

УДК 532.526.4:539.3

Двухслойные податливые покрытия для управления турбулентным пограничным слоем*

В.М. Кулик¹, А.В. Бойко^{2,3}, И. Ли⁴

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

³*Тюменский государственный университет*

⁴*Департамент морской архитектуры и инженерии океана,
Пусанский национальный университет, Пусан, Корея*

E-mail: vkulik@itp.nsc.ru

Описываются проводимые в гидротрубе эксперименты по влиянию двухслойных податливых покрытий на поверхностное трение плоской пластины при скоростях потока до 16 м/с. Для документирования свойств покрытий были измерены динамические вязкоупругие свойства использованных резин в диапазоне частот, приблизительно соответствующем диапазону частот колебаний давления на стенке при актуальных скоростях потока. Данные о характеристиках вязкоупругих свойств покрытий и экспериментальные данные о взаимодействии покрытий с потоком образуют базу данных, необходимую для проверки различных теорий и полуэмпирических моделей прогнозирования эффективности такого взаимодействия.

Ключевые слова: податливое покрытие, многослойность, вязкоупругие свойства, комплексная податливость, турбулентное течение, снижение гидродинамического трения.

Введение

Использование податливых покрытий для обтекаемых потоком объектов относится к одному из методов управления турбулентными пограничными слоями. К основным целям такого управления относятся модификация трения (как правило, его снижение), интенсификация теплообмена и звукопоглощение. Все эти процессы основаны на изменении краевых условий на границе жидкость–покрытие, что приводит к нетривиальному динамическому взаимодействию между используемым покрытием и структурами вязкого подслоя. Обзор соответствующих проблем, связанных с изучением взаимодействия податливых покрытий с потоком жидкости, можно найти в работах [1–3]. Вместе с тем, физические механизмы, приводящие к модификации трения, до конца не выяснены,

* Работа выполнена в Междисциплинарном центре фундаментальных исследований для судов и заводов морского базирования (GCRC-SOP) и поддержана грантами Национального научного фонда (NRF), финансируемого Министерством образования, науки и техники Республики Корея (№ 2011-0030013) и Министерством образования Республики Корея (№ 2015R1D1A1A01059973); также работа частично поддержана РФФИ (грант № 18-08-00761).

т.к. непонятно, с какими именно структурами вязкого подслоя и каким образом взаимодействует податливое покрытие. В значительной мере такое положение объясняется скудностью подробных данных о структурах вязкого подслоя и особенно о влиянии на них краевых условий. Однако можно утверждать [4], что с практической точки зрения покрытия должны обладать определенными свойствами. Это обстоятельство несколько ограничивает круг поисков эффективных для управления трением покрытий. Прежде всего, к таким свойствам относится гидравлическая гладкость покрытия. Это означает, что смещение поверхности покрытия относительно равновесного состояния по нормали к нему под действием пульсаций давления должно быть мало (по крайней мере меньше толщины вязкого подслоя). В противном случае на поверхности покрытия могут образовываться складки, которые приведут к неконтролируемому увеличению поверхностного трения и порче покрытия. Поэтому в качестве основного переносчика взаимодействия покрытий с потоком следует рассматривать скорость колебаний покрытия, а не величину смещения. Для эффективности такого взаимодействия скорость колебаний покрытия должна быть большой, что при малости смещений свидетельствует в пользу колебаний относительно высокой частоты. Вместе с тем, основная энергия возмущений вязкого подслоя сконцентрирована на относительно низких частотах, что ограничивает диапазон частот взаимодействия и его эффективность. Что касается смещений покрытия вдоль его поверхности под действием касательных напряжений, теоретические и экспериментальные работы [3–5] показывают, что их влияние на пульсации скорости в пограничном слое играют существенно меньшую роль. Детальные обзоры существующих гипотез, объясняющих механизмы управления турбулентными пограничными слоями податливыми покрытиями, можно найти в исследованиях [6, 7]. В работах по прямому численному моделированию течений над податливыми стенками также необходимо описывать граничные условия на поверхности покрытия в виде, пригодном для такого моделирования [8, 9].

Следует отметить, что измерения вязкоупругих свойств покрытий одновременно с измерениями поверхностного трения в турбулентном пограничном слое проводились только в единичных статьях [10, 11]. В ряде работ указывался либо статический модуль упругости, либо динамический модуль, измеренный на низких частотах (до 10 Гц), что недостаточно для верификации результатов экспериментов [3, 12]. Лишь в последнее время все необходимые данные были получены для однослойных покрытий из кремний-органических резин, что стало возможным благодаря развитию специальной методики измерений требуемых вязкоупругих свойств [13, 14].

Другое требование к покрытиям — их прочность. С учетом этого фактора однослойные покрытия имеют ограниченную перспективу практического применения. Так, уже первые испытанные покрытия [15, 16] имели довольно сложную структуру: наружный тонкий слой которых выполнял, по сути, защитную функцию. В настоящей работе проводится анализ вязкоупругих свойств двуслойных покрытий с тонким прочным наружным слоем и существенно более податливым, относительно толстым внутренним слоем, которые одновременно подвергаются испытаниям в гидротрубе с целью получения набора экспериментальных данных, необходимых для описания взаимодействия жидкость–покрытие.

1. Вязкоупругие свойства материалов использованных покрытий

В работе использовались кремнийорганические резины, полимеризующиеся при комнатной температуре и давлении от добавленного катализатора. Исходные компоненты представляют собой вязкие жидкости, которыми удобно заполнять формы как для отливки покрытий для испытаний в гидротрубе, так и для отливки образцов для измерения статических и динамических вязкоупругих свойств.

