

Разработка программного обеспечения для расчета режимов формирования функциональных покрытий с заданной адгезией (на примере покрытия на основе полиизобутилена)

Н.М. Антонова, В.В. Василевич

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им.
М.И. Платова, Новочеркасск*

Аннотация: Представлены результаты исследования адгезии разделительных покрытий на основе полиизобутилена к металлическим поверхностям. В среде Microsoft Visual Studio, на языке C++ разработано программное обеспечение, позволяющее производить расчет состава и эффективных технологических режимов формирования покрытия, обеспечивающих его наилучшую адгезию к защищаемым поверхностям. В качестве примера продемонстрирован порядок расчета соотношений: состав-температура-время формирования покрытий, обеспечивающих наиболее высокую адгезию, равную «нуль» баллов по шестибальной шкале надрезов. Показано, что применение программы позволяет производить оценку параметров формирования покрытия за время порядка 1-2 секунды. Результаты расчета подтверждены экспериментально. Методами оптической микроскопии исследована морфология покрытия. Выявлено, что в местах пересечения надрезов и областях решетки отслоений не наблюдается.

Ключевые слова: покрытие, адгезия, микроструктура, метод надрезов, полиизобутилен, оптимизация.

Введение

Функциональные защитные покрытия реализуют свои заданные свойства при наличии высокой адгезии к защищаемым поверхностям. Поведение полимерных покрытий, изготавливаемых из растворов, в значительной мере зависит от реологии жидких исходных систем. Так, для разделительных полимерных покрытий на основе синтетических каучуков, применяемых для защиты металлической оснастки при формировании композиционных изделий, их сплошность и адгезия к поверхности обусловлены жизнеспособностью исходных растворов. Вязкость жидких смазок, например, Пенты-100, возрастает к концу срока, регламентированного изготовителем, что приводит к формированию неоднородной поверхностной пленки и уменьшению адгезии покрытия [1]. Смазка на основе полиизобутилена (ПИБ) также относится к синтетическим каучукам, но отличается большей реологической стабильностью и образует тонкую

сплошную защитную пленку на металлических поверхностях [2], выполняя барьерную функцию для влаги [3]. Анализ доступных литературных источников показал, что полиизобутилен востребован в композитах и смазочных материалах как клеевой компонент с хорошими механическими свойствами [4, 5]. Добавление полимера в состав покрытий повышает их адгезионную прочность [6, 7]. Следует отметить, что каучуки, резина – в виде активированной крошки [8], повышают износостойкость, долговечность дорожных покрытий.

В настоящей исследовании выявляли возможность получения разделительного покрытия на основе полиизобутилена, обладающего высокой адгезией к металлической оснастке, для защиты оснастки при формировании композиционных изделий. В ходе работы выяснилось, что нахождение экстремумов функции многих переменных для полученных зависимостей не всегда целесообразно, на практике интерес представляют промежуточные решения, что связано с поиском более целесообразных технологических режимов и экономии полимерного сырья. Поэтому необходимо было разработать программу, позволяющую получить «удобные» решения, реализуемые в условиях предприятия.

Цель работы – установить взаимосвязь адгезии покрытий на основе полиизобутилена с условиями формирования покрытий и разработать программу, позволяющую рассчитать оптимальные сочетания факторов, обеспечивающих высокую адгезию.

Материалы и методики исследований

Анализ литературных источников показал, что хорошими растворителями для высокомолекулярного полиизобутилена являются растворители на основе нефти. Предварительные исследования выявили, что использованный в работе полиизобутилен марки П-200 хорошо растворяется в нефрасе. Поэтому растворителем для полимера служил нефрас С 50/170,

который использовали для приготовления рабочих растворов для изготовления покрытий. Раствор наносили на стальные пластинки (40X) в два слоя и сушили каждый слой на воздухе 15 минут при температуре $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$. Далее покрытия выдерживали при заданных режимах в термошкафе. Схема формирования покрытий приведена на рис. 1.



