

кая и прикладная механика. Минск: Высшая школа, 1981, вып. 8, с. 83–86. 2. Крушевский А.Е. Вариационные методы расчета корпусных деталей машин. — Минск: Наука и техника, 1967. — 224 с. 3. Крушевский А.Е., Кондратюк В.Ф. Об одном способе построения уравнения Лагранжа первого рода в теории упругости. — В сб. Теоретическая и прикладная механика. Минск: Высшая школа, 1975, вып. 1, с. 34–38.

УДК 531.135+678

Д.А. Аксенович, канд.техн.наук, доцент,
Ф.Ф. Гаммал, инженер
(БПИ)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЛЕЕВЫХ МАСТИК

В современном строительстве при монтаже различных конструкций и для крепления облицовочных и защитных покрытий часто используются клеевые мастики. В отличие от клеев мастика не только склеивает материалы, но и заполняет пространство между соединяемыми поверхностями, которое возникает в результате их неплотного прилегания друг к другу. Толщина шва поэтому определяется точностью скрепляемых элементов и может меняться в пределах от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Таким образом мастика не только должна равномерно и легко наноситься на поверхность, но и заполнять шов, а также удерживаться там при вертикальных расположениях шва.

На практике указанные технологические свойства клеевых мастик характеризуются с помощью вискозиметров, определяющих вязкость материалов условными методами (диаметр расплыва некоторого количества мастики, скорость ее вытекания из мерного сосуда и т.д.) [1,2]. Характер деформирования материала в этих приборах не соответствует течению мастики в реальных условиях, а полученные результаты зависят от вида вискозиметра и параметров его рабочих органов, поэтому только ориентировочно могут характеризовать необходимые технологические свойства мастики.

В настоящей работе предлагается технологические свойства клеевых мастик характеризовать такими реологическими константами материала, как предельное напряжение сдвига, пластическая вязкость и мера консистенции, которые не зависят от методов исследования, т.е. являются инвариантными.

Имеется много видов приборов, которые применяются для реологических исследований строительных материалов [3–5]. В нашей работе определены реологических констант исследуемых мастик производилось на ротационном вискозиметре РВ-8 [6], к которому было сконструировано специальное приспособление, позволяющее автоматизировать процесс измерений и значительно повысить его точность [7].

Объектом исследования и разработки оптимального состава была принята мастика на основе инден-кумароновой смолы с добавками полистирола и полиизобутилена. Мастики на базе этих полимеров обладают эксплуатацион-

ными, технологическими и экономическими преимуществами. В качестве наполнителя применялись доломитовая мука и молотый аглопорит, растворителем служил уайт-спирит и метаксилол, а для пластификации использовались отходы производства диметилтерефталата.

Для получения из указанных компонентов мастики с оптимальными технологическими показателями эксперимент проводился по методу статистического планирования [8–11]. Если 7 факторов, являющихся компонентами мастики, принять варьируемыми, а уровни 2 факторов во избежание вырождения матрицы планирования стабилизировать, то полный факторный эксперимент составит $N_0 = 2^7 = 128$ опытов. Выполнить такое количество опытов затруднительно, поэтому, основываясь на предположении отсутствия эффекта взаимодействия между растворителями и наполнителями, в качестве независимых переменных были приняты 3 фактора (x_1, x_2, x_3). В этом случае количество опытов сократится до 8.

Обозначим компоненты с переменным уровнем: x_1 — ксилол, x_2 — уайт-спирит, x_3 — аглопорит молотый, x_4 — доломитовая мука с удельной поверхностью $175 \text{ м}^2/\text{кг}$, x_5 — доломитовая мука с удельной поверхностью $350 \text{ м}^2/\text{кг}$, x_6 — полистирол, x_7 — инден-кумароночная смола. Компоненты с постоянным уровнем: a_8 — полиизобутилен, a_9 — пластификатор.

План эксперимента приведен в табл. 1.

По результатам вискозиметрического исследования для каждого состава была построена реологическая кривая, общий вид которой показан на рис. 1.