Таблица 1

Список образцов для измерения вязкоупругих свойств материалов

Материал, модуль упругости	Конструкция		Высота H , мм	Внешний диаметр D_{out} , мм	Внутренний диаметр D_{in} , мм	Плотность ρ , кг/м ³	
RTV-3133, фирма Xiameter $E_0 = 0,42$ МПа	3 цилиндра		10	10	–	1135	
	Полый цилиндр		9,25	30	22		
			24,16	30	22		
			39,15	30	22		
Пористый материал, фирма Hilti $E_0 = 0,86$ МПа	Цилиндр		28,1	30	–	440	
	Полый цилиндр		36,6	40	–		
			33	60	40		
			44	60	40		
Жидкие фракции компонент А и В материала Heavy Density фирмы Hilti	Конструкция	Порошок вольфрама	Высота, H , мм	Внешний диаметр D_{out} , мм	Внутренний диаметр D_{in} , мм	Плотность ρ , кг/м ³	
	Полый цилиндр	$W = 0\%$	39	30	22		980
	3 цилиндра	$W = 0\%$	10	10	–	1470	
		$W = 100\%$	10	10	–		
		$W = 200\%$	10	10	–		
		$W = 300\%$	10	10	–		
$W = 400\%$	10	10	–	5330			

Были созданы два варианта внутреннего слоя — из монолитного однородного материала RTV-3133 фирмы Xiameter и из пористого материала Light Density фирмы Hilti. Материал RTV-3133 BASE полимеризировался добавлением 5 % катализатора RTV-3081-F. Полученная смесь тщательно перемешивалась и вакуумировалась в течение 10÷15 минут. Для второго варианта компоненты А и В материала Light Density соединялись в пропорции 1:1 и перемешивались в течение одной минуты. Полученной смесью заполняли отливочные формы в отсутствие верхней крышки. В случае отливки образцов для измерения вязкоупругих свойств процесс выглядел следующим образом: как только смесь начинала пузыриться и твердеть, увеличивая свой объем в 2,5÷3 раза, нижняя стенка отливочной формы также удалялась с тем, чтобы не создавать препятствий увеличению пористости. Смесью полностью застывала через 5 минут. В табл. 1 приведен список образцов для измерения вязкоупругих свойств материалов.

Для внешнего слоя двухслойных покрытий использовался материал Heavy Density фирмы Hilti. Компоненты А и В этого материала отстаивались в течение месяца, а затем отделялась верхняя прозрачная фракция. Фракции компонент соединялись в пропорции 1:1 и добавлялось необходимое количество порошка вольфрама фирмы Sigma-Aldrich, USA с размером частиц 12 мкм. Отношение массы порошка к массе кремнийорганического компаунда варьировалось от 0 ($W = 0\%$) до 4 ($W = 400\%$). Во избежание оседания тяжелых частиц смесь непрерывно перемешивалась до начала отвердевания.

К настоящему времени описаны общие принципы свойств однослойных покрытий, зависящих от круговой частоты $\omega = 2\pi f$ [13, 14], требуемых для решения поставленной задачи. Как правило, для решения используется комплексный модуль упругости $E^* = E(\omega)[1 - i\mu(\omega)]$, где E — динамический модуль упругости, μ — коэффициент потерь (см., например, [17]). В настоящей работе применяется этот же подход.

На рис. 1 показаны реальные образцы, используемые для измерения вязкоупругих свойств материалов. Образец для сдвиговых деформаций изготовлен из материала RTV-3133, залитого в зазор между коаксиальными цилиндрами диаметрами 22 и 30 мм (рис. 1а). Высота слоя материала в зазоре составляет 24,16 мм. Рядом расположена верхняя крышка с датчиком виброускорения. На рис. 1б показан образец для деформации сжатия-растяжения, состоящий из трех цилиндров диаметром и высотой соответственно $D = H = 10$ мм из материала RTV-3133, приклеенных к нижнему основанию и к верхней

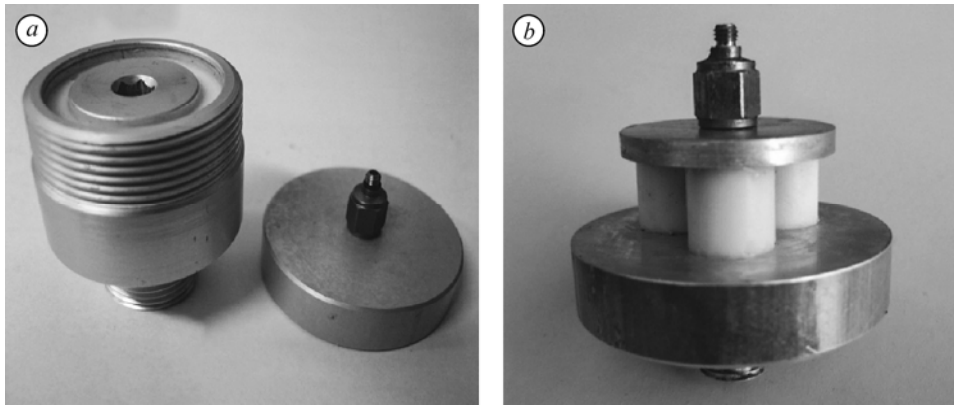


Рис. 1. Образцы для измерения свойств материалов: сдвига (а) и сжатия–растяжения (b).

нагрузочной массе. При измерении статического модуля упругости E_0 были учтены соответствующие формфакторы [18, 19], поэтому полученные величины модуля Юнга не зависят от размеров и формы образцов.

На рис. 2 приведены характеристики материала, полученные на основе очищенных фракций А и В композиции HD фирмы Hilti в зависимости от процентного количества добавленного порошка вольфрама (W). Отмечается нелинейный рост как статического, так и динамического модулей упругости (рис. 2а) и наличие «провала» для отношения модуля упругости к плотности (рис. 2b), когда масса порошка вольфрама в два раза превышает массу силиконовой основы.

