

## **О возможности применения измерительного контроля адгезивных соединений электрорезистивными, электроемкостными и акустическим методами**

© Е.В. Масленникова, Е.В. Тумакова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Перечислены основные методы неразрушающего контроля клеевых соединений. Представлен оригинальный метод контроля сборки клеевых соединений. Выполнены расчеты переходного сопротивления и емкости клеевого шва. Предложена схема измерения склеенных металлических пластин. Проведен анализ результатов измерений склеенных металлических пластин и расчет относительной погрешности измерений.*

**Ключевые слова:** *клеевые соединения, контроль качества, методы контроля, неразрушающий контроль, электрорезистивные методы измерений, электроемкостные методы измерений.*

Долгое время считалось, что все клеевые соединения относятся к неразборным. Однако прогрессивное развитие клеевой индустрии, разработка новых технологий сборки клеевых соединений позволяют говорить как о необходимости значительной модернизации классификаций, отражающих современную действительность, так и о применении современных способов измерения клеевых соединений.

Контроль сборки клеевых соединений — один из обязательных этапов технологического процесса сборки. Методы и организационные формы контроля зависят от ответственности соединения, габаритов изделия, оснащенности и серийности производства.

Контроль качества склеивания неотвественных соединений осуществляют визуально. Ответственные соединения подвергают испытаниям, которые подразделяют на неразрушающие и разрушающие [1, 2].

При неразрушающих испытаниях в настоящее время наибольшее распространение нашли методы, основанные на применении радиоактивного и рентгеновского излучения, акустического и ультразвукового резонанса, электронной микроскопии, электронной эмиссии, инфракрасного и лазерного излучения, голографии, на измерении электросопротивления, диэлектрической проницаемости и теплопроводности.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан оригинальный метод контроля сборки клеевых соединений. На его основе создано экспериментальное устройство контроля клеевых соединений. Данный подход основан на использовании при контроле качества клеевого

соединения прецизионных электрорезистивных и электроемкостных методов измерений. С помощью данных методов можно определить наличие дефектов в клеевом шве.

Суть предлагаемого метода заключается в измерении переходного электрического сопротивления и емкости клеевого шва.

Расчет переходного сопротивления можно провести по формуле

$$R_{\text{п}}(S_k) = \rho C \frac{\sqrt{HB}}{P_k^b}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление, Ом · мм;  $C$  — коэффициент, зависящий от степени чистоты поверхности;  $HB$  — твердость поверхности по Бринеллю, кгс/мм<sup>2</sup>;  $P_k$  — контактное давление, кгс;  $b$  — показатель степени, зависящий от вида и формы зоны контактирования.

Более информативным параметром является емкость контакта. Поскольку поверхности склеиваемых деталей разделены клеем, являющимся диэлектриком, то можно говорить о конденсаторе, емкость которого для плоских деталей можно рассчитать по классической формуле:

$$C_k = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость клея;  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная, Ф/мм;  $S$  — площадь обкладок конденсатора, мм<sup>2</sup>;  $d$  — расстояние между обкладками, мм.

Если слой клея тонкий, то контакт происходит по микронеровностям, и можно использовать следующую формулу [3]:

$$C_{\text{п}} = \frac{5,82\varepsilon_0 \sqrt{r_{\text{пр}} F_k} (1-\mu)^2}{E_{\text{пр}} a_m^{1,5}} \times \left( 2\varepsilon_1 + 2\varepsilon_1 \frac{(h_m - a_m)^2}{a_m^2} + 4\varepsilon_1 h_m \left( \frac{0,5}{\sqrt{h_m - a_m + a_n}} + \frac{1}{\sqrt{a_m - a_n}} \right) \right), \quad (3)$$

