

УДК 621.9.02

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
АБРАЗИВОСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ  
НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ  
НА ИХ АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ**

**М. И. МИХАЙЛОВ, З. Я. ШАБАКАЕВА, А. А. КАРПОВ,  
К. М. МИХАЙЛОВ, Е. В. ДЕМЧУК**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** композиционные материалы, покрытия, адгезионная прочность.

**Введение**

Рост требований к эксплуатационным характеристикам полимерных материалов, расширение области их применения, необходимость в снижении производственных расходов и энергетических затрат на их получение и переработку, улучшение качества продукции и исключение загрязнения окружающей среды выдвигает на первый план изыскание эффективных путей создания новых композиционных полимерных материалов. Введение в основной полимерный состав из эпоксидных смол различных наполнителей позволяет получать множество композиций. Значительное расширение ассортимента полимерных материалов, получаемых на основе эпоксидных смол, и повышение эксплуатационных характеристик готовых изделий приводят, соответственно, и к расширению областей их применения. В этом аспекте большой интерес представляют возможности модификации полимерных композиций различного рода абразивосодержащими наполнителями при различном количественном их соотношении [1]–[6].

Целью данного исследования является изучение влияния параметров абразивосодержащих покрытий на основе эпоксидных смол на их адгезионную прочность.

**Постановка задачи и методика исследования**

Исследование адгезионных свойств материала композиционного покрытия проводим в двух сериях экспериментов. Первая серия экспериментов проводилась при прикладывании разрывной (растягивающей) нагрузки. Вторая серия экспериментов проводилась при прикладывании сдвигающей (касательной) нагрузки.

Проведение исследования по определению адгезионных свойств композиционного материала в зависимости от содержания эпоксидной смолы и наполнителя осуществлялось с применением ротатбельных планов второго порядка [7]. В качестве наполнителя использовался электрокорунд белый. В качестве варьируемых параметров принимались: содержание эпоксидной смолы; содержание наполнителя и его зернистость (содержание отвердителя для эпоксидной смолы принимается в зависимости от содержания самой смолы в соотношении 1:10) (табл. 1). Центральный ротатбельный план второго порядка составлялся по известной методике полного факторного эксперимента типа  $k = 2^3$ , шести опытов в «звездных точках» и шести опытов в центре плана. Величина «звездного плеча» состави-

ла 1,682. Согласно плану эксперимента было проведено 20 опытов. Каждый опыт повторялся четыре раза.

Для дополнительной оценки адекватности исследований было изготовлено по четыре образца каждого состава. Эскизы образцов представлены на рис. 1. Образцы изготавливались из конструкционной стали 45. Размеры образцов: диаметр 12 мм, толщина слоя покрытия 0,1 мм. Поверхности образцов, на которые наносилось покрытие, подвергались шлифованию. Перед нанесением покрытия поверхности обезжиривались. Изготовленные образцы подвергались нагружению со скоростью 50 Н/с. Растяжение производилось от нуля до определенной нагрузки, которую выдерживал образец до окончательного разрыва.

Таблица 1

Компоненты композиционного материала покрытий

Уровни варьирования параметров	Независимые переменные		
	Эпоксидная смола $P$ , мас. ч	Наполнитель $N$ , мас. ч	Зернистость наполнителя $S$ , мм
+1,682	11,682	4,682	1,60
+1,00	11,0	4,0	1,20
0,00	10,0	3,0	0,80
-1,00	9,0	2,0	0,40
-1,682	8,318	1,318	0,04

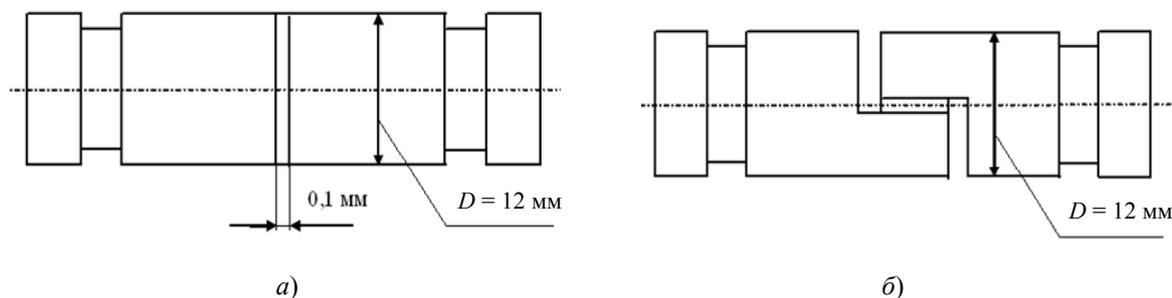


Рис. 1. Эскизы образцов для испытания композиционного материала на адгезию:  
а – при отрыве; б – при сдвиге