Методика измерения вязкоупругих свойств была подробно описана в работах [13, 14]. Она основана на решении двумерной задачи о динамической деформации образца с полным описанием граничных условий на всей его поверхности. В частности, для цилиндрического образца, к которому снизу приклеен вибратор, а сверху нагрузочная масса (рис. 3), необходимо измерить только отношение амплитуд вибраций его верхней и нижней поверхностей и фазовый угол между ними. Метод свободен от использования колебательных характеристик вибратора и не требует калибровок. Кроме этого, он прост в эксплуатации, поскольку не требует настройки или юстировки.

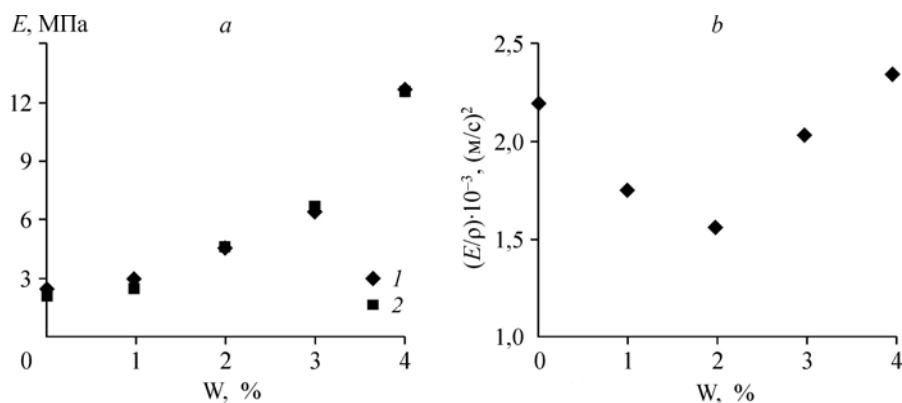


Рис. 2. Характеристики материала на основе очищенных фракций А и В композиции HD фирмы Hilti в зависимости от процентного количества добавленного порошка вольфрама W. а — статический (1) и динамический (2) модули упругости; b — отношение модуля упругости к плотности.

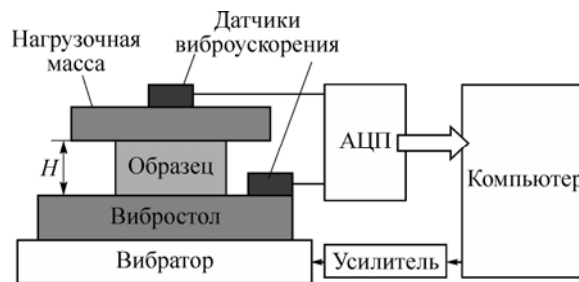


Рис. 3. Схема установки для измерения вязкоупругих свойств материалов.

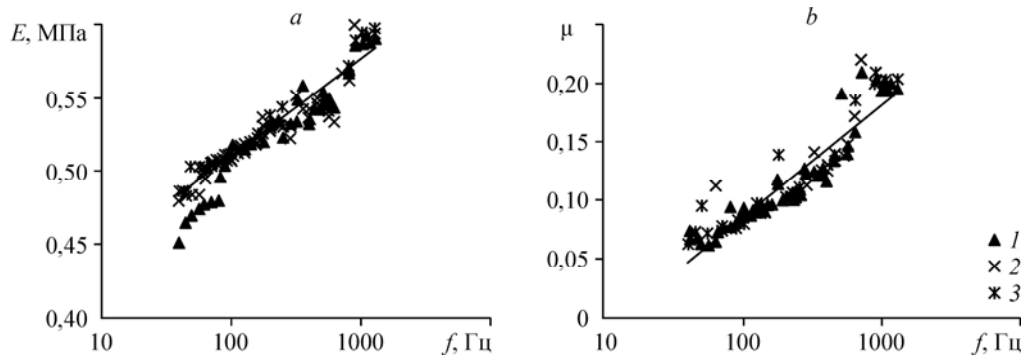


Рис. 4. Вязкоупругие свойства материала RTV-3133.

a — модуль упругости, b — коэффициент потерь; $M/m = 15,07$ (1), $27,44$ (2), $42,52$ (3).

На рис. 4 показаны полученные вязкоупругие свойства материала RTV-3133, измеренные через 43 дня после изготовления образца, состоящего из трех цилиндров с вышеуказанными параметрами: $D = H = 10$ мм. Представлены первичные экспериментальные данные при различных отношениях нагрузочной массы M к массе образца m . Модуль упругости (рис. 4а) несколько возрастает с увеличением с нагрузочной массы, а коэффициент потерь (рис. 4б) уменьшается. Причина этого была проанализирована в работах [13, 14].

На рис. 5 отображены полученные вязкоупругие свойства пористого материала. Образец в виде цилиндра диаметром 30 мм и высотой 28,1 мм был испытан под нагрузкой $M/m = 8,17$ через 18, 38 и 80 дней после изготовления. Здесь, как и ранее, наблюдается рост модуля упругости (рис. 5а) и уменьшение коэффициента потерь (рис. 5б) от времени старения.

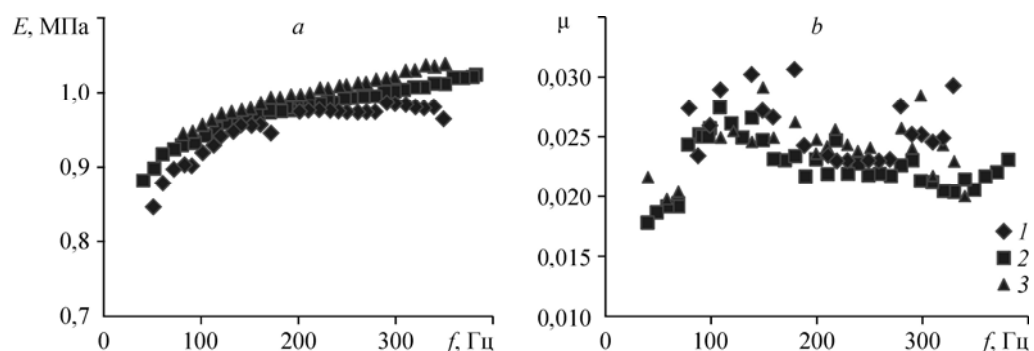


Рис. 5. Вязкоупругие свойства пористого материала.

a — модуль упругости, b — коэффициент потерь; измерения проведены через 18 (1), 38 (2), 80 (3) дней.