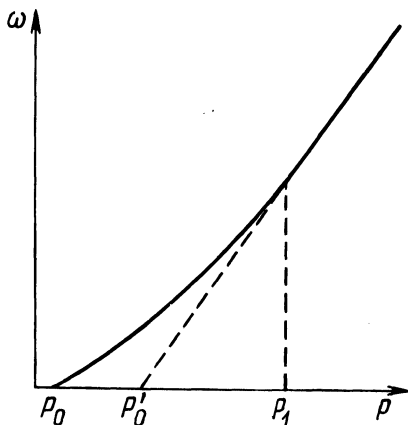


Рис. 1. Реологическая кривая.

Зависимость между угловой скоростью вращения ω внутреннего полусферического цилиндра вискозиметра и величиной груза P , создающего на нем крутящий момент, можно интерпретировать как связь между градиентом скорости сдвига $\dot{\gamma}$ и напряжением сдвига τ .

На реологической кривой различаются два характерных участка: криволинейный при небольших нагрузках ($P < P_1$); прямолинейный при больших нагрузках ($P > P_1$).

Таблица 1. План эксперимента (матрица)

Кодовое обозначение	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	a_8	a_9	
Основной уровень	7	7	18	25	25	2,5	12	0,5	3	
Интервал варьирования	1	1	2	3	3	0,3	1	—	—	
Верхний уровень	8	8	20	28	28	2,8	13	0,5	3	
Нижний уровень	6	6	16	22	22	2,2	11	0,5	3	
№ опыта	1	$\bar{6}$	$\bar{6}$	$\bar{16}$	$\bar{22}$	$\bar{22}$	$\bar{2,2}$	$\bar{11}$	0,5	3
	2	$\bar{6}$	$\bar{8}$	$\bar{16}$	$\bar{28}$	$\bar{22}$	$\bar{2,8}$	$\bar{13}$	0,5	3
	3	$\bar{8}$	$\bar{6}$	$\bar{16}$	$\bar{28}$	$\bar{28}$	$\bar{2,2}$	$\bar{13}$	0,5	3
	4	$\bar{8}$	$\bar{8}$	$\bar{16}$	$\bar{22}$	$\bar{28}$	$\bar{2,8}$	$\bar{11}$	0,5	3
	5	$\bar{6}$	$\bar{6}$	$\bar{20}$	$\bar{28}$	$\bar{28}$	$\bar{2,8}$	$\bar{11}$	0,5	3
	6	$\bar{6}$	$\bar{8}$	$\bar{20}$	$\bar{22}$	$\bar{28}$	$\bar{2,2}$	$\bar{13}$	0,5	3
	7	$\bar{8}$	$\bar{6}$	$\bar{20}$	$\bar{22}$	$\bar{22}$	$\bar{2,8}$	$\bar{13}$	0,5	3
	8	$\bar{8}$	$\bar{8}$	$\bar{20}$	$\bar{28}$	$\bar{22}$	$\bar{2,2}$	$\bar{11}$	0,5	3

Следовательно, исследуемые мастики являются структурированными жидкостями. При более высоких скоростях вращения внутреннего полусфероицилиндра происходит разрушение структуры полнее и система описывается реологическим уравнением Бингама–Шведова [13]

$$\tau - \tau_0' = \eta \dot{\gamma}, \quad (1)$$

где τ_0' — эффективное значение предельного напряжения сдвига, соответствующее величине P_0' ; η — пластическая вязкость системы с разрушенной структурой.

Зависимость $\omega - P$ на криволинейном участке реологической кривой в логарифмических координатах носит прямолинейный характер, т.е. при нагрузках, меньших P_1 , исследуемая система удовлетворяет степенному уравнению вида

$$\tau - \tau_0 = k \dot{\gamma}^n, \quad (2)$$

где k — мера консистенции структурированных жидкостей; n — коэффициент неньютоновского поведения материала. Предельное напряжение сдвига τ_0 соответствует предельной нагрузке P_0 , при которой начинается сдвиг в исследуемой системе.