Рис. 1.– Схема формирования покрытия на основе полиизобутилена

Таблица № 1

Области и уровни исследования переменных в эксперименте

Факторы	ПИБ, %	Полимеризация покрытия	
		$T, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{мин}$
Основной уровень	2,0	80,0	300
Уровни исследования:			
(+1)	2,7	94,0	343
(-1)	1,3	66,0	257
Звездное плечо:			
(+1,4)	3,0	100,0	360
(-1,4)	1,0	60,0	240

В работе использовали метод математического планирования эксперимента. Выявляли влияние содержания полиизобутилена в нефрасе, температуры полимеризации и времени выдержки покрытия (x_1, x_2, x_3 -

безразмерные переменные) на адгезию покрытия (Y_A). Условия проведения эксперимента приведены в таблице 1.

Адгезию оценивали по ГОСТ 31149-2014, методом решетчатых надрезов. Микроструктуру сформированных покрытий исследовали с помощью оптической микроскопии. Использовали микроскоп для металлографии ADFU300 КТИ (филиала) ЮРГПУ (НПИ) имени М. И. Платова).

Результаты и обсуждение

Статистическая обработка данных позволила получить следующее адекватное уравнение регрессии, в безразмерных переменных:

$$y_A = 1,85 - 0,37 \cdot x_2 + 0,49 \cdot x_3 - 0,63 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,62 \cdot x_2 \cdot x_3.$$

Адекватность проверяли по критерию Фишера (расчетное и табличное значения равны 3,0 и 8,6), значимость коэффициентов – по критерию Стьюдента. В качестве примера на рис. 2. приведены поверхности отклика величины адгезии на изменение исследуемых факторов в эксперименте.

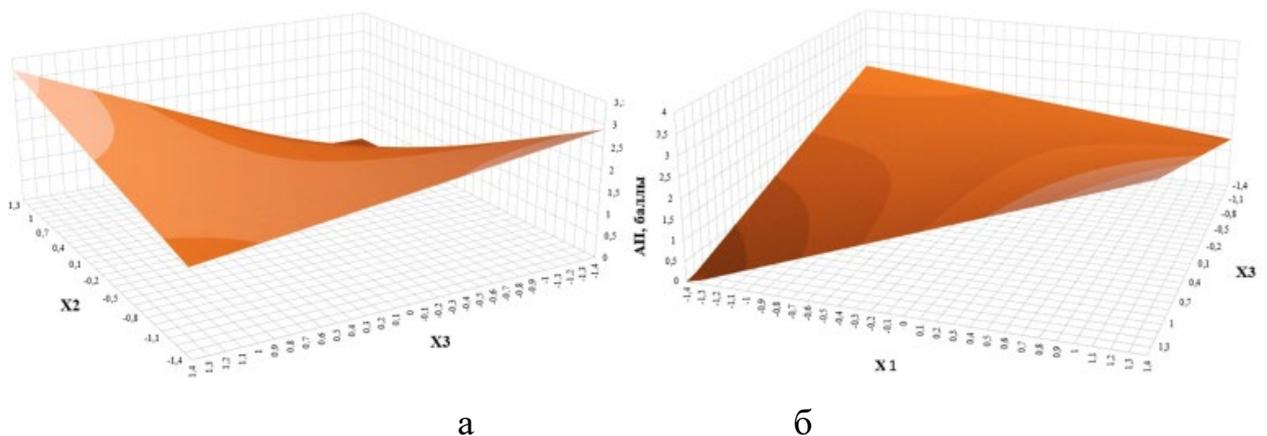


Рис. 2.– Влияние факторов на величину адгезии при фиксированных значениях в центре плана: содержания полиизобутилена–(а), температуры– (б)

При фиксации переменной «время полимеризации покрытия» в центре плана, поверхность вырождается в прямую. В эксперименте использовался

композиционный план второго порядка, результатом которого, после анализа экспериментальных данных является полином второго порядка. Наличие квадратичных коэффициентов позволяет сравнительно легко определить экстремумы функции [9]. В полученном в настоящей работе уравнении регрессии квадратичные коэффициенты являются не значимыми, что затрудняет поиск экстремумов функции многих переменных. На практике необходимо выявить ряд комбинаций исследуемых факторов, для которых реализуются заданные пользователем значения адгезии. Наличие таких комбинаций позволит обеспечить выбор условий, оптимальных с точки зрения инженера-технолога на промышленном предприятии. В настоящее время существуют подходы, позволяющие решать задачи оптимизации составов с помощью программных продуктов обработки факторных экспериментов, например «PlanExp B-D13» [10], но они находят экстремумы и являются платными продуктами.

