

Ю. С. ДУБИНОВ, канд. техн. наук, доц.

Р. Р. СЕЛЕЗНЕВА

В. А. ЯСАШИН, д-р техн. наук, проф.

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина (Москва, Россия)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В данной работе рассмотрено влияние эксплуатационных и структурных факторов на прочностные характеристики неметаллических композиционных материалов, применяемых для изготовления труб в нефтегазовом секторе. В качестве исследуемого материала выбраны углепластик и стеклопластик. Проанализированы факторы, связанные с типом материала, количеством армирующих слоев, углом ориентации волокон и кислотностью эксплуатационной среды. Для оценки совместного влияния факторов использован смешанный факторный эксперимент 2×3^3 . По результатам обработки данных построена регрессионная модель второго порядка, проведена проверка значимости коэффициентов по критерию Стьюдента и проверка адекватности модели по критерию Фишера. Полученная модель позволяет прогнозировать качественные характеристики материалов и является инструментом управления качеством.

Ключевые слова: неметаллические композиционные материалы, стеклопластик, углепластик, прочность, факторный эксперимент, управление качеством.

В нефтегазовой отрасли интерес к неметаллическим композиционным материалам связан с необходимостью повышения надежности трубопроводных систем, работающих в агрессивных средах. Для промысловых трубопроводов характерно взаимодействие не только с нефтью, но и пластовыми водами, растворами солей и средами с различной кислотностью. В таких условиях традиционные металлические трубы подвержены коррозионному разрушению, тогда как композиционные материалы обладают более высокой химической стойкостью.

Однако применение неметаллических композитов имеет свои особенности. Прочность таких материалов зависит не только от типа армирующего наполнителя и полимерной матрицы, но и от структуры армирования. На качественные характеристики могут заметно влиять количество слоев, угол ориентации волокон, качество пропитки и условия эксплуатации.

В данной работе прочностные характеристики стеклопластика и углепластика исследовались с применением смешанного полного факторного эксперимента. Данный план эксперимента позволяет оценить влияние не только каждого фактора, но и выявить их взаимодействия. В качестве факторов рассматривались тип материала, количество армирующих слоев, угол ориентации волокон и кислотность среды. Основным выходным параметром является предел прочности при растяжении.

Материалы и методика исследования

В качестве объектов исследования были выбраны два типа неметаллических композитных материалов – стеклопластик (С) и углепластик (У). Данный выбор связан с тем, что оба материала рассматриваются как перспективные для изготовления труб и элементов трубопроводных систем, работающих в условиях агрессивных сред. Основным контролируемым параметром является предел прочности при растяжении. Все образцы после выдержки с различной комбинацией факторов испытывались на универсальной разрывной машине *Shimadzu AG-Xplus*.

$$\sigma_k = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

где: σ_k – предел прочности при растяжении, МПа; F – максимальная нагрузка, зарегистрированная в момент разрушения образца, Н; A – площадь поперечного сечения рабочей части образца, мм².

Для оценки влияния на прочность были выбраны следующие факторы (табл. 1).

Табл. 1. Уровни факторов эксперимента

Фактор/ Уровень фактора	Материал (X1)	Количество слоев (X2)	Угол поворота волокна (X3)	Кислотность среды <i>CH3COOH</i> (X4)
-1	С	10	0	pH3
0	-	15	45	pH5
+1	У	20	90	pH7

Для обработки результатов использовался смешанный полный факторный эксперимент 2×3^3 . Такой план включает 54 сочетания уровней факторов. Для каждого сочетания было выполнено три повторных испытания, что составило 162 результата. Полученные данные представлены в таблице 2.

После проведения полного комплекса испытаний была выполнена обработка полученных данных и построена регрессионная модель, описывающая изменение предела прочности в зависимости от исследуемых факторов. Коэффициенты регрессии определялись методом наименьших квадратов

$$\begin{aligned} \sigma = & 277,72 + 67,62x_1 + 15,95x_2 - 17,32x_3 + 31,69x_4 + 6,19x_1x_2 \\ & - 4,77x_1x_3 - 23,42x_1x_4 - 1,21x_2x_3 + 1,39x_2x_4 - 1,70x_3x_4 \\ & + 2,18x_2^2 - 3,51x_3^2 + 6,44x_4^2 - 0,33x_1x_2x_3 - 1,60x_1x_2x_4 \\ & + 1,23x_1x_3x_4 - 3,65x_1x_2^2 - 69,10x_1x_3^2 + 26,32x_1x_4^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Для оценки устойчивости результатов эксперимента была определена дисперсия воспроизводимости.