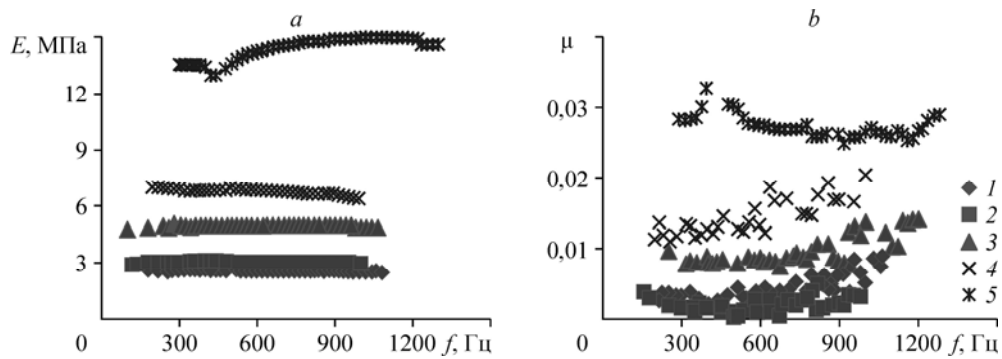


Рис. 6. Вязкоупругие свойства материала, наполненного вольфрамом.

a — модуль упругости, b — коэффициент потерь;
наполнение вольфрамом 0 (1), 100 (2), 200 (3), 300 (4), 400 (5) %.

На рис. 6 приведены вязкоупругие свойства материалов с различной степенью наполнения вольфрамом. Измерения были проведены через 30 дней после изготовления образцов при единой нагрузочной массе 35,85 г. Видно, что с ростом наполнения вольфрамом модуль упругости и коэффициент потерь увеличиваются. Силиконовая основа материала ($W = 0$ %) имеет чрезвычайно низкий коэффициент потерь: $\mu \approx 10^{-3}$.

2. Изготовление податливых покрытий

Для проведения экспериментов было изготовлено 5 двухслойных покрытий, параметры которых приведены в табл. 2. Покрытия наносились на вставку размером $100 \times 50 \text{ мм}^2$. Внутри каждой вставки была выполнена полость необходимой глубины для отливки внутреннего слоя, как показано на рис. 7. Внешний слой формировался внутри рамки из нержавеющей стали. Покрытия изготавливались в два этапа (по количеству слоев). Методики изготовления двухслойных покрытий с пористым внутренним слоем и из гомогенного материала RTV-3133 различны. При изготовлении внутреннего слоя из пористого материала его внешняя поверхность оставалась открытой, чтобы не препятствовать росту объема смеси. Спустя одну неделю излишки материала аккуратно срезались по уровню краев вставки, и таким образом верхняя поверхность слоя становилась ровной. Затем к вставке с готовым внутренним слоем прикреплялась рамка толщиной, равной толщине внешнего слоя. Вся конструкция закрывалась сверху пластиной с полированной поверхностью для обеспечения гидравлической гладкости внешней поверхности податливого покрытия. Далее объем внутри рамки заполнялся резиновой смесью с добавлением порошка вольфрама. Через трое суток верхняя пластина удалялась. При изготовлении двухслойных покрытий с внутренним слоем из материала RTV-3133 в первую очередь отливался внешний слой, затем через одну неделю — внутренний. Для изготовления внешнего слоя рамка зажималась между двумя пластинами и через дренажное

Таблица 2

Параметры двухслойных покрытий

Материал внешнего слоя	Толщина внешнего слоя h_{out} , мм	Материал внутреннего слоя	Толщина внутреннего слоя h_{inn} , мм
Добавка порошка вольфрама 400 %	1	RTV-3133	8
	2		8
Добавка порошка вольфрама 200 %	1	Пористый материал	4
	1		8
	2		8

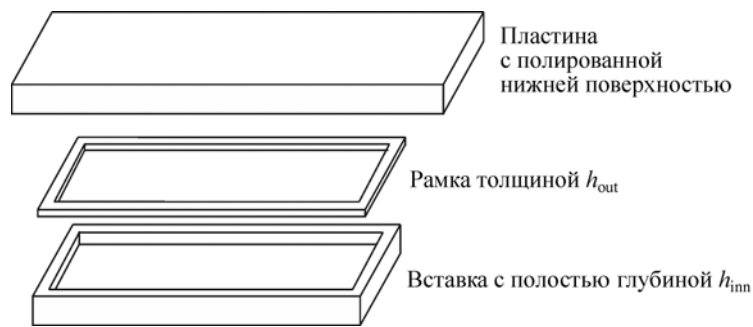


Рис. 7. Изготовление двухслойных покрытий с пористым внутренним слоем.

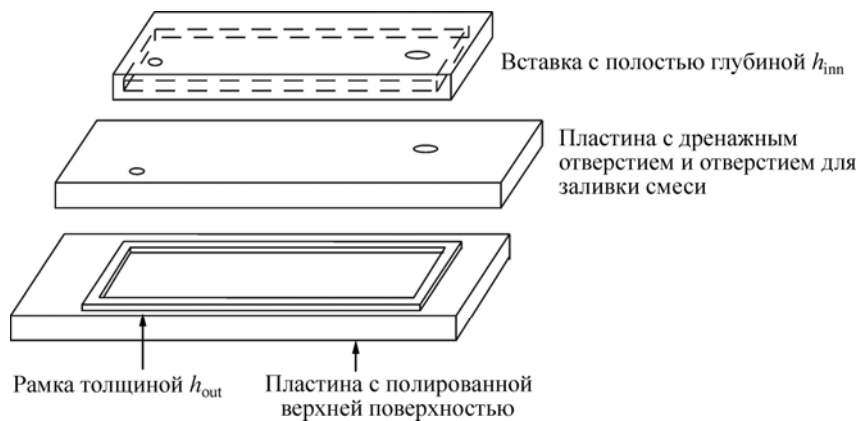


Рис. 8. Изготовление двухслойных покрытий с гомогенным внутренним слоем.

