

---

---

# ЛАЗЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА МАТЕРИАЛЫ

---

---

УДК 535: 621.373.826:539

А. В. БЕЛИКОВ, А. Е. ПУШКАРЁВА, А. В. СКРИПНИК,  
Т. В. СТРУНИНА, К. В. ШАТИЛОВА

## ЛАЗЕРНОЕ ТЕКСТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ МАТЕРИАЛОВ

Предложен метод лазерного текстурирования поверхности твердого материала в целях повышения его адгезии к полимерам. Показано, что лазерное текстурирование способствует увеличению усилий на сдвиг практически в 3 раза.

*Ключевые слова:* YAG:Er-лазер, лазерное текстурирование, адгезия, эмаль, полимер.

**Введение.** Создание новых и совершенствование существующих методов соединения материалов крайне актуально для широкого круга технологий. Механическая прочность соединений определяется как степенью адгезии, так и площадью адгезионного контакта.

Различают несколько механизмов адгезии [1]. Согласно молекулярному (адсорбционному) механизму адгезия возникает под действием межмолекулярных вандерваальсовых сил и водородных связей. Для такой адгезии применимо известное правило сходства веществ по полярности, а именно: чем ближе по полярности адгезив и субстрат, тем более прочен контакт между ними. Электрическая теория связывает адгезию с возникновением двойного электрического слоя на границе раздела между адгезивом и субстратом. Отслаивание, как и раздвижение, обкладок конденсатора вызывает увеличение разности электрических потенциалов, что обуславливает прочность адгезионного контакта. Диффузионный механизм адгезии предусматривает взаимное проникновение молекул и атомов в поверхностные слои взаимодействующих фаз. Процесс диффузии приводит, можно сказать, к размыванию границы раздела фаз, взаимному их растворению в местах контакта. Отдельно выделяется механизм, обусловленный химическим взаимодействием при адгезии. В конкретных условиях может преобладать один из механизмов, чаще же механизм адгезии является смешанным.

В настоящей статье предлагается новый способ повышения механической прочности соединения материалов. Суть этого способа заключается в увеличении площади соприкосновения материалов адгезива и субстрата за счет создания с помощью лазерного излучения на поверхности твердого материала текстур, представляющих собой последовательность микродефектов. Теоретически показано, как прочность соединения при постоянной адгезии зависит от размера формируемых дефектов и расстояния между их центрами.

В ходе экспериментальных исследований были созданы текстуры на поверхности эмали. Для этого применялось излучение YAG:Er-лазера, работающего в режиме основной поперечной моды. В качестве адгезива использовался светополимеризующийся стоматологический пломбировочный материал. Прочность сформированного соединения измерялась в условиях, когда прикладываются усилия на сдвиг [2, 3].

**Описание метода.** Работа адгезии  $W_a$ , характеризующая прочность адгезионной связи, определяется работой обратимого разрыва адгезионной связи, отнесенной к единице площади. Полная работа адгезии  $W$ , приходящаяся на всю площадь  $S$  контакта тел, равна  $W = W_a S$ . Отношение полной работы адгезии в случае модифицированной поверхности ( $W_{s_1}$ ) к полной работе адгезии в случае гладкой поверхности ( $W_s$ ) выражается уравнением

$$\frac{W_{s_1}}{W_s} = \frac{S_1}{S}, \quad (1)$$

где  $S_1$  — площадь модифицированной (текстурированной) поверхности.

Гладкая поверхность имеет форму квадрата со стороной  $X$  (рис. 1, а).