Табл. 2. Результаты эксперимента

№ опыта	X1	X2	X3	X4	Предел прочности, МПа (1)	Предел прочности, МПа (2)	Предел прочности, МПа (3)
1	-1	-1	-1	-1	193,6	208,12	194,57
2	-1	-1	-1	0	273,06	293,54	274,43
3	-1	-1	-1	+1	310,39	333,67	311,94
4	-1	-1	0	-1	129,71	119,33	139,44
5	-1	-1	0	0	182,95	168,31	196,67
6	-1	-1	0	+1	207,96	191,32	223,56
7	-1	-1	+1	-1	176,18	177,06	189,39
8	-1	-1	+1	0	248,48	249,72	267,12
9	-1	-1	+1	+1	282,45	283,86	303,63
10	-1	0	-1	-1	209,09	192,36	224,77
11	-1	0	-1	0	294,90	271,31	317,02
12	-1	0	-1	+1	335,22	308,40	360,36
13	-1	0	0	-1	140,09	140,79	150,60
14	-1	0	0	0	197,59	198,58	212,41
15	-1	0	0	+1	224,60	225,72	241,45
16	-1	0	+1	-1	190,27	192,17	202,64
17	-1	0	+1	0	268,36	271,04	285,80
18	-1	0	+1	+1	305,05	308,10	324,88
19	-1	+1	-1	-1	222,64	239,34	223,75
20	-1	+1	-1	0	314,02	337,57	315,59
21	-1	+1	-1	+1	356,95	383,72	358,73
22	-1	+1	0	-1	149,17	137,24	160,36
23	-1	+1	0	0	210,39	193,56	226,17
24	-1	+1	0	+1	239,16	220,03	257,10
25	-1	+1	+1	-1	202,60	204,63	215,77
26	-1	+1	+1	0	285,76	288,62	304,33
27	-1	+1	+1	+1	324,82	328,07	345,93
28	+1	-1	-1	-1	295,66	297,14	317,83
29	+1	-1	-1	0	273,06	274,43	293,54
30	+1	-1	-1	+1	310,9	312,45	334,22
31	+1	-1	0	-1	342,97	368,69	344,68
32	+1	-1	0	0	316,75	340,51	318,33
33	+1	-1	0	+1	360,64	387,69	362,44
34	+1	-1	+1	-1	254,27	255,54	273,34
35	+1	-1	+1	0	234,83	236,00	252,44
36	+1	-1	+1	+1	267,37	268,71	287,42
37	+1	0	-1	-1	319,31	322,50	340,07
38	+1	0	-1	0	294,90	297,85	314,07
39	+1	0	-1	+1	335,77	339,13	357,60
40	+1	0	0	-1	370,40	340,77	398,18
41	+1	0	0	0	342,09	314,72	367,75
42	+1	0	0	+1	389,50	358,34	418,71
43	+1	0	+1	-1	274,61	295,21	275,98
44	+1	0	+1	0	253,62	272,64	254,89
45	+1	0	+1	+1	288,76	310,42	290,20

Продолжение Табл. 2. Результаты эксперимента

№ опыта	X1	X2	X3	X4	Предел прочности, МПа (1)	Предел прочности, МПа (2)	Предел прочности, МПа (3)
46	+1	+1	-1	-1	340,01	341,71	365,51
47	+1	+1	-1	0	314,02	315,59	337,57
48	+1	+1	-1	+1	357,53	359,32	384,34
49	+1	+1	0	-1	394,41	362,86	423,99
50	+1	+1	0	0	364,26	335,12	391,58
51	+1	+1	0	+1	414,74	381,56	445,85
52	+1	+1	+1	-1	292,41	314,34	293,87
53	+1	+1	+1	0	270,06	290,31	271,41
54	+1	+1	+1	+1	307,48	330,54	309,02

Дисперсия отдельного опыта вычислялась по выражению:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{m - 1} \quad (3)$$

где: y_{ij} – результат отдельного испытания; $\bar{y}_i$ – среднее значение по серии испытаний; m – число повторений.

Средняя дисперсия воспроизводимости определялась как

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (4)$$

В результате расчётов получено: $S_y = 28,05$ МПа. Полученное значение свидетельствует о приемлемой воспроизводимости экспериментальных данных и позволяет использовать их для построения математической модели.