отверстие верхней технологической пластины резиновая смесь инжектировалась в полость (см. рис. 8). После затвердевания резины технологическая пластина удалялась, а на ее место закреплялась перевернутая вставка с полостью. Приготовленная смесь RTV-3133 инжектировалась в полость вставки через дренажное отверстие. Метод изготовления внутреннего слоя из материала RTV-3133 такой же, как и для изготовления однослойных покрытий, он был подробно описан в работе [20].

3. Динамическая податливость покрытий

Динамическая податливость покрытий рассчитывалась по методике, описанной в работах [21–23]. Податливость — это отношение деформации поверхности покрытия к приложенному давлению. Соответственно смещениям поверхности податливость будет иметь две компоненты: перпендикулярную поверхности — $C_{\perp} = \eta/P = |C_{\perp}|e^{i\theta_{\perp}}$ и параллельную ей — $C_{\parallel} = \zeta/P = |C_{\parallel}|e^{i\theta_{\parallel}}$. Здесь $|C_{\perp}|$ и $|C_{\parallel}|$ — модули соответствующих компонент динамической податливости, а θ_{\perp} и θ_{\parallel} — фазовые отставания соответствующих компонент смещения поверхности от действующего давления.

Для расчетов и анализа удобно использовать безразмерные комплексы. В случае однослойного покрытия [21, 22] динамическая податливость нормировалась на статическую податливость $C_{stat} = H/E$, что физически означает податливость столбика высотой H , изготовленного из материала с модулем упругости E , поперечный размер которого в несколько раз превышает высоту. В случае многослойного покрытия его статическая

податливость представляет собой сумму статических податливостей отдельных слоев —

$$C_{\text{stat}} = \sum_{k=1}^N \frac{h_k}{E_k}, \text{ а безразмерная податливость } C_{\text{norm}} = |C_{\perp}| / C_{\text{stat}}.$$

Для двухслойного покрытия компоненты безразмерной податливости зависят не только от отношения длины волны к толщине покрытия λ/H и от отношения скорости волны к скорости распространения сдвиговых возмущений в нижнем слое покрытия $V/C_{t,2}^0$, но также и от отношения модулей упругости E_1/E_2 , плотностей ρ_1/ρ_2 и отношения толщины верхнего слоя к общей толщине покрытия h_1/H .

При расчете динамической податливости вязкоупругие свойства материалов аппроксимировались следующими зависимостями: для RTV-3133: $E = (3 \cdot 10^4 \ln(f) + 3,67 \cdot 10^5) \times [1 - i(0,044 \ln(f) - 0,1163)]$ Па, $E_{\text{stat}} = 0,42$ МПа; для пористых материалов: $E = (300f + 9,34 \cdot 10^5) \cdot (1 - i 0,025)$ Па, $E_{\text{stat}} = 0,86$ МПа; для покрытий с добавлением 200 % вольфрама: $E = 4,647 \cdot 10^6 [1 - i(5 \cdot 10^{-6}f + 0,0055)]$ Па, $E_{\text{stat}} = 3,85$ МПа, с добавлением 400 % вольфрама: $E = (1600f + 12,58 \cdot 10^6) \cdot [1 - i(0,0297 - 3 \cdot 10^{-6}f)]$ Па, $E_{\text{stat}} = 10,86$ МПа. Как видно из рис. 9, модуль податливости состоит из главного гребня, уходящего с затуханием в сторону высоких скоростей (на рисунке показана только его часть); высокочастотного гребня, уходящего с затуханием в сторону высоких частот; и низкоскоростного гребня, уходящего с затуханием в сторону низких частот и скоростей.

Для покрытий, основной слой которых изготовлен из материала RTV-3133, пик податливости находится на скорости $U \approx 18$ м/с и частоте $f \approx 600$ Гц (при толщине верхнего слоя $h_1 = 1$ мм) и $f = 500$ Гц (при толщине верхнего слоя $h_1 = 2$ мм). Высокочастотный гребень с ростом частоты немного сдвигается в сторону больших скоростей. Для покрытия с $h_1 = 1$ мм (рис. 9a) он расположен в диапазоне скоростей $15 \div 18$ м/с, а для $h_1 = 2$ мм (рис. 9b) — в диапазоне $16 \div 23$ м/с и имеет величину податливости $C_{\text{norm}} < 1$. Низкоскоростной гребень начинается с самой низкой скорости и смыкается с другими