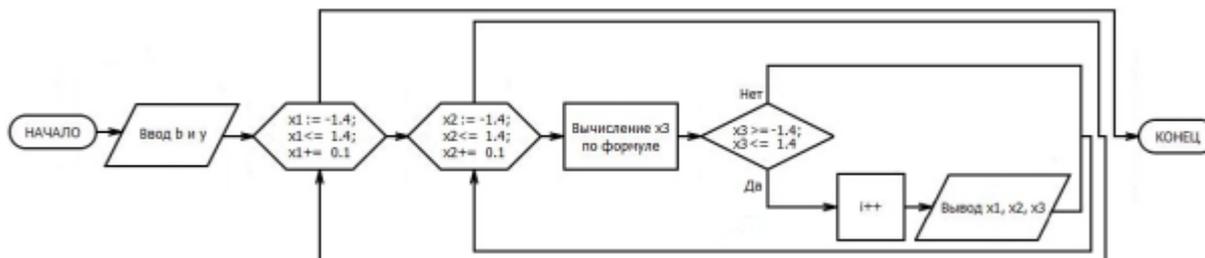


Рис. 3.– Блок-схема программы расчета факторов, обеспечивающих наилучшую адгезию покрытия на основе полиизобутилена

Поэтому в среде Microsoft Visual Studio была разработана программа на языке программирования C++. Блок-схема разработанной программы приведена на рис. 3. Фрагменты кода программы показаны на рис. 4. Программа позволяет по заданной величине адгезии (y) и значениям коэффициентов уравнения регрессии (b) рассчитать все соответствующие комбинации переменных x_1 , x_2 , x_3 в безразмерном масштабе, реализующие требуемый отклик–адгезию. Использованы части стандартной библиотеки

C++ `<iostream>` и `<iomanip>`, позволяющие работать с потоками и процессами форматирования ввода и вывода. Поскольку расчеты производятся для уравнений регрессии в безразмерных переменных, программу можно использовать при оценке произвольных факторов и откликов: например, механической прочности, деформации, пористости покрытий и других необходимых показателей качества продукции.

```
#include "stdafx.h" // Служебный файл VS
#include <iostream> // Инициализация cin и cout
#include <iomanip> // Библиотека для сокращения десятичной дроби
int main() { // Начало кода
    using namespace std; // Режим std для сокращения кода cin и cout
    system("title Программа для расчёта оптимальных переменных (версия 1.0)"); // Заголовок
    setlocale(LC_ALL, "RU"); // Инициализация русского шрифта
    cout << "\033[31m"; // Красный шрифт
    cout << "Внимание! ";
    cout << "\033[37m"; // Белый шрифт
    cout << "Для отделения целой части используйте точку!\n" << endl;
    double b0, b1, b2, b3, b11, b22, b33, b12, b23, b13, y; // Инициализация переменных
```

а

```
system("cls"); // Очистка экрана
cout << "Полученные переменные (x1, x2, x3):" << endl;
cout << "\033[32m" << endl; // Зелёный шрифт
int i = 0; // Инициализация счётчика строк
for (double x1 = -1.4; x1 <= 1.4; x1 += 0.1) { // Перебор возможных значений x1
    for (double x2 = -1.4; x2 <= 1.4; x2 += 0.1) { // Перебор возможных значений x2
        double x3 = (y - b0 - b1 * x1 - b2 * x2 - b11
            * x1 * x1 - b22 * x2 * x2 - b12 * x1 * x2)
            / (b3 + b33 * x2 * x2 + b23 * x2 + b13 * x1);
        if (x3 >= -1.4 && x3 <= 1.4) { // Проверка на соответствие диапазону
            i++; // Активация счётчика строк
            cout << i << " "; // Вывод номера строки
            cout << fixed << setprecision(1) << x1 << " " << x2 << " "
                << setprecision(2) << x3 << endl; // Вывод переменных
        }
    }
}
cout << "\a"; // Звуковое сопровождение
cout << "\033[37m" << endl; // Белый шрифт
system("pause"); // Режим ожидания
return 0; // Отчёт об успешном выполнении
} // Конец кода
```

б

Рис. 4.– Фрагменты кода программы, разработанной на языке программирования C++: настройка визуальной составляющей и подключение библиотек–(а), результат расчетов –(б)

Из анализа поверхностей (рис. 2) следует, что наибольший интерес представляют диапазоны: для температуры 60,0-90,0 ° С, времени полимеризации 240-280 мин, т.е. значения факторов, близкие к нижним границам диапазонов. В этом случае адгезия покрытий составляет 0-1 балл. Концентрация полиизобутилена в нефрасе в центре диапазона исследования на адгезию формируемого покрытия не влияет, поэтому исходя из минимизации затрат на сырье рассматривалось содержание полимера, близкое к минимальному: 1,0-1,2 %. Исходя из этих соображений выделили набор расчетных комбинаций, для которых реализуется высокая адгезионная прочность «0 баллов». Результаты расчета представлены в таблице 2.

