 B 11/26; G 01 N 13/02, 1993.

12. **United States patent** 4688938, G 01 B 11/26, 1987.

13. **Филонов М. Р.** Измерение плотности металлических расплавов методом лежащей капли с использованием цифровой фотокамеры // Материаловедение. – 2002. – № 1. – С. 13–19.

УДК 535.317

## КОМПОЗИЦИЯ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНАСТИГМАТИЧЕСКОЙ АФОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

*Канд. техн. наук, доц. АРТЮХИНА Н. К., КОРСАК Н. В.*

*Белорусский национальный технический университет*

Современное оптическое приборостроение ставит перед разработчиками оптических систем задачу получения все более совершенного качества изображения при большой светосиле и значительных угловых полях зрения. Существенное расширение спектрального диапазона работы оптических приборов и создание приемников лучистой энергии, чувствительных в

далеких областях спектра, создают необходимость разработки чисто зеркальной оптики, применяемой во многих областях науки и техники. В объективах с высокой и синтезированной апертурой часто встречаются задачи, использующие схемное решение с телескопической насадкой к фокусирующему объективу [1–3]. В связи с этим исследование возможно-