

М.Г. Киселев,  
А.В. Дроздов,  
С.Г. Мониц

## МЕТОДИКА И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕМКОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СПОСОБОМ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С НЕЙ ЖИДКОСТИ

УДК 621.792.4 (047.1)(476)

Статья посвящена разработке методики и аппаратных средств для определения емкости исследуемой поверхности, основанных на прямом измерении массы жидкости, оставшейся на ней после выполнения процедуры центрифугирования. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что данная методика позволяет проводить сравнительную оценку влияния шероховатости исследуемой поверхности на значение ее емкости при взаимодействии с различными жидкостями.

The article is devoted to the development of methods and hardware determine the surface capacity of under study, based on direct measurement of the liquid mass remaining in it after using the centrifugation. It is justified theoretically and experimentally confirmed that this technique allows for a comparative assessment of the influence of surface roughness of the test on the value of its capacity for interaction with different liquids.

### Введение

Емкость поверхности твердого тела является важным эксплуатационным показателем, характеризующим способность ее микрорельефа удерживать определенный объем данной жидкости. В частности, для поверхностей пар трения, работающих в условиях граничной смазки, в качестве такого показателя используется маслосъемность их микрорельефа, и чем она выше, тем лучше условия работы фрикционного сопряжения [1].

Очевидно, данный показатель также целесообразно использовать для оценки состояния поверхности имплантата с точки зрения ее интеграционной способности в организме человека. Связано это с тем, что именно она с момента установки имплантата начинает взаимодействовать с биологическими жидкостями организма и, в частности, с белковыми молекулами, определяя тем самым условия и интенсивность протекания начальной стадии процесса интеграции имплантата. Поэтому оправданно утверждать о наличии определенной зависимости между емкостью микрорельефа поверхности имплантата и условиями протекания процесса его интеграции в организме человека. Однако на сегодня в литературных источниках отсутствуют систематизированные данные, касающиеся количественной оценки емкости поверхности имплантата и ее зависимости от способа и режимов формирования на ней окончательного микрорельефа. Для получения таких данных в первую очередь необходимо разработать методику и создать аппаратные средства, позволяющие проводить сравнительную количественную оценку емкости поверхности при различных параметрах сформированного на ней микрорельефа, т.е. имеющую различную шероховатость.

Решению этой актуальной задачи посвящена настоящая статья.

### Разработка методики определения емкости поверхности с применением процедуры центрифугирования

В настоящее время для определения маслосъемности поверхности трения используются два способа. Один из них [2] заключается в том, что на исследуемую поверхность трения наносят дозированную каплю масла и раскатывают по исследуемой поверхности с помощью ролика. По толщине масляного пятна, полученного после прокатки, определяют степень маслосъемности поверхности. Однако этот способ весьма неточен, так как невозможно абсолютно точно дозировать каплю масла и обеспечить постоянное усилие прижатия ролика по всей контролируемой поверхности, что сказывается на площади отпечатка, а следовательно, на толщине пленки.

Второй способ [3] основан на определении скорости самопроизвольного растекания масляного пятна, образующегося между исследуемой поверхностью и прозрачной пленкой с отверстием и делениями, прижатой к ней. В этом случае на исследуемую поверхность 1 (рис. 1, а) накладывается прозрачная пленка 2 и прижимается к ней.

На отверстие в пленке диаметром 1–1,5 мм наносится капля масла 3 и в этот момент засекается время. По истечении времени  $t$  фиксируются размеры масляного пятна  $h$  и  $B$  (рис. 1, б) с помощью делений, нанесенных на пленке. Скорость растекания масла рассчитывается по формуле

$$\theta = \frac{h \cdot B}{t},$$

где  $h$  и  $B$  – размеры масляного пятна, мм;  $t$  – время от начала растекания масла до момента определения размеров масляного пятна, с.