Технологические свойства мастики оценивались реологическими константами P_0 , η и k , исходя из следующих соображений. Напряжение сдвига в мастике на открытой вертикальной поверхности или в шве создается ее собственным весом. Если оно превысит предельное напряжение сдвига, то мастика будет стекать, поэтому показатель P_0 характеризует способность материала удерживаться на вертикальной поверхности или в шве. Для более равномерного и легкого нанесения мастики на поверхность или заполнения шва показатели η при механическом способе ($P > P_1$) или k при ручном нанесении ($P < P_1$) должны быть минимальными. Таким образом мастика будет тем более "технологичнее", чем меньше для нее соотношение k/P_0 .

На рис. 2 приведены реологические кривые для всех 8 составов исследуемых клеевых мастик в натуральных и логарифмических координатах, полученных при температуре $(20 \pm 0,1)^\circ\text{C}$. На рис. 2, а линейная зависимость ω - P показана сплошной линией, а степенная — штриховой. Наличие двух прямолинейных участков на реологических кривых исследуемых клеевых мастик на рис. 2,б позволило установить, что состояние рассматриваемых систем при

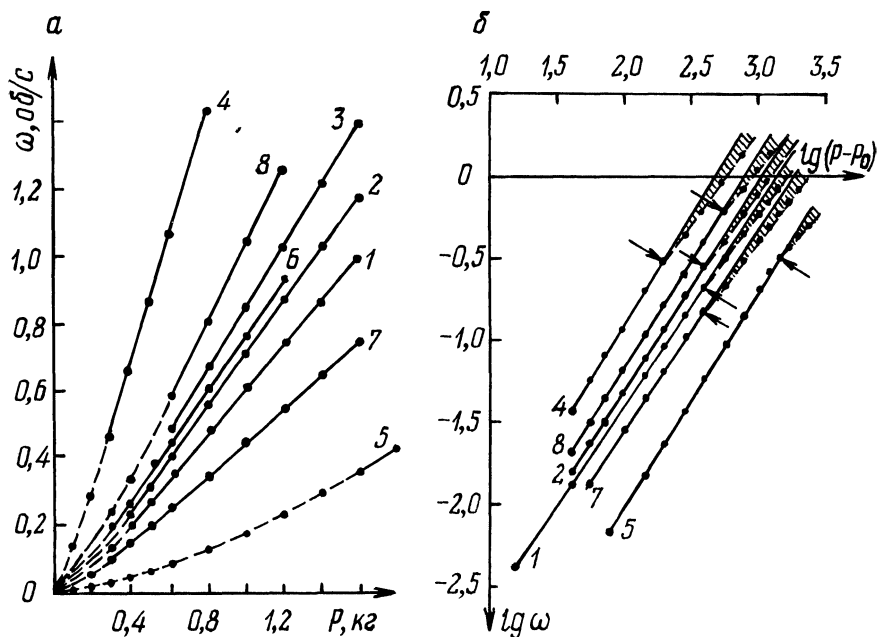


Рис. 2. Реологические показатели составов 1–8:
 а — в натуральных координатах; б — в логарифмических координатах.

различных скоростях сдвига описывается двумя реологическими уравнениями вида (1) и (2).

Начало перехода системы из одного состояния в другое на графиках отмечено стрелками, а степень нелинейности зависимости ω - P пропорциональна углу заштрихованной зоны. Так, например, для пятого состава, обладающего наибольшей консистенцией, такой переход наблюдается только при максимальных нагрузках, что можно объяснить более слабым разрушением структуры по сравнению с другими составами.

Определение реологических констант по экспериментальным данным производилось с помощью расчетных формул, полученных в работе [7], а результаты приведены в табл. 2.

Реализация матрицы планирования позволяет получить уравнение регрессии, которое в первом приближении линейно связывает технологический показатель исследуемой мастики с независимыми переменными x_1, x_2, \dots, x_n :

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n \quad (3)$$

Коэффициенты регрессии вычисляются по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ip} \bar{y}_p}{N_0} \quad (4)$$

где $i=1, 2, \dots$; n — число факторов; $N_0 = 8$ — число опытов; x_{ip} — кодовые переменные +1 или -1; \bar{y}_p — среднее значение технологического показателя мастики.