Таблица № 2

Результаты расчета сочетаний факторов, обеспечивающих заданную адгезию покрытий на основе полиизобутилена (ПИБ)

Номер комбинации	Фактор, масштаб						Адгезия, балл расчет/ эксперимент
	Безразмерный			Натуральный			
	x ₁	x ₂	x ₃	ПИБ, %	T, ° С	τ, мин	
1	-1,4	0	-1,35	1,0	80,0	242	0/0
2	-1,4	0,3	-1,12	1,0	84,0	252	0/1
3	-1,3	0,3	-1,20	1,1	84,0	249	0/0
4	-1,3	0,7	-0,91	1,1	90,0	261	0/0
5	-1,2	0,1	-1,39	1,2	81,0	240	0/1
6	-1,2	0,4	-1,14	1,2	86,0	251	0/0
7	-1,2	0,9	-0,84	1,2	93,0	264	0/0

В соответствии с расчетными данными были изготовлены покрытия и проведены испытания на адгезию методом решетчатых надрезов. Эксперимент показал, что морфологически однородные, сплошные пленки с высокой адгезией к металлу образуются при использовании полимерных

растворов с концентрацией 1,1-1,2 % при температурах формирования покрытий 85,0-95,0 ° С и времени полимеризации покрытий 240-270 минут. Адгезионная прочность таких покрытий соответствует «0 баллов». Эти комбинации наиболее экономически выгодны и эффективны с точки зрения технологического режима изготовления покрытий.

Изображения поверхности покрытий до и после испытаний для комбинации номер 7 (таблица 2) приведены на рисунке 5. Результаты микроскопических исследований показали, что края надрезов ровные, отслоений покрытия в местах пересечения надрезов и решетке не наблюдается.

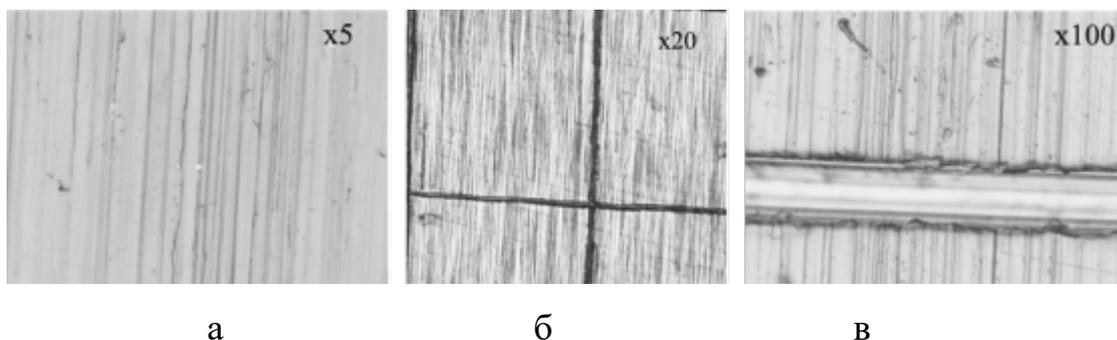


Рис. 5.– Поверхность покрытия на основе полиизобутилена до (а) и после (б, в) испытаний на адгезию

Заключение

Рассмотрено разделительное покрытие на основе полиизобутилена. Исследована адгезия покрытия к металлическим поверхностям. В среде Microsoft Visual Studio разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитать технологические режимы формирования покрытия с заданной адгезией, по шестибальной шкале. Определены условия получения покрытия с наилучшей адгезией, соответствующей показателю «нуль баллов» по шестибальной шкале: содержание ПИБ в нефрасе 1,1-1,2 %, температура формирования покрытия 85,0-95,0 ° С, время отверждения

покрытия 240-270 минут. Программное обеспечение позволяет произвести расчет за время порядка 1-2 секунды.