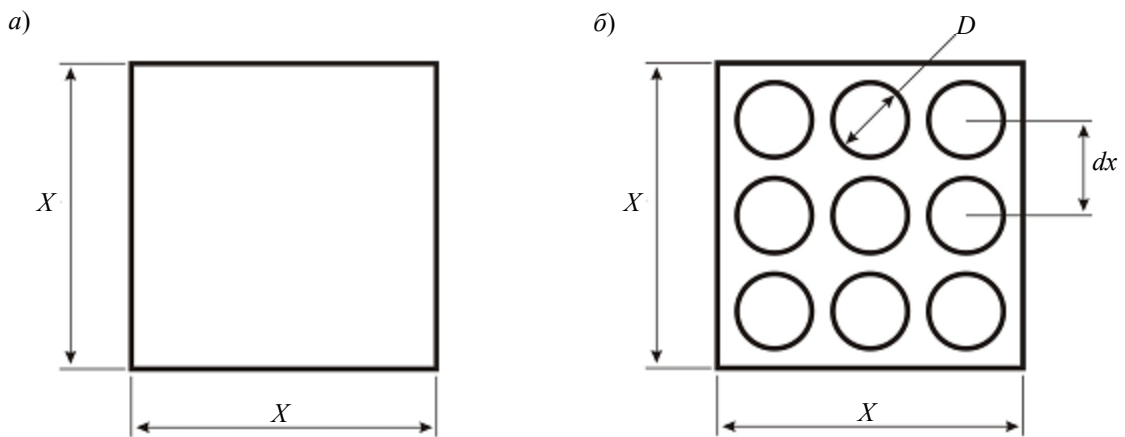


Рис. 1

Текстурированную поверхность можно представить в виде суперпозиции гладкой поверхности и поверхности с микродефектами, представляющими собой полусферы диаметром  $D$ , расстояние между центрами которых равно  $dx$  (рис. 1, б). Площадь такой поверхности

$$S_1 = S_{\text{sph}} + S_0,$$

здесь  $S_{\text{sph}}$  — площадь поверхностей всех полусфер,  $S_0$  — площадь оставшейся ровной поверхности; величина  $S_{\text{sph}} = S_{\text{sph}i} \cdot N$ , где  $S_{\text{sph}i} = 0,5\pi D^2$  — площадь поверхности одной полусферы,  $N$  — их количество. Максимальное количество полусфер, которое можно без перекрытия разместить на поверхности, имеющей форму квадрата, равно

$$N_{\text{max}} = \left(\frac{X}{dx}\right)^2.$$

Таким образом, полная площадь модифицированной поверхности, при условии, что полусферы не перекрываются, определяется как

$$S_1 = S_{\text{sph}} + S_0 = 0,5\pi D^2 \left(\frac{X}{dx}\right)^2 + X^2 - 0,25\pi D^2 \left(\frac{X}{dx}\right)^2 = 0,25\pi D^2 \left(\frac{X}{dx}\right)^2 + X^2.$$

В этом случае отношение полных работ адгезии для модифицированной и гладкой поверхностей характеризуется выражением

$$\frac{W_{s_1}}{W_s} = \frac{S_1}{S} = \frac{0,25\pi D^2 \left(\frac{X}{dx}\right)^2 + X^2}{X^2} = \frac{0,25\pi D^2}{dx^2} + 1. \quad (2)$$

В эксперименте в качестве объекта исследования были использованы зубы человека (принадлежащие людям возрастной категории 25—40 лет), удаленные по показаниям заболеваний пародонта. Для поддержания естественных свойств образцы хранились в 0,1%-ном

водном растворе тимола при температуре около 4 °С не более двух недель в защищенном от света месте. Для создания микродефектов использовался одномодовый YAG:Er-лазер с длиной волны излучения 2,94 мкм, работающий в режиме свободной генерации. Энергия излучения в зоне обработки составила 1,0 мДж ( $\pm 3,5\%$ ), длительность лазерного импульса по полувысоте 100 мкс ( $\pm 10\%$ ). Воздействие проводилось в неконтактном режиме. Поверхность эмали коронки зуба позиционировалась в фокусе собирающей линзы с фокусным расстоянием  $38,0 \pm 0,1$  мм, зуб перемещался в двух взаимно ортогональных направлениях при помощи сканера в плоскости, перпендикулярной направлению оптической оси линзы.

Под действием одиночного лазерного импульса на поверхности эмали формировался микродефект диаметром  $D \approx 100$  мкм. Посредством смещения зуба в перерывах между лазерными импульсами на расстояние  $dx = 100$  мкм формировалась текстура, представляющая собой квадрат со стороной  $X = 2$  мм. На поверхность, содержащую текстуру, наносился пломбировочный материал “Revolution” (фирмы “Kerr”, США), который полимеризовался с помощью потока света, создаваемого источником “Allegro™ Rembrandt®”, в течение 30 с. В качестве стандартной использовалась технология, при которой на гладкую поверхность эмали сначала наносится состав “Nano-Bond Self-Etch Primer”, затем адгезив “Nano-Bond Adhesive” и далее материал “Revolution” с последующей его полимеризацией.