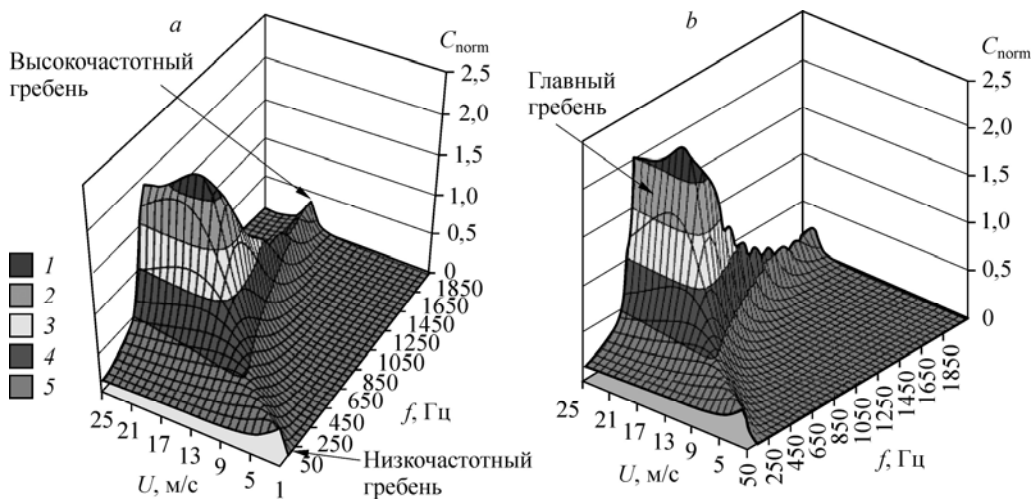


Рис. 9. Модуль нормальной компоненты безразмерной динамической податливости для двухслойных покрытий, изготовленных из RTV-3133 (толщина 8 мм), с наличием внешнего слоя с добавлением порошка вольфрама толщиной 1 (a) и 2 (b) мм.

$$h_1 = 2 \div 2,5 \text{ (1)}, 1,5 \div 2 \text{ (2)}, 1 \div 1,5 \text{ (3)}, 0,5 \div 1 \text{ (4)}, 0 \div 0,5 \text{ (5)}.$$

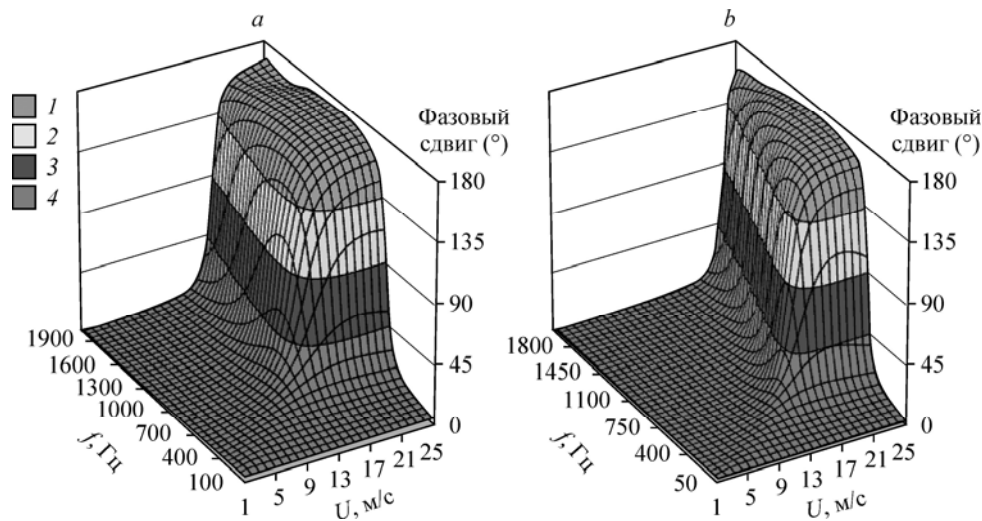


Рис. 10. Фазовый сдвиг нормальной компоненты безразмерной динамической податливости для двухслойных покрытий, изготовленных из RTV-3133 (толщина 8 мм), с наличием внешнего слоя с добавлением порошка вольфрама толщиной 1 (а) и 2 (б) мм. Фазовое отставание 135÷180 (1), 90÷135 (2), 45÷90 (3), 0÷45 (4).

гребнями при $U \approx 13 \div 15$ м/с. Его величина примерно равна высоте высокочастотного гребня.

Изменение фазового отставания перемещения поверхности покрытия от приложенного пульсационного давления показано на рис. 10. Фаза начинает изменяться с ростом частоты и скорости (в соответствии с положением низкоскоростного гребня) от нуля и достигает приблизительно 180° на высоких скоростях и частотах. Резкое изменение фазы для покрытия с $h_1 = 1$ мм (рис. 10а) происходит на скорости $U = 13 \div 16$ м/с и частоте $f = 500 \div 600$ Гц, а для покрытия с $h_1 = 2$ мм (рис. 10б) — при $U = 14 \div 17$ м/с и $f = 400 \div 500$ Гц.

Покрытия, изготовленные с применением пористого материала, обладают намного более высокой податливостью ($C_{\text{норм}} \approx 14$) по сравнению с однородным материалом RTV 3133, но сдвинутой в сторону высоких скоростей. Низкочастотный гребень в этом случае становится слабо заметен. С увеличением толщины внешнего слоя от 1 до 2 мм (при толщине нижнего слоя 8 мм) высокочастотный гребень, который становится практически параллельным оси частот, снижается с 28 до 25 м/с, а изменения фазы начинают происходить на более низких частотах: 1400 Гц при $h_1 = 1$ мм (рис. 12а) и 1000 Гц при $h_1 = 2$ мм (рис. 12б). Уменьшение толщины основного (нижнего) слоя с 8 до 4 мм привело к сдвигу модуля податливости и фазового сдвига в сторону высоких частот и скоростей, что можно видеть при сравнении рис. 11с и рис. 12с.

4. Результаты измерений

В ходе испытаний было установлено, что существует высокий риск разрушения покрытий на скоростях выше 16 м/с из-за слишком высокой отрывающей силы, возникающей из-за низкого давления в рабочей части гидротрубы. С учетом этого в большинстве случаев эксперименты были ограничены скоростями потока 16 м/с.