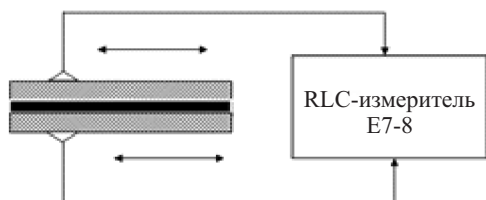
причем

$$r_{\text{пр}} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}; \quad F_k = \frac{\sin \Delta \alpha}{ab \cos \alpha_B \cos \alpha_a} S_k^2, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная, Ф/м;  $\varepsilon_1$  — относительная диэлектрическая проницаемость;  $r_{\text{пр}}$  — приведенный радиус неровностей, мм;  $F_k$  — контактное усилие на сопрягаемых поверхностях, кгс;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $E_{\text{пр}}$  — приведенный модуль Юнга,

кгс/мм<sup>2</sup>;  $h_m$  — максимальная высота выступов, мкм;  $a_m$  — максимальное внедрение выступов, мкм;  $a_n$  — минимальное внедрение выступов, мкм.

На рис. 1 приведена схема измерения склеенных металлических пластин. Измерения проводятся с помощью цифрового RLC-измерителя Е7-8. На практике могут быть использованы любые другие средства измерения сопротивления и емкости.



**Рис. 1.** Схема измерения сопротивления и емкости склеенных металлических пластин при контроле

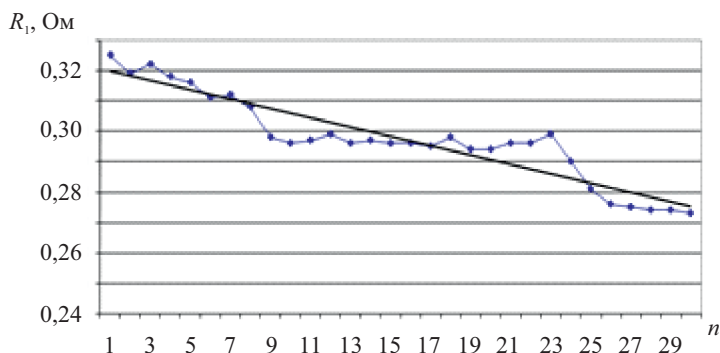
Особенностью измерений склеенных металлических пластин является выполнение требований к точности средств измерений, обеспечивающих получение необходимого результата. В общем случае можно рассчитать емкость соединения двух пластин, используя выражение (2), и по сути можно говорить о плоском конденсаторе. Тогда оценить площадь контакта можно с помощью выражения

$$S = \frac{dC_k}{\varepsilon \varepsilon_0}. \quad (5)$$

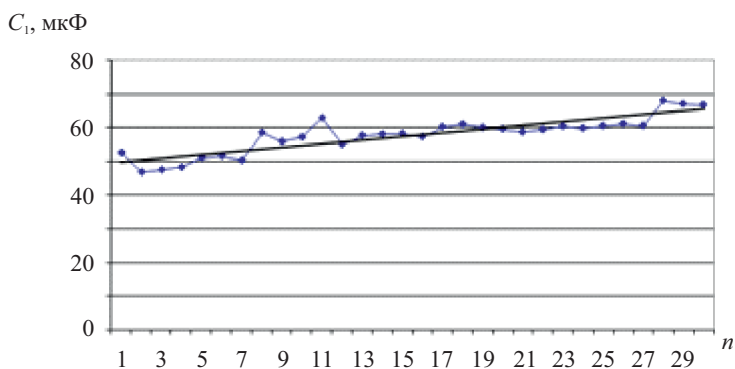
На рис. 2, 3 приведены результаты измерения сопротивления двух сопряженных пластин с различной толщиной и дефектностью до склеивания. На рисунках видно, что сопротивления и емкости неоднородны по всей поверхности, что свидетельствует о наличии пустот. Измерения цифровым RLC-измерителем Е7-8 представлены на рис. 4 и 5, где показаны сопротивления и емкости склеенных металлических пластин.