В качестве математической модели было выбрано уравнение второго порядка следующего вида [7]:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_{12} X_1 X_2 + a_{13} X_1 X_3 + a_{23} X_2 X_3 + a_{11} X_1^2 + a_{22} X_2^2 + a_{33} X_3^2.$$

### Результаты эксперимента

По данным результатов исследования составлялись таблицы, в которые заносили максимальную нагрузку для каждого состава, максимальную величину перемещений образцов и предельные напряжения адгезионной прочности (табл. 2 и 3). В этих таблицах перемещения образцов, максимальные нагрузки и адгезионная прочность имеют средние значения для четырех образцов каждого состава.

Таблица 2

Данные исследования образцов композиционного материала на разрыв

Номер опыта (состава)	Максимальная нагрузка, Н	Максимальное перемещение при растяжении, мм	Напряжение, МПа
1	1155	0,08	90,3
2	1090	0,09	85,2
3	1693	0,09	132,3
4	1779	0,09	139,4
5	1090	0,08	85,2
6	1135	0,09	88,7
7	1681	0,08	131,3
8	1735	0,09	135,6
9	936	0,09	73,2
10	1459	0,09	114,8
11	1342	0,08	104,9
12	1672	0,08	130,7
13	1510	0,09	118,2
14	1356	0,09	106,1

Анализ приведенных в табл. 2 данных позволяет заключить, что изменение параметров от минимальных значений (опыт № 8) до максимальных (опыт № 1) приводит к уменьшению максимальной нагрузки в 1,57 раза и максимальных перемещений – в 1,125 раза.

Таблица 3

Данные исследования образцов композиционного материала на сдвиг

Номер опыта (составов)	Максимальная нагрузка, Н	Максимальное перемещение при сдвиге, мм	Напряжение, МПа
1	1864,5	0,1	124,3
2	1930,5	0,09	128,7
3	2377,5	0,09	158,5
4	2299,5	0,09	153,3
5	1836,0	0,1	122,4
6	1927,5	0,09	128,5
7	2037,0	0,09	135,8
8	2079,0	0,1	138,6
9	1579,5	0,09	105,3
10	2140,5	0,1	142,7
11	2112,0	0,1	140,8
12	2257,5	0,09	150,5
13	2071,5	0,09	138,1
14	1710,5	0,1	140,4

Анализ приведенных в табл. 3 данных позволяет заключить, что изменение параметров от минимальных значений (опыт № 8) до максимальных (опыт № 1) приводит к уменьшению максимальной нагрузки в 1,12 раза и не влияет на максимальные относительные перемещения.

Полученная в результате обработки данных табл. 2 математическая модель представляет собой следующее выражение:

$$\sigma_{\text{отр}} = 56,7 - 2,8P - 5,9N + 16,4S + 22,4PN - 10,1PS + 51,2NS - 23,2S^2.$$

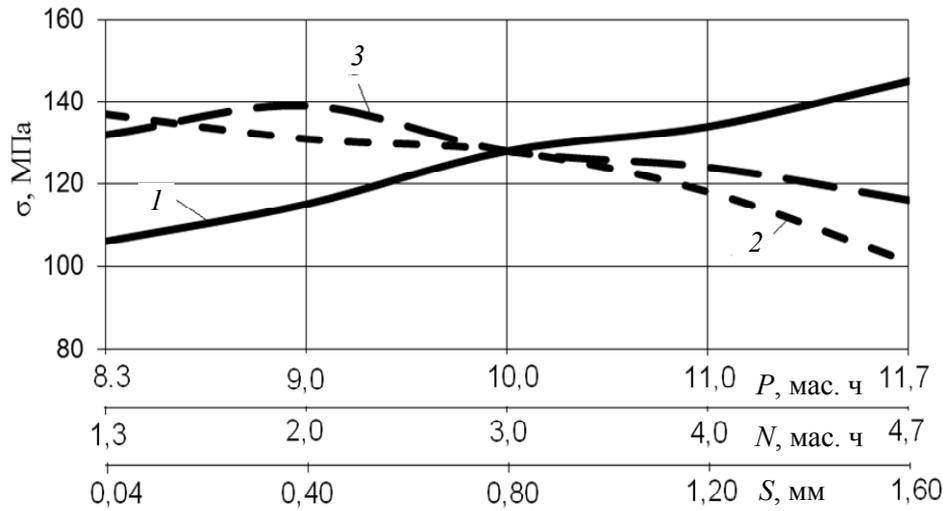


Рис. 2. Графики влияния на адгезию при отрыве параметров эксперимента:

1 – эпоксидной смолы; 2 – наполнителя;

3 – зернистости абразива

Математическая модель для адгезионной прочности на сдвиг представляет собой следующее выражение:

$$\sigma_{\text{сдв}} = 69,5 - 5,9P + 2,8N - 6,2S - 7,3PN - 10,3PS + 4,9NS - 13,5S^2.$$

Анализ результатов, представленных на рис. 2 и 3, позволяет заключить, что содержание эпоксидной смолы влияет неоднозначно на адгезию отрыва и сдвига. Так, при увеличении содержания эпоксидной смолы в составе композиционного покрытия в 1,4 раза адгезионная прочность на отрыв возрастает в 1,38 раза, а адгезия на сдвиг снижается в 1,23 раза. При увеличении содержания наполнителя в 3,6 раза адгезионная прочность на отрыв уменьшается в 1,35 раза, а прочность на сдвиг возрастает в 1,32 раза.

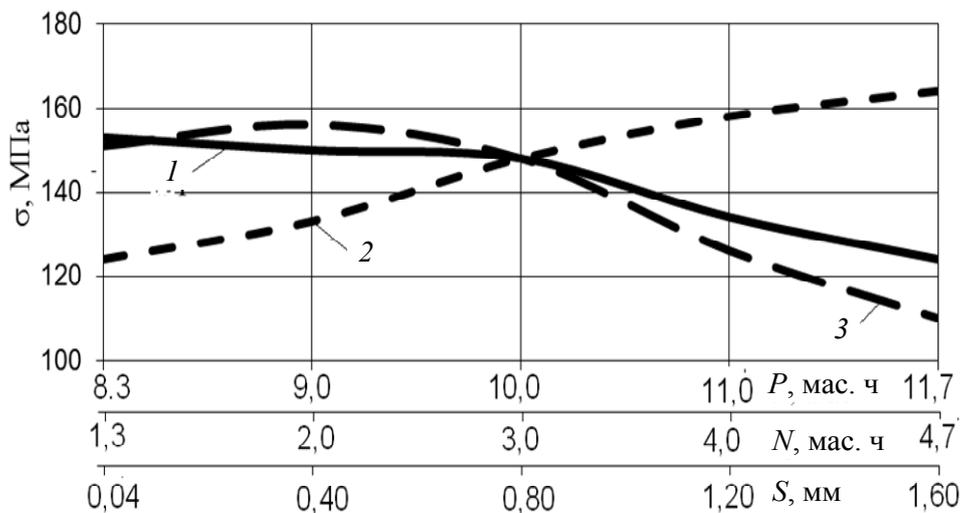


Рис. 3. Графики влияния на адгезию при сдвиге параметров эксперимента:

1 – эпоксидной смолы; 2 – наполнителя;

3 – зернистости абразива

### Заключение

Разработана методика анализа качества контактирующих поверхностей и состава покрытия на основе эпоксидных смол с абразивным наполнителем, позволяющая оптимизировать составы композиционных материалов.

Установлено влияние содержания эпоксидной смолы, абразивного наполнителя и его зернистости на адгезионную прочность на отрыв и сдвиг.

### Литература

1. Лапицкий, В. А. Физико-механические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков / В. А. Лапицкий, А. А. Крицук. – К. : Навук. думка, 1986. – 96 с.
2. Липатов, Ю. С. Физико-химические основы наполнения полимеров / Ю. С. Липатов. – М. : Химия, 1991. – 260 с.
3. Фрикционные композиты на основе полимеров / А. К. Погосян [и др]. – Минск : Информтрибо, 1992. – 218 с.
4. Чернин, И. З. Эпоксидные полимеры и композиции / И. З. Чернин, Ф. М. Смехов, Ю. В. Хирдов. – М. : Машиностроение, 1989. – 256 с.
5. Михайлов, М. И. Оптимизация состава фрикционного покрытия твердосплавных пластин сборного инструмента / М. И. Михайлов, З. Я. Шабакаева // Материалы, технологии, инструмент. – 1996. – № 3. – С. 28–30.
6. Белоцерковский, М. А. Анализ особенностей полимерных порошковых композиционных покрытий / М. А. Белоцерковский, И. В. Макаревич // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2017. – С. 28–30.
7. Тихомиров, В. Б. Математические методы планирования эксперимента при изучении нетканых материалов / В. Б. Тихомиров. – М. : Легкая индустрия, 1968. – 155 с.

*Получено 31.08.2017 г.*