Всего в ходе эксперимента было исследовано 10 образцов эмали, обработанных по стандартной методике, и 10 образцов эмали, подвергнутых лазерному текстурированию. В обоих случаях в объем материала “Revolution” помещались штифты из конструкционной стали, с помощью которых производилась фиксация образцов в устройстве РМУ-0,05-1, предназначенном для измерения разрывного усилия на сдвиг.

**Результаты.** На рис. 2 представлен график полученной из выражения (2) зависимости отношения полных работ адгезии от размеров и взаимного расположения микродефектов в текстуре. Как видно из графика, при фиксированном расстоянии между центрами микродефектов в текстуре адгезия тем выше, чем больше диаметр полусферы.

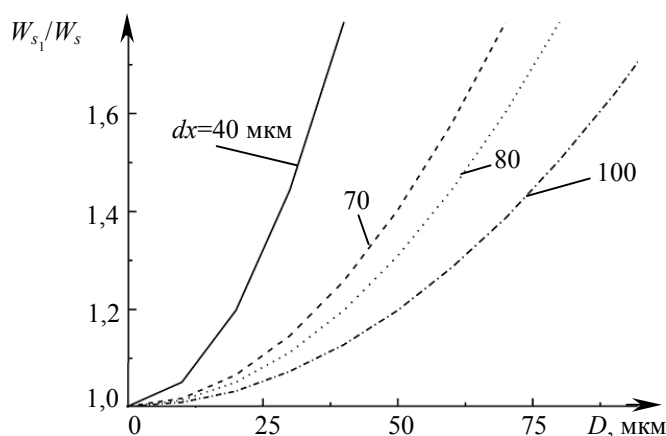


Рис. 2

Следует отметить, что при фиксированном размере ( $X$ ) текстурированной поверхности с уменьшением диаметра  $D$  полусфер возрастает количество микродефектов, что увеличивает затраты лазерной энергии, необходимые для формирования текстуры.

Выбор диаметра микродефекта зависит от многих факторов. Непременным требованием в ряде случаев является минимизация диаметра.

К недостаткам предложенной модели расчета отношения  $W_{s1}/W_s$  следует отнести то, что при ее использовании не учитывается влияние на прочность соединения микрорельефа, возникающего на поверхности микродефектов. Характерные размеры элементов этого рельефа могут быть сопоставимы с размерами структурных элементов обрабатываемого материала [4], что

способствует увеличению адгезии не за счет механических эффектов, а вследствие межмолекулярного взаимодействия.

Внешний вид текстур, сформированных лазерным излучением на поверхности зубной эмали, продемонстрирован на рис. 3.