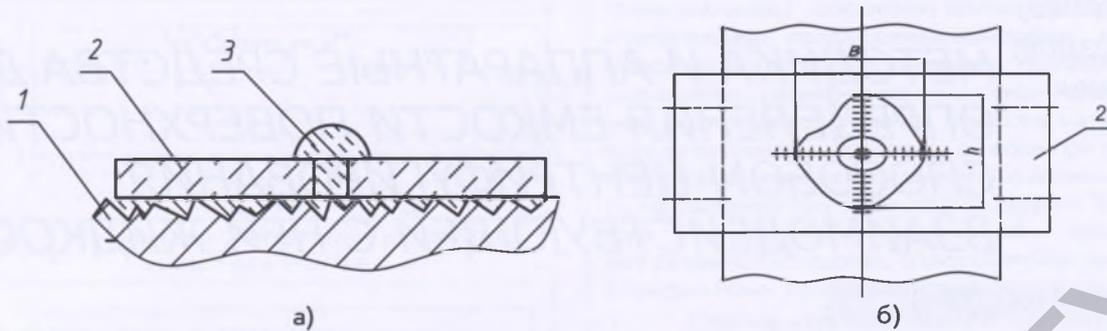


Рис.1. Способ определения маслостойкости поверхности с помощью прозрачной пленки

Такой способ использовался авторами [1] при выборе оптимального метода технологической обработки поверхности трения, при котором на ней формируется микрорельеф, обеспечивающий наибольшее значение скорости растекания масла между двумя сопрягаемыми поверхностями. Однако ему, как и первому способу определения маслостойкости поверхности, являющимся косвенным, присущи недостатки, связанные с неточностью измерения параметров получаемого на ней масляного пятна, а также трудностями обеспечения постоянных условий выполнения измерений, в частности, усилия прижатия прозрачной пленки к испытываемой поверхности, что существенно влияет на скорость самопроизвольного растекания масла между ними.

Для устранения указанных недостатков необходимо решить две взаимосвязанные задачи: реализовать возможность прямого измерения массы, а соответственно, объема жидкости на исследуемой поверхности, для чего обеспечить постоянные условия их взаимодействия без использования дополнительного контртела в виде ролика или пленки.

Исходя из этого, авторами данной статьи предложена методика определения емкости поверхности, основанная на прямом измерении массы жидкости, оставшейся на ней после выполнения процедуры центрифугирования. В ходе ее проведения на жидкость, предварительно нанесенную на неподвижную испытываемую поверхность, действуют с одной стороны центробежная сила  $F_c$ , стремящаяся удалить ее с вращающейся поверхности, а с другой – сила ее поверхностного натяжения  $F_n$ , обеспечивающая ее удержание на ней. Запишем условие равенства этих сил ( $F_n = F_c$ ) в виде

$$m \cdot \omega^2 \cdot R = \alpha \cdot l, \quad (1)$$

где  $m$  – масса объема жидкости, оставшейся на испытываемой поверхности, кг;  $\omega$  – угловая скорость вращения поверхности, рад<sup>-1</sup>;  $R$  – радиус вращения точки на испытываемой поверхности, м;  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м;  $l$  – длина границы раздела между жидкостью и испытываемой поверхностью, м.

Выразив в уравнении (1) массу жидкости через ее объем  $V$  и плотность  $\rho$  ( $m = \rho \cdot V$ ), получим выражение для определения объема оставшейся

на исследуемой поверхности жидкости после выполнения процедуры центрифугирования

$$V = \frac{\alpha \cdot l}{\rho \cdot \omega^2 \cdot R}. \quad (2)$$

Из его анализа следует, что при неизменных параметрах  $\omega$  и  $R$  проведения процедуры центрифугирования и постоянных для данной жидкости значениях  $\rho$  и  $\alpha$ , емкость исследуемой поверхности  $V$  будет зависеть только от длины границы раздела между ней и жидкостью. В свою очередь, ее величина определяется микрорельефом исследуемой поверхности. Данное положение дает принципиальную возможность оценивать влияние параметров шероховатости поверхности, а следовательно, применяемых при их формировании методов и режимов обработки, на ее емкость при взаимодействии с той или иной жидкостью. Следует подчеркнуть, что предлагаемая методика позволяет производить только сравнительную оценку емкости данной поверхности по отношению к абсолютно гладкой, которой может служить полированная поверхность, обладающая минимальным значением емкости.