Получены следующие коэффициенты регрессии:

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
21784	+237	+947	-2238	+1887	+204	-2794	+1175

Значимость коэффициентов характеризуется ошибкой опыта, которая определялась по формуле

$$\epsilon = t_{\text{дов}} \frac{\sigma}{\sqrt{\gamma N_0}} \quad (5)$$

Таблица 2. Реологические показатели мастик

№ состава	η , Н·с·м ⁻²	κ_y , Н·с ⁿ ·м ⁻²	$P \cdot 10^2$, Н	$\kappa/P \cdot 10^{-2}$, с ⁿ ·м ⁻²
1	59,3	100,6	4,5	22,4
2	46,6	86,8	3,5	24,8
3	40,1	88,1	3,0	29,4
4	20,1	39,1	2,0	19,6
5	145,5	329,6	20,0	16,5
6	44,9	90,1	4,0	22,5
7	77,9	121,0	8,0	15,1
8	33,1	72,1	3,0	24,0

где $t_{\text{дов}} = 2,131$ — доверительный коэффициент, полученный по распределению Стьюдента [12] для степени свободы $15 = 2 \cdot 8 - 1$ и уровня вероятности 95%; $\gamma = 2$ — число параллельных опытов; σ — среднее квадратичное отклонение.

В результате вычислений получено $\sigma = 914,1$ и $\epsilon = 486,8$. Сравнение коэффициентов регрессии с ошибкой опыта показывает влияние каждого фактора на интересующий нас показатель. Наибольшие значения имеют коэффициенты b_3, b_4 и b_6 , следовательно, изменение их абсолютной величины оказывает большее влияние на конечный результат по сравнению с коэффициентами b_1, b_2 и b_5 , величина которых близка к ошибке опыта.

Оптимизация состава мастики производилась в соответствии с правилом крутого восхождения. Наибольшее произведение коэффициента b_i на интервал варьирования h_i оказалось у фактора x_4 , поэтому новый шаг h'_i для всех переменных факторов определяется по выражению

$$h'_i = \frac{h_4}{h_4 \cdot b_4} \cdot h_i b_i, \quad (6)$$

где новый шаг h'_4 для переменной x_4 был сохранен прежним. Также был сохранен исходный основной уровень компонентов. Используя новые шаги были получены новые 8 уровней с учетом знаков у коэффициентов регрессии по выражению

$$x_i \pm nh'_i, \quad (7)$$

где n — последовательное число уровней от 1 до 8.

Новые наборы уровней приведены в табл.3, при составлении которой уровни переменных x_1 и x_5 были приняты постоянными, так как коэффициенты b_1 и b_5 близки к ошибке опыта.

Для выполнения крутого восхождения в соответствии с таблицей случайных чисел были реализованы опыты 1,3 и 6. На этом этапе эксперимента про-

Таблица 3. Набор уровней для крутого восхождения

Кодовые обозначения	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	a_8	a_9
Основной уровень	7	7	18	25	25	2,5	12	0,5	3
Новые шаги	—	+0,5	-2,36	+3	—	-0,44	+0,62	—	—
Новые уровни в опытах	1 7	7,5	15,64	28	25	2,06	12,62	0,5	3
	2 7	8,0	13,28	31	25	1,62	13,24	0,5	3
	3 7	8,5	10,92	34	25	1,18	13,86	0,5	3
	4 7	9,0	8,56	37	25	0,74	14,48	0,5	3
	5 7	9,5	6,20	40	25	0,30	15,10	0,5	3
	6 7	10,0	3,84	43	25	—	15,72	0,5	3
	7 7	10,5	1,48	46	25	—	16,34	0,5	3
	8 7	11,0	—	49	25	—	16,96	0,5	3

Таблица 4. Значения $\frac{\kappa}{P_0} = \bar{\gamma}_p$ по данным круглого восхождения

№ опыта	$\gamma_1 \cdot 10^{-2}$	$\gamma_2 \cdot 10^{-2}$	$\gamma_3 \cdot 10^{-2}$	$\bar{\gamma}_p \cdot 10^{-2}$
1	14,7	14,9	15,1	14,9
3	12,7	12,4	12,7	12,6
6	13,8	13,3	14,0	13,7