Проверка коэффициентов по критерию Стьюдента показала, что статистически значимыми являются коэффициенты, характеризующие влияние материала, количество армирующих слоёв, угол ориентации волокон, кислотность среды, взаимодействие материала и кислотности среды, взаимодействие материала с квадратичным эффектом ориентации волокон, взаимодействие материала с квадратичным эффектом кислотности среды (табл. 3). Критическое значение критерия определялось для уровня значимости $\alpha = 0,05$: $t_{кр} = 2,03$, число степеней свободы $f = 35$. Наиболее сильный эффект оказывает выбор типа материала (11,3) и кислотность в выдерживаемой среде (7,1).

Табл. 3. Результаты проверки значимости коэффициентов

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{14}	b_{133}	b_{144}
24,8	11,3	3,6	4,2	7,1	4,9	6,4	3,8

Для оценки пригодности модели была выполнена проверка ее адекватности по критерию Фишера. Дисперсия адекватности определялась по выражению

$$S_{ад}^2 = \frac{m \sum (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{N - d} \quad (5)$$

где: m – число повторений эксперимента; $\hat{y}_i$ – значение отклика, рассчитанное по модели; $\bar{y}_i$ – среднее экспериментальное значение отклика; N – количество опытов; d – число коэффициентов регрессионной модели.

Расчётное значение критерия Фишера определялось по формуле:

$$F = \frac{S_{адек}^2}{S_y^2} \quad (6)$$

где: S_y^2 – дисперсия воспроизводимости эксперимента.

В результате расчётов получено $F_{расч} = 0,83$. Для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $f_1 = 35$, $f_2 = 108$ критическое значение составило $F_{кр} = 1,71$. Так как $F_{расч} < F_{кр}$, то выполняется условие адекватности модели.

Дополнительно были проведены лабораторные испытания для оценки погрешности между математическими значениями и фактическими. Результаты представлены в таблице 4.

Табл. 4. Выдержка результатов испытаний и математических расчетов

№ опыта	X1	X2	X3	X4	Предел прочности, МПа	Результаты по формуле (2), МПа	Погрешность, %
1	-1	-1	0	-1	129,49	134,17	3,61
2	-1	1	0	-1	148,92	147,71	0,81
3	1	0	0	1	388,85	386,37	0,64
4	1	1	0	-1	393,75	390,71	0,77
5	1	1	0	0	363,65	366,01	0,65
6	1	1	0	1	414,05	406,83	1,74
7	1	1	1	-1	300,21	294,94	1,75
8	1	1	1	1	315,68	310,12	1,76

Сопоставление расчётных значений с экспериментальными показало, что расхождение между ними не превышает 5%.

Практическая ценность полученной модели заключается в возможности прогнозирования прочностных характеристик неметаллических композитных материалов и использования в качестве инструмента управления качеством.

Выводы

Выполненное исследование позволило оценить влияние эксплуатационных и структурных факторов на прочностные характеристики неметаллических композитных материалов, применяемых при изготовлении труб нефтегазового назначения. Наиболее значимыми факторами являются тип композиционного материала и кислотность среды. Проверка по критериям Стьюдента и Фишера подтвердила статистическую состоятельность и адекватность модели. Полученная математическая модель показывает результаты с погрешностью меньше, чем 5%. Данная зависимость может быть использована в качестве инструмента управления качеством при проектировании и производстве изделий из неметаллических композиционных материалов для нефтегазового сектора.

Контакты:

dubinov.y@gubkin.ru (Дубинов Юрий Сергеевич);
gabdullova.r@gubkin.ru (Селезнева Резеда Рафисовна);
yasashin.v@gubkin.ru (Ясашин Виталий Анатольевич).

УДК 331.108

ЖИВКО А. А.

ВОБЛАЯ И. Н. , канд. экон. наук, доцент

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПЕРСОНАЛА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрены современные подходы к совершенствованию методов контроля персонала. Проанализирована эволюция контрольной функции, выявлены ключевые тенденции, связанные с цифровизацией процессов мониторинга и оценки труда. Особое внимание уделено балансу между технологическими возможностями и необходимостью сохранения доверительных отношений в коллективе. Обоснована важность перехода от контроля поведения к контролю по результатам как ключевого направления совершенствования управленческих подходов.

Ключевые слова: контроль персонала, контроллинг, цифровизация управления, оценка эффективности, мониторинг, управление человеческими ресурсами.

Функция контроля является одной из фундаментальных в системе управления любой организацией. Под контролем персонала понимается совокупность процедур, позволяющих руководителю отслеживать эффективность работы сотрудников, анализировать отклонения и на этой