Предлагаемая методика определения емкости поверхности предусматривает последовательное выполнение следующих действий: измерение начальной массы образца  $m_1$  с исследуемой поверхностью, установка образца в приспособление для центрифугирования, нанесение на неподвижную исследуемую поверхность жидкости, выполнение процедуры центрифугирования образца, снятие образца и измерение его конечной массы  $m_2$ .

Приращение массы образца ( $\Delta m = m_1 - m_2$ ) соответствует массе жидкости, удержанной на его исследуемой поверхности. Зная плотность жидкости  $\rho$  и  $\Delta m$ , вычисляется ее объем  $V$ , который определяет емкость данной поверхности.

#### Образцы и аппаратные средства, примененные для реализации предложенной методики

При выборе формы и размеров образцов учитывались следующие обстоятельства. Во-первых, масса образца не должна превышать допустимое для применяемых весов значение, во-вторых, для удобства выполнения процедуры центрифугирования он должен иметь форму тела вращения, у которого исследуемая поверхность перпендику-

лярна оси симметрии и, в-третьих, форма и расположение этой поверхности на образце должны обеспечивать беспрепятственное удаление с нее жидкости в процессе центрифугирования.

В наибольшей степени указанным требованиям соответствует образец, конструктивное исполнение которого показано на рисунке 2,а, а фотография его общего вида представлена на рисунке 2,б.

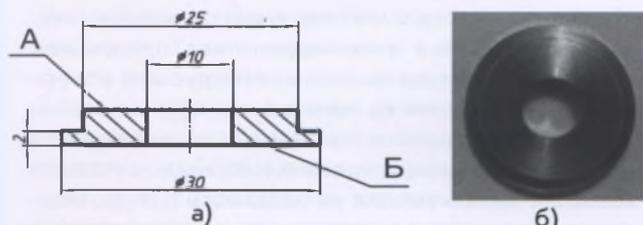


Рис. 2. Конструкция исследуемой поверхности образца металлического имплантата (а) и фотография его общего вида (б)

Выполнен он в виде плоской шайбы, имеющей две наружных цилиндрических поверхности различного диаметра и центральное отверстие. Торцевая поверхность Б и прилегающий к ней буртик служат для закрепления образца в приспособлении как при обработке (модификации) его рабочей (исследуемой) поверхности А, так и при выполнении процедуры центрифугирования. Рабочая поверхность представляет собой кольцеобразную дорожку шириной 7,5 мм и площадью номинальной поверхности, равной  $S = 412 \text{ мм}^2$ . Для принятых размеров масса стального образца не превышает 19г, что позволяет использовать для его взвешивания прецизионные весы, например, Ohaus, с верхним пределом измерения 180 г и ценой деления 100 нг.

На рисунке 3,а представлена схема, поясняющая процедуру проведения центрифугирования. Для ее выполнения используется электродвигатель постоянного тока 1 (ДМ-10-6А), установленный в вертикальном положении валом вверх. На нем неподвижно устанавливается оправка 2, в которой закрепляется предварительно взвешенный образец 3.