Таблица 5. Технологические качества мастики

Состав	$G, \text{H} \cdot \text{см}^{-1}$	$H_{\text{гор}}, \text{мм}$	$H_{\text{верт}}, \text{мм}$	$\frac{G}{H_{\text{гор}}}$
Исходный	0,15	6	4	0,025
Оптимизированный	0,14	8	5	0,018

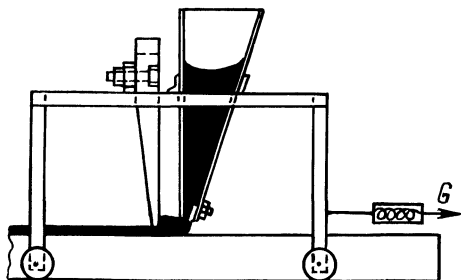


Рис. 3. Схема установки для определения усилия при нанесении мастики на поверхность.

водилось три параллельных опыта. Полученные в каждом опыте значения технологического показателя мастик и его среднее значение приведены в табл. 4.

Как видно из таблицы исследуемый состав в опыте 3 дает наиболее оптимальный технологический показатель клеевой мастики на первом этапе планирования. Проверка технологических характеристик оптимального состава была проведена путем нанесения мастики на горизонтальную плоскость, а также определялась способность мастики удерживаться в горизонтальном и вертикальном шве. С помощью установки, показанной на рис. 3, определялось необходимое усилие для нанесения заданной толщины мастики на поверхность при перемещении установки со скоростью 0,1 м/с.

Результаты проверки, приведенные в табл. 5 показывают, что отношение усилия G , которое необходимо для нанесения слоя мастики шириной один сантиметр, к предельной толщине шва H у оптимизированного состава меньше по сравнению с составом по исходному (основному) уровню. Таким об-

разом, оптимизированный состав по технологическим показателям имеет преимущества перед исходным составом.

Экспериментальная проверка на практике подтвердила, что реологический показатель $\frac{K}{P_0}$ может служить критерием технологического качества мастики. В то же время, улучшение технологических свойств мастики не должно приводить к ухудшению ее эксплуатационных свойств. Следовательно оптимизированный состав в дальнейшем должен испытываться и по эксплуатационным показателям.

Л и т е р а т у р а

1. К а р д а ш о в Д.А. Синтетические клеи. — М.: Химия, 1968. — 504 с.
2. В о ю ц к и й С.С. Коллоидная химия. — М.: Химия, 1964. — 574 с.
3. Х и г е р о в и ч М.И., М е р к и н А.П. Физико-химические и физические методы исследования строительных материалов. — М.: Высшая школа, 1968. — 191 с.
4. Ф а д е е в а В.С. Формирование структуры пластичных паст строительных материалов при машинной переработке. — М.: Госстройиздат, 1972. — 222 с.
5. Х р у л о в В.М. Синтетические клеи и мастики. — М.: Высшая школа, 1970. — 367 м.
6. В о л а р о в и ч М.П. — Заводская лаборатория, 1945, № 3, с. 15—17.
7. А к с е н о в и ч Д.А., В е р з а л А.И., К и м А.Х. Реологические свойства пластрасформов конденсационных структур. — В сб.: Исследование природных и синтетических полимерных материалов и их использование. — Минск: Наука и техника, 1970, с. 315—333.
8. Н а л и м о в В.В., Ч е р н о в а Н.А. Статистические методы планирования экстремальных процессов. — М.: Наука, 1965. — 340 с.
9. В о з н е с е н с к и й В.А. Статистические решения в технологических задачах. — Кишинев: Картя молдовеняскэ, 1969. — 231 с.
10. А д л е р Ю.П. Введение в планирование экспериментов. — М.: Металлургия, 1969. — 157 с.
11. В о з н е с е н с к и й В.А. Статистические решения в задачах анализа и оптимизации качества строительных материалов (методология и опыт применения). Автореф. докт. дис. ... — М.: 1970. — 44 с.
12. Р у м ш и н с к и й Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. — М.: Наука, 1971. — 192 с.
13. В i n g h a m. Fluidity and plasticity. — New York, 1922.