Результаты измерения клеевого соединения из плоских металлических пластин при принудительном формировании неполного заполнения клеевого шва показали чувствительность метода и высокую повторяемость результатов измерений. Суть эксперимента заключалась в измерении площади клеевого соединения с помощью микрометра с цифровым отсчетом 1-го класса точности (погрешность измерения  $\Delta_{СИ} \leq 1$  мкм) и оценке площади с помощью выражения (3). На рис. 6 показан результат многократных измерений. Следует отме-

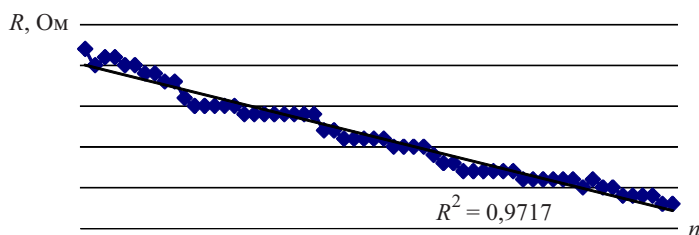
титель, что увеличение емкости связано с высокой чувствительностью метода и нестабильностью нормальных условий измерений, в первую очередь температуры и влажности.



**Рис. 2.** Результат измерения сопротивления двух сопряженных пластин с различной толщиной и дефектностью

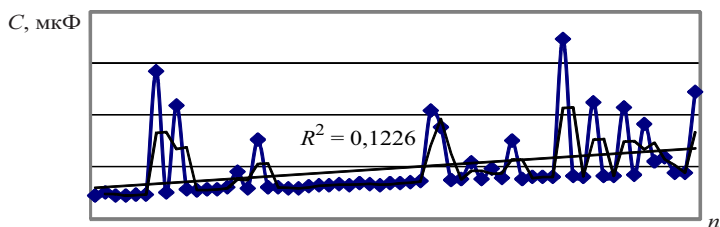


**Рис. 3.** Результат измерения емкости двух сопряженных пластин с различной толщиной и дефектностью



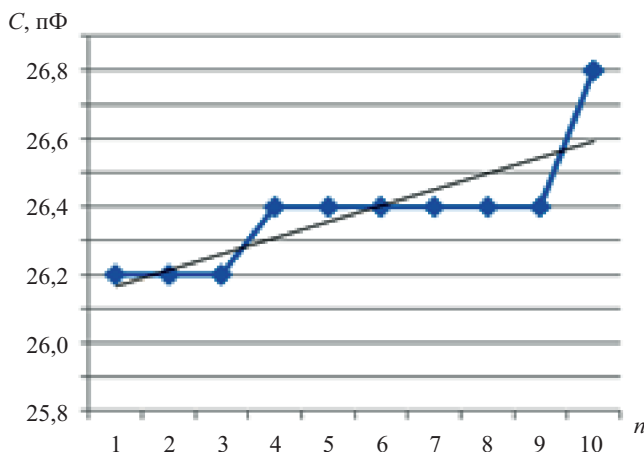
**Рис. 4.** Результат измерения сопротивления склеенных пластин с различной толщиной и дефектностью:

—◆— сопротивление  $R$ , Ом; — — — линейная зависимость сопротивления  $R$ , Ом,  
 $y = -0,0003x + 0,9053$



**Рис. 5.** Результат измерения емкости склеенных пластин с различной толщиной и дефектностью:

◆ — емкость  $C$ , мкФ; — — линейная зависимость емкости  $C$ , мкФ;  $y = 0,0065x + 1,2882$ ; — — линейные фильтры (емкость  $C$ , мкФ)



**Рис. 6.** Результат измерения емкости двух пластин постоянной толщины при неполном заполнении клевого шва:

◆ — емкость, пФ; — — линейная (емкость, пФ)

По результатам измерений (см. рис. 6) установлено следующее: среднее квадратичное отклонение полученных результатов  $C = 0,175$  пФ, среднее значение емкости  $C_k = 26,38$  пФ, толщина 1,85 мм. Оценка площади показала, что измеренное значение  $S = 1,408 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>, а расчетное, полученное из выражения (3),  $S = 1,40 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Относительная погрешность измерения не превысила значения 0,56 % [3, 4].