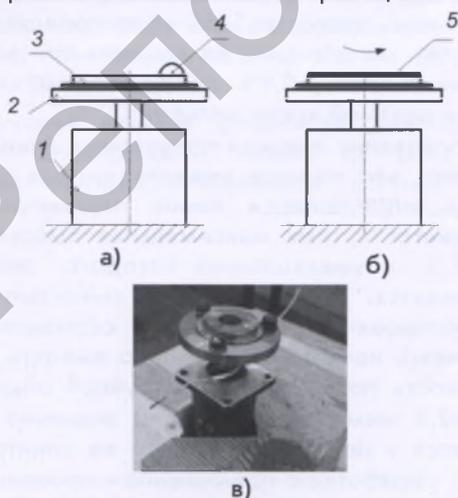


Рис.3. Схема центрифугирования (а, б) и фотография установки (в)

При выключенном электродвигателе с помощью пипетки на его исследуемую поверхность наносится капля жидкости 4. После этого включается электродвигатель с плавным, в течение 4 секунд, увеличением частоты вращения вала до значения 800 мин. По истечении 5 секунд работы двигателя на этой частоте он отключается, образец снимается с оправки и взвешивается. На рисунке 3,в представлена фотография общего вида созданного устройства для центрифугирования образцов. В результате выполнения этой процедуры излишки жидкости с исследуемой поверхности образца удаляются, а оставшаяся ее часть в виде тонкого слоя 5 задерживается на ней. Объем этой части жидкости характеризует емкость исследуемой поверхности, соответствующую данным условиям ее центрифугирования.

**Экспериментальное подтверждение практического использования разработанной методики оценки емкости поверхности**

С этой целью была проведена серия экспериментальных исследований по оценке влияния шероховатости поверхности образцов металлических имплантатов, полученной при различных способах и режимах обработки, на ее емкость при взаимодействии с водой, 0,9% физраствором хлорида натрия и плазмой крови человека. Образцы изготавливались из титанового сплава BT1-0 и нержавеющей стали 12X18H10T, т.е. из материалов, применяемых в производстве имплантатов. Предварительно их рабочие (исследуемые) поверхности обрабатывались с использованием различных методов, включая полирование, пескоструйную и электроконтактную обработку [4–6]. В результате последующего измерения их шероховатости определены численные значения ее параметров, соответствующие принятым методам и режимам обработки [7–9]. На основании этих данных и результатов проведенных по разработанной методике измерений установлена количественная связь между емкостью исследуемой поверхности образцов и технологией ее окончательной модификации, включая принятый метод и режимы обработки.

Исходя из анализа полученных экспериментальных данных, а также с учетом результатов предшествующих исследований [1], установлено, что емкость поверхности, в первую очередь, определяется таким параметром ее шероховатости, как максимальная высота профиля  $R_{\text{max}}$ . С учетом этого, на рисунке 4 представлены диаграммы зависимости емкости исследуемой поверхности образцов из титанового сплава и нержавеющей стали при ее взаимодействии с различными жидкостями от способа обработки с указанием соответствующего значения параметра шероховатости модифицированной поверхности. Электроконтактная обработка [7] осуществлялась при постоянном значении накопительного конденсатора  $U = 80 \text{ В}$ , но с использованием трех видов электродов-инс-

трументов (ЭИ), которые на рисунке 4 обозначены как роликовый ЭИ, лезвийный ЭИ и проволочный ЭИ.

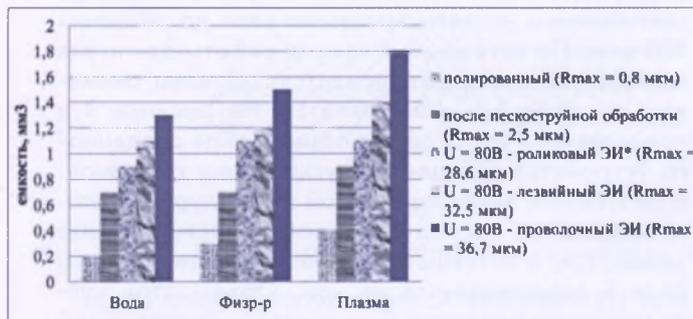


Рис.4. Зависимость емкости модифицированной поверхности образцов из стали 12X18H10T от способа обработки

Из анализа представленных данных следует, что во всех случаях наименьшей емкостью  $V$  обладает полированная поверхность образцов ( $R_{max} = 0,7$  мкм), что обусловлено минимальным значением длины границы раздела  $l$  между ней и жидкостью. В результате пескоструйной обработки исследуемой поверхности ( $R_{max} = 2,5$  мкм) за счет соответствующего увеличения параметра ее емкость возрастает. В условиях проводимых экспериментов наибольшее значение имеет поверхность, подвергнутая электроконтактной обработке ( $R_{max} = 36,7$  мкм) с использованием проволочного электрода инструмента.