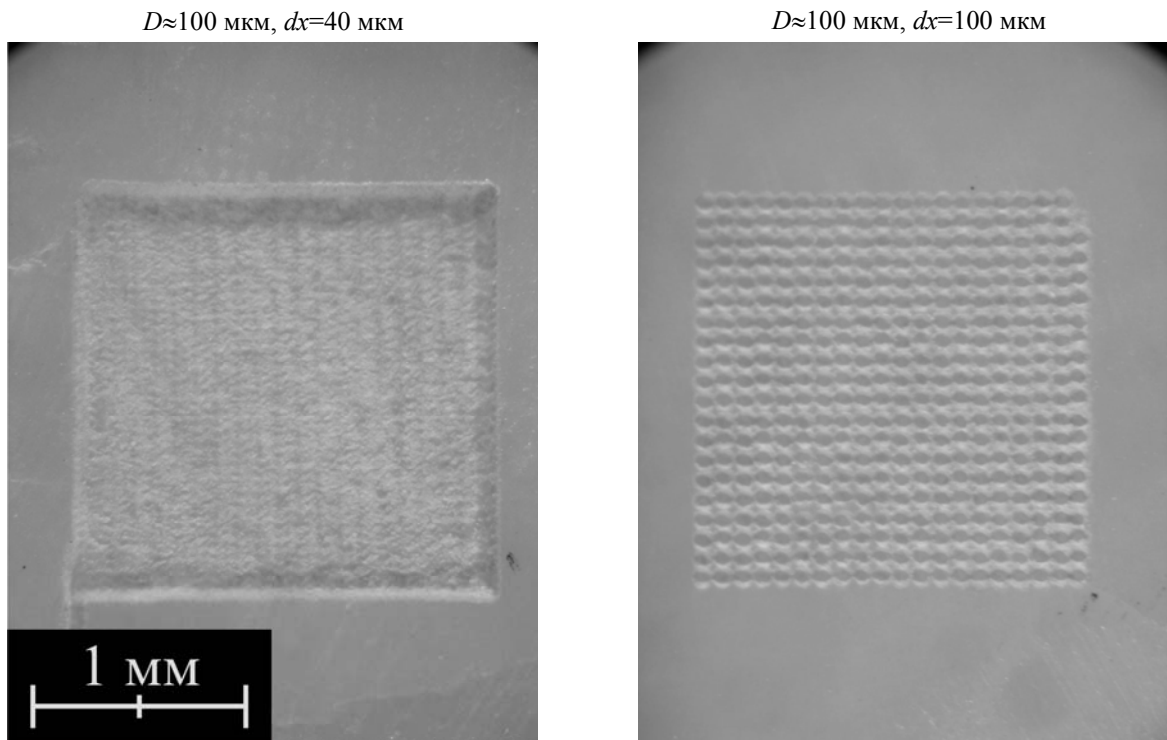


Рис. 3

На рис. 4 представлены результаты измерений прочности на сдвиг ( $P$ ) соединений эмали зуба и пломбировочного материала “Revolution”, образованных в рамках применения стандартной технологии к химически модифицированной поверхности (I) и новой технологии к поверхности (II), содержащей текстуру, сформированную излучением YAG:Er-лазера при  $D \approx 100 \text{ мкм}$  и  $dx = 100 \text{ мкм}$ .

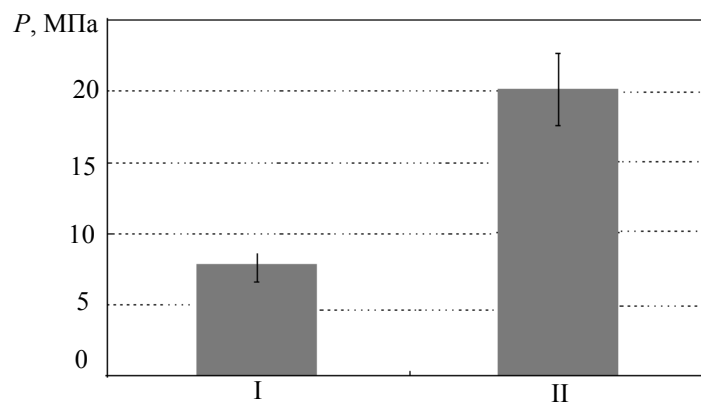


Рис. 4

Рассмотренный в статье новый способ повышения механической прочности соединений материалов и подготовки поверхности перед нанесением на нее полимера демонстрирует, прежде всего, следующее: прочность соединения материала “Revolution” с поверхностью, содержащей сформированную лазерным излучением текстуру, практически в 3 раза выше, чем с немодифицированной поверхностью. В рамках предложенной геометрической модели текстуры показано, что увеличение адгезии только за счет механических эффектов способствует

ее росту лишь в 1,8 раза. Данное противоречие свидетельствует о существовании дополнительных механизмов повышения адгезии, к числу которых могут быть отнесены, например, механизмы, связанные с вовлечением сил межмолекулярного взаимодействия или с особенностями поверхности микродефектов, создаваемых лазерным излучением.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлин А. А., Басин В. Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1974.
2. Gardner A. K., Staninec M., Fried D. The influence of surface roughness on the bond strength of composite to dental hard tissues after Er:YAG-laser irradiation // SPIE. 2005. Vol. 5687.
3. Le Ch. Q., Staninec M., Fried D. The influence of pulse duration on the bond strength of dentin to composite after Er:YAG-laser irradiation // SPIE. 2005. Vol. 5687.
4. Keller U., Hibst R. Experimental studies of the application of the Er:YAG-laser on dental hard substances: II. Light microscopic and SEM investigations // Lasers in Surgery and Medicine. 1989. Vol. 9. P. 9345—9351.

*Сведения об авторах*

- Андрей Вячеславович Беликов** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;  
E-mail: meddv@grv.ifmo.ru
- Александра Евгеньевна Пушкарёва** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;  
E-mail: alpushkareva@yandex.ru
- Алексей Владимирович Скрипник** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;  
E-mail: meddv@grv.ifmo.ru
- Татьяна Валерьевна Струнина** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; инженер;  
E-mail: struninatatiana@mail.ru
- Ксения Владимировна Шатилова** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;  
E-mail: kshatilova@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
лазерной техники  
и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию  
07.12.09 г.