Относительная погрешность измерения площади контакта не более 0,6 %, что на порядок точнее существующих средств неразрушающего контроля, встраиваемых в автоматизированные линии. Такая погрешность измерения обеспечивает точность измерения дефекта клевого шва в пределах  $\pm(5 \dots 10)$  мм<sup>2</sup>.

*Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-06447а.  
Отдельные результаты поддержаны в рамках НИР 9.1265.2014/К  
по выполнению проектной части государственного задания  
в рамках научной деятельности.*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Игнатов А.В. Герметизация разъемных соединений термопластичными клеями. *Инженерный вестник*, 2012, № 10. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/479699.html> (дата обращения 11.05.2015).
- [2] Игнатов А.В. *Применение клеев при сборке изделий в машиностроении*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000, 43 с.
- [3] Игнатов А.В., Комшин А.С., Потапов К.Г., Масленникова Е.В. Особенности измерительного контроля сборки клеевых соединений электрорезистивными и электроемкостными методами. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2014, № 6, с. 13–18.
- [4] Тумакова Е.В. Применение метода акустических измерений к сэндвич-панелям, изготовленным с использованием метода инъекции длинного волокна. *Радиооптика*, 2015, № 1, с. 29–38.

Статья поступила в редакцию 09.10.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Масленникова Е.В., Тумакова Е.В. О возможности применения измерительного контроля адгезивных соединений электрорезистивными, электроемкостными и акустическим методами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/idme/1433.html>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на Восьмой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23–26 сентября 2015 г.*

**Масленникова Екатерина Викторовна** — аспирант кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: диагностика, контроль, клеевые соединения.  
e-mail: [maslennikova.ekaterina-1105@yandex.ru](mailto:maslennikova.ekaterina-1105@yandex.ru)

**Тумакова Екатерина Владимировна** — аспирант кафедра «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: диагностика, контроль, клеевые соединения, акустические измерения, теплоэнергетика.  
e-mail: [tumakova\\_ekaterina91@mail.ru](mailto:tumakova_ekaterina91@mail.ru)

## **On the possibility of the application of adhesive joints measuring control by electroresistive, electrocapacitive and acoustic methods**

© E.V. Maslennikova, E.V. Tumakova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article covers the basic methods of non-destructive testing of adhesive joints. It presents an original method for assembly control of adhesive joints. Calculations of transition resistance and capacitance of the adhesive joint have been carried out. We suggest a scheme for measuring glued metal plates. An analysis of the results of glued metal plates measurements and calculation of relative measurement error are shown.*

**Keywords:** *adhesive joints, quality control, control methods, non-destructive testing, electroresistive measuring methods, electrocapacitive measuring methods.*

### REFERENCES

- [1] Ignatov A.V. *Inzhenernyy vestnik — Engineering Bulletin*, 2012, no. 10. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/479699.html> (accessed May 11, 2015).
- [2] Ignatov A.V. *Primeneniye kleyev pri sborke izdeliy v mashinostroyenii* [The use of adhesives when assembling products for engineering industry]. Moscow, BMSTU Publ., 2000, 43 p.
- [3] Ignatov A.V., Komshin A.C., Potapov K.G., Maslennikova E.V. *Vse Materialy. Entsiklopedicheskiy Spravochnik Journal*, 2014, no. 6, pp. 13–18.
- [4] Tumakova E.V. *Radiooptika — Radiooptics*, 2015, no. 1, pp. 29–38.

**Maslennikova E.V.**, postgraduate student of the Metrology and Interchangeability Department at Bauman Moscow State Technical University. Sphere of research activity: diagnostics and testing, control, adhesive joints. e-mail: [maslennikova.ekaterina-1105@yandex.ru](mailto:maslennikova.ekaterina-1105@yandex.ru)

**Tumakova E.V.**, postgraduate student of the Metrology and Interchangeability Department at Bauman Moscow State Technical University. Sphere of research activity: diagnostics and testing, control, adhesive joints, acoustic measuring methods, heat and power engineering. e-mail: [tumakova\\_ekaterina91@mail.ru](mailto:tumakova_ekaterina91@mail.ru)