Из полученных данных также следует, что, при прочих равных условиях, емкость поверхности зависит как от материала образца, так и вида взаимодействующей с ней жидкости. Так, по сравнению с титановой, поверхность из нержавеющей стали характеризуется более высоким значением емкости. Во всех случаях наименьшее значение  $V$  имеет поверхность при ее взаимодействии с водой, несколько большее – при взаимодействии с физраствором, а наибольшая емкость поверхности наблюдается при ее взаимодействии с плазмой крови человека. Такое положение объясняется различным значением коэффициента поверхностного натяжения  $\alpha$  у этих жидкостей, и чем он выше, тем больше оказывается значение емкости поверхности.

Таким образом, полученные экспериментальные данные в полной мере согласуются с теоретическими зависимостями, положенными в основу предложенной методики оценки емкости поверхности, что позволяет рекомендовать ее и разработанные аппаратные средства для практического использования.

**Выводы**

1. Исходя из критического анализа известных способов оценки емкости поверхности, в частности, ее маслосъемности, показано, что они, являясь косвенными (измерение толщины масляного пятна, получаемого на исследуемой поверхности в

результате раскатывания капли масла роликом, определение скорости самопроизвольного растекания масла между исследуемой поверхностью и прозрачной пленкой с отверстием, прижатой к ней), не позволяют определять этот параметр с достаточной для решения инженерных задач точностью, что связано с трудностями в обеспечении постоянных и воспроизводимых условий взаимодействия жидкости с исследуемой поверхностью.

2. Для устранения этих недостатков предложен способ определения емкости исследуемой поверхности, основанный на прямом измерении массы жидкости, оставшейся на ней после выполнения процедуры центрифугирования. Исходя из условия равенства действующих на жидкость центробежных сил, стремящихся удалить ее с вращающейся исследуемой поверхности в процессе выполнения этой процедуры, и сил поверхностного натяжения жидкости, за счет действия которых она удерживается на ней, теоретически обосновано, что, при прочих равных условиях, масса оставшейся на поверхности жидкости пропорциональна со значением длины границы раздела между ними, которая, в свою очередь, зависит от микрорельефа исследуемой поверхности, а следовательно, от параметров ее шероховатости.

3. Разработана методика сравнительной оценки влияния шероховатости исследуемой поверхности на ее емкость с использованием процедуры центрифугирования предварительно нанесенной на нее жидкости, включающая последовательность и условия выполнения необходимых действий, а также созданные для их осуществления аппаратные средства, включая конструкцию применяемых образцов и устройство для проведения процедуры центрифугирования.

4. С использованием разработанной методики и созданных аппаратных средств проведена серия экспериментальных исследований по оценке влияния шероховатости поверхности образцов металлических имплантатов (титановый сплав BT1-0 и нержавеющая сталь 12X18H10T), полученных после полирования, пескоструйной и электроконтактной обработки, на значение ее емкости при взаимодействии с водой, 0,9% физраствором хлорида натрия и плазмой крови человека.

5. На основании анализа полученных данных установлено, что емкость поверхности  $V$  в первую очередь определяется таким параметром ее шероховатости, как максимальная высота профиля  $R_{max}$ , с уменьшением которого значение  $V$  снижается. Так, наименьшей емкостью обладает полированная поверхность образцов ( $R_{max} = 0,7$  мкм), несколько большую емкость имеет поверхность после ее пескоструйной обработки ( $R_{max} = 2,5$  мкм), а наибольшее значение  $V$  наблюдается у поверхности после ее электроконтактной обработки с применением проволочного электрода-инструмента ( $R_{max} = 36,7$  мкм). Показано, что со снижением  $R_{max}$  уменьшается длина

границы раздела между исследуемой поверхностью и жидкостью, в результате чего величина сил поверхностного натяжения, удерживающих ее на поверхности в процессе центрифугирования, также уменьшается, обуславливая тем самым снижение емкости поверхности.