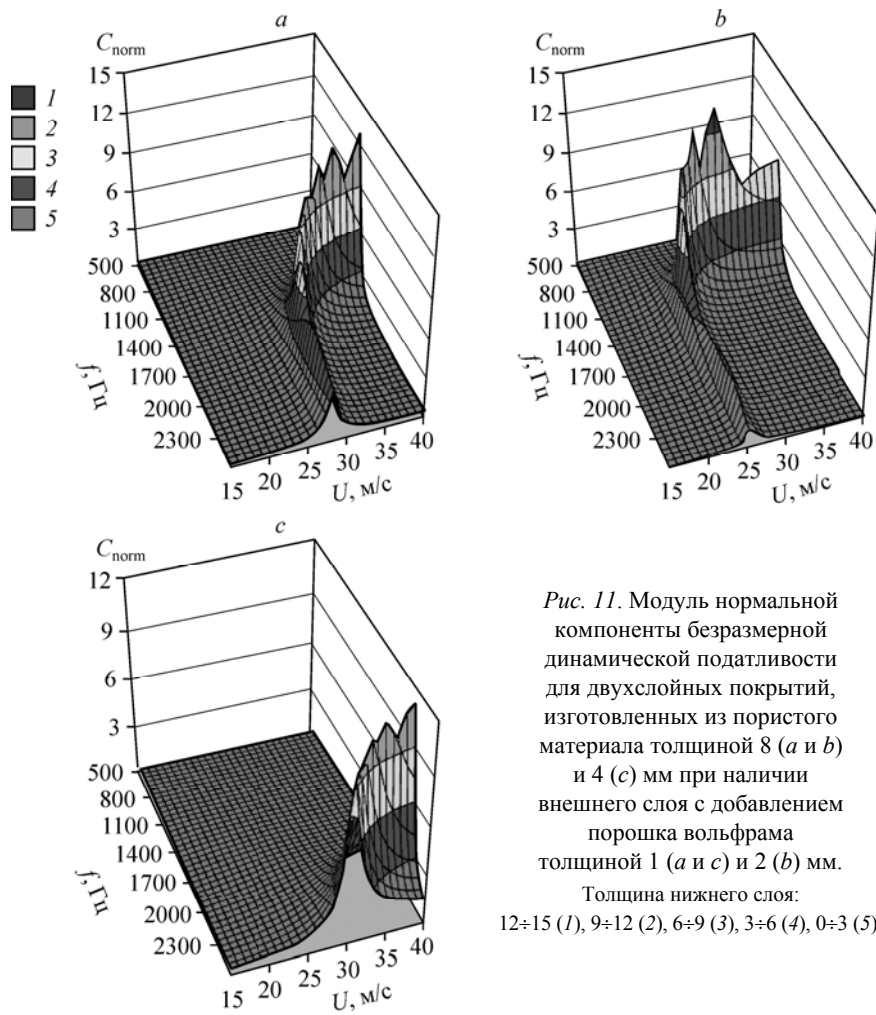


Рис. 11. Модуль нормальной компоненты безразмерной динамической податливости для двухслойных покрытий, изготовленных из пористого материала толщиной 8 (а и b) и 4 (с) мм при наличии внешнего слоя с добавлением порошка вольфрама толщиной 1 (а и с) и 2 (b) мм. Толщина нижнего слоя: 12÷15 (1), 9÷12 (2), 6÷9 (3), 3÷6 (4), 0÷3 (5).

Основные результаты измерений силы трения для базового случая (жесткая вставка) и для серии двухслойных податливых покрытий различной толщины показаны на рис. 13. Как видно, взаимодействие между покрытием и потоком существенно зависит от толщины покрытия, при этом зависимость изменения сопротивления от скорости потока довольно монотонная. Все покрытия показывают заметное уменьшение трения при $U = 6\div 16$ м/с.

Выводы

В работе экспериментально изучено влияние двухслойных податливых покрытий на поверхностное трение плоской пластины при скоростях водного потока до 16 м/с. Предложено и опробовано два метода изготовления двухслойных покрытий с прочным внешним слоем и мягким внутренним. Для первого метода использована вспенивающаяся кремнийорганическая резина, а для второго — гомогенная кремнийорганическая резина с малым модулем упругости. Сверху покрытие покрывалось тонким гладким слоем резины с добавлением 200 или 400 % (по весу) микропорошка вольфрама. Показано, что увеличение прочности верхнего слоя является важным преимуществом двухслойного покрытия при его практическом применении.