Предложенный подход может быть полезен при разработке новых функциональных покрытий с заданными свойствами.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской деятельности СНО «Композит» Каменского технологического института (филиала) ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова.

Литература

1. Симонов А. И., Антонова Н. М. Устройство для определения краевого угла смачивания жидкостей на плоских поверхностях // Инженерный вестник Дона. 2024. № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9599.

2. Антонова Н. М., Линьков И. С., Хохлова А. Д., Симонов А. И. Оценка энергетических характеристик поверхности антиадгезивов для прогнозирования их функциональных свойств // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: Материалы 16-й Международной научно-технической конференции, Минск, 22–24 мая 2024 года. Минск: Республиканское унитарное предприятие "Издательский дом "Белорусская наука", 2024. С. 313-316.

3. Wang Z., Liu J., Li D., Wang C., Yang B., Liu Y. Experimental and numerical study on temperature-deformation behavior of insulating glass units //Journal of Building Engineering. 2025. V. 99. p. 111629.

4. Alves J. B., Vasconcelos M. K., Mangia L. H., Tatagiba M., Fidalgo J., Campos D., Invernici P. L., Reboucas M. V. A bibliometric survey on polyisobutylene manufacture // Processes. 2021. V. 9. № 8. p. 1315.

5. Karamdoust S. Functionalized Polyisobutylene: From Synthesis to Properties and Applications. The University of Western Ontario (Canada). 2013. 192 p.

6. Kang Y., Zhao Y., Feng X., Fang J., Shui L., Xin M., Hao C. Adhesive and rheological properties of Polyisobutylene-based adhesives with different white carbon black fillers // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2024. V. 133. p. 103755.

7. Kang Y., Feng X., Fang J., Zhao Y., Shui L., Xin M., Hao C. Preparation and application of polyisobutylene-based sealants: used in pilot manufacturing of watertight cables // The Journal of Adhesion. 2025. pp. 1-15.

8. Сарычев Д.А., Мельникова Е.С., Чередниченко Т.Ф. Применение активированной резиновой крошки при реконструкции верхней части путепроводов и дорожного полотна мостовых сооружений. // Инженерный вестник Дона. 2025. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2025/9935.

9. Боброва Е.Ю., Жуков А.Д., Артеменко С.О., Гудков П.К. Цифровая оптимизация свойств композиционного связующего. Инженерный вестник Дона. 2025. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2025/9794.

10. Сороканич С.В., Парамонова А.А. Оптимизация состава быстротвердеющих тяжелых цементных бетонов с комплексной добавкой из отходов промышленности. Инженерный вестник Дона. 2025. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2025/9747.

References

1. Simonov A. I., Antonova N. M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9599.
2. Antonova N. M., Linkov I. S., Khokhlova A. D., Simonov A. I. Novyye materialy i tekhnologii: poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnyye materialy, zashchitnyye pokrytiya, svarka: Materialy 16-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Minsk. 22–24 maya 2024 goda. Minsk: Respublikanskoye unitarnoye predpriyatiye "Izdatelskiy dom "Belorusskaya nauka". 2024. pp. 313-316.



3. Wang Z., Liu J., Li D., Wang C., Yang B., Liu Y. Journal of Building Engineering. 2025. V. 99. p. 111629.
4. Alves J. B., Vasconcelos M. K., Mangia L. H., Tatagiba M., Fidalgo J., Campos D., Invernici P. L., Reboucas M. V. Processes. 2021. V. 9. № 8. p. 1315.
5. Karamdoust S. The University of Western Ontario (Canada). 2013. 192 p.
6. Kang Y., Zhao Y., Feng X., Fang J., Shui L., Xin M., Hao C. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2024. V. 133. p. 103755.
7. Kang Y., Feng X., Fang J., Zhao Y., Shui L., Xin M., Hao C. The Journal of Adhesion. 2025. pp. 1-15.
8. Sarychev D.A., Mel'nikova E.S., CHerednichenko T.F. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2025/9935.
9. Bobrova E.YU., ZHukov A.D., Artemenko S.O., Gudkov P.K. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2025/9794.
10. Sorokanich S.V., Paramonova A.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2025/9747.

Дата поступления: 8.05.2025

Дата публикации: 25.06.2025