6. Установлено, что, при прочих равных условиях, емкость поверхности зависит от материала исследуемой поверхности и взаимодействующей с ней жидкости. Так, по сравнению с титановой, поверхность из нержавеющей стали характеризуется более высоким значением емкости. При этом наименьшая емкость поверхности наблюдается при ее взаимодействии с водой, затем по возрастающей идут физраствор и плазма крови человека. Показано, что наличие такой зависимости связано с различными значениями коэффициента поверхностного натяжения у этих жидкостей, и чем он выше, тем больше величина сил поверхностного натяжения, удерживающих жидкость на исследуемой поверхности при выполнении процедуры центрифугирования, а соответственно, и ее емкость.

7. Показано, что полученные экспериментальные данные полностью согласуются с теоретическими зависимостями, положенными в основу разработанной методики определения емкости поверхности, а поэтому она и созданные для ее осуществления аппаратные средства могут быть рекомендованы для практического использования.

*Список использованной литературы*

1. Кузнецов В.П., Дмитриева О.В. Моделирование и исследование формирования плосковершинного микрорельефа поверхностей трения со смазочными микрокарманами при многоцелевой обработке деталей. «Известия Томского политехнического университета». – 2011. – №2. – Томск.
2. Морозенко Б.Н., Проволоцкий А.Е., Андреев Б.И., Пасько Л.П. Определение маслостойкости поверхностей трения // Вестник машиностроения. – 1974. – №2. – С. 48–49.
3. Радионенко А.В. Способ определения маслостойкости поверхности трения. Патент SU 985549. Оpubл. 30.12.1982.
4. Изучение влияния физических методов обработки поверхности титана на рост колоний клеток-предшественников костной ткани.

Димитрович Д.А., Иванов В.А. – М.: «Прикладная физика». – 2009. – №2. – С.35–43.

5. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Борисов В.А. Применение электроконтактной виброударной обработки для модификации образцов титановых имплантатов. Сборник докладов международного симпозиума «Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка». – Мн.: 2011, С. 53–57.

6. Савич В.В. Модификация поверхности титановых имплантатов и ее влияние на их физико-химические и биомеханические параметры в биологических средах / В.В. Савич, Д.И. Сарока, М.Г. Киселев, М.Г. Макаренко; под научн. ред. В.В. Савича. – Мн.: «Беларуская навука». – 2012. – 244 с.

7. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Монич С.Г., Богдан П.С. Особенности формирования следов обработки на поверхности титанового образца при однократном электроконтактном воздействии на нее проволочным электродом-инструментом. «Наука и техника» – Мн. – 2013. – №2. – С. 29–35.

8. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Москаленко А.В., Богдан П.С., Монич С.Г. Теоретическое обоснование рациональных параметров режима электроконтактной обработки проволочного инструмента. «Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого». – Гомель. – 2012. – №3. – С. 3–10.

9. Киселев М.Г., П.О. Корзун, Т.П. Павич. Определение вида микрорельефа обработанной поверхности, обеспечивающего ее наибольшую площадь и объем при контактировании с жидкостью. «Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого». – 2009. – №4. – Гомель. – С. 40–52.

**Михаил Григорьевич Киселев**, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство приборов» приборостроительного факультета БНТУ;

**Алексей Владимирович Дроздов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и производство приборов» приборостроительного факультета БНТУ;

**Сергей Геннадьевич Монич**, аспирант кафедры «Конструирование и производство приборов» БНТУ

*Дата поступления 22.10.2013 г.*