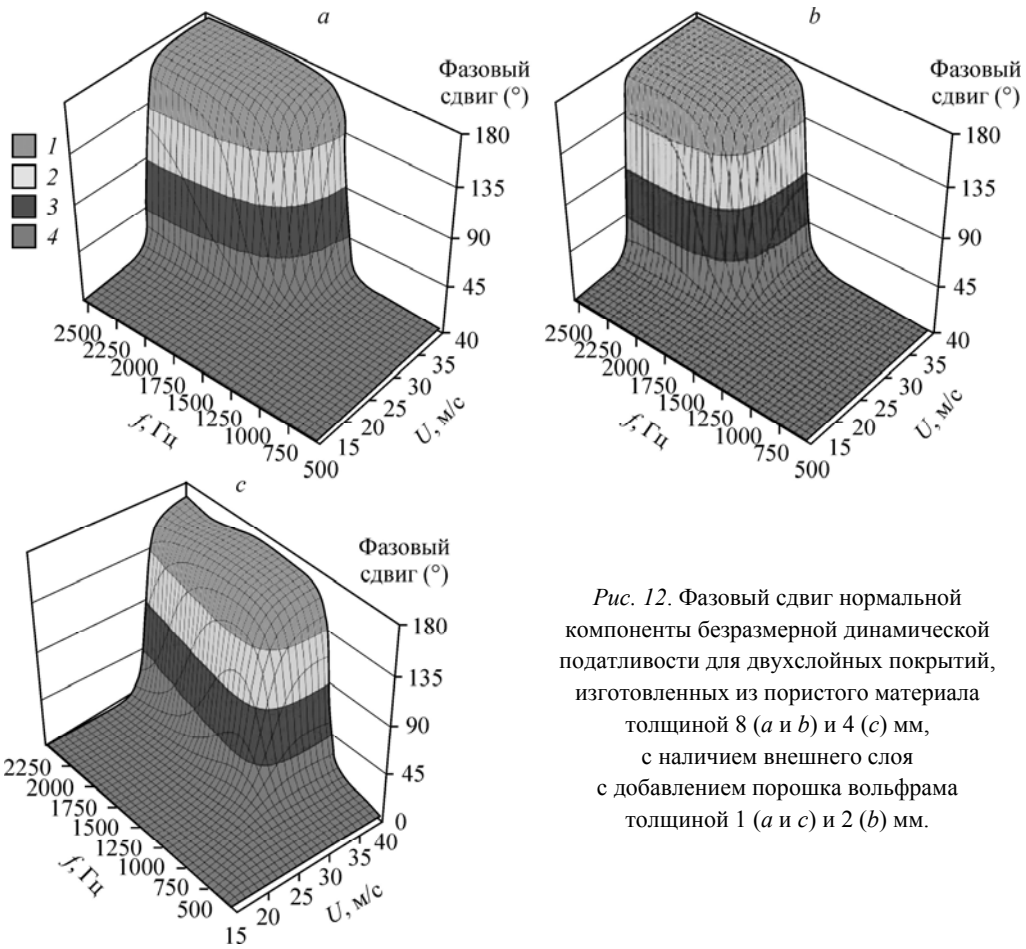


Рис. 12. Фазовый сдвиг нормальной компоненты безразмерной динамической податливости для двухслойных покрытий, изготовленных из пористого материала толщиной 8 (a и b) и 4 (c) мм, с наличием внешнего слоя с добавлением порошка вольфрама толщиной 1 (a и c) и 2 (b) мм.

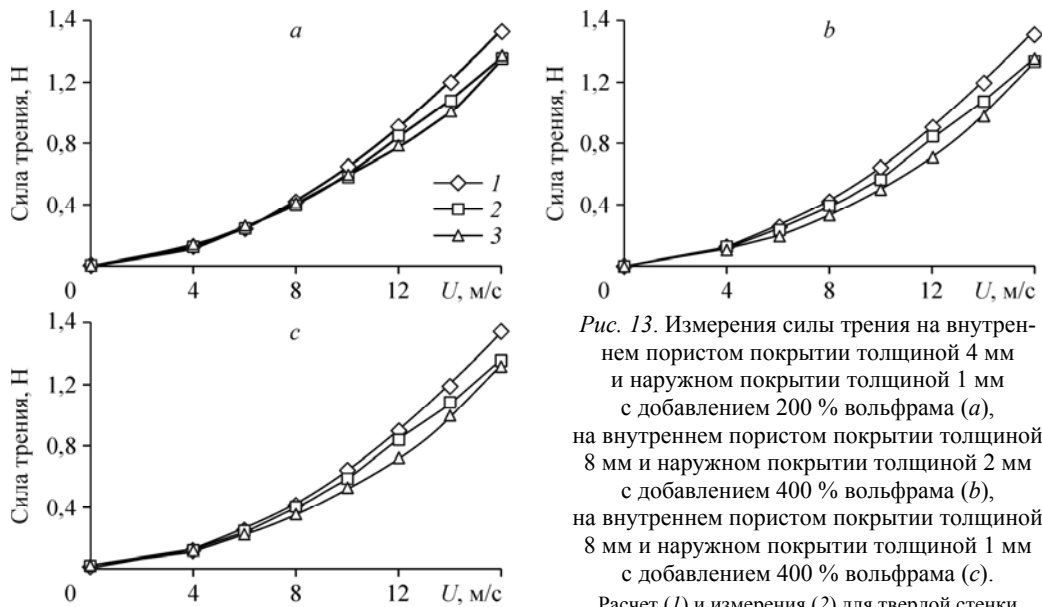


Рис. 13. Измерения силы трения на внутреннем пористом покрытии толщиной 4 мм и наружном покрытии толщиной 1 мм с добавлением 200 % вольфрама (a), на внутреннем пористом покрытии толщиной 8 мм и наружном покрытии толщиной 2 мм с добавлением 400 % вольфрама (b), на внутреннем пористом покрытии толщиной 8 мм и наружном покрытии толщиной 1 мм с добавлением 400 % вольфрама (c). Расчет (1) и измерения (2) для твердой стенки и при наличии податливого покрытия (3).

Параллельно с экспериментами, проводимыми в гидротрубе, были измерены динамические вязкоупругие свойства использованных резин в диапазоне частот, приблизительно соответствующем диапазону частот колебаний давления на стенке при актуальных скоростях потока. На основе полученных данных по уникальной методике была рассчитана динамическая податливость изготовленных покрытий. Данные о характеристиках вязкоупругих и колебательных свойств покрытий и экспериментальные данные об эффективности взаимодействия покрытий с потоком образуют базу данных, необходимую для проверки различных теорий и полуэмпирических моделей прогнозирования эффективности такого взаимодействия.

Список литературы

1. **Gad-el-Hak M.** Compliant coatings: a decade of progress // *Applied Mechanics Review*. 1996. Vol. 49. P. 147–157.
2. **Luhar M., Sharma A.S., McKeon B.J.** A framework for studying the effect of compliant surfaces on wall turbulence // *J. Fluid Mech*. 2015. Vol. 768. P. 415–441.
3. **Zhang C., Wang J., Blake W., Katz J.** Deformation of a compliant wall in a turbulent channel flow // *J. Fluid Mech*. 2017. Vol. 823. P. 345–390.
4. **Kulik V.M.** Action of a turbulent flow on a hard compliant coating // *Int. J. Heat and Fluid Flows*. 2012. P. 232–241.
5. **Кулик В.М.** Вынужденные колебания слоя вязкоупругого материала под действием конвективной волны сдвиговых напряжений // *Прикладная механика и техническая физика*. 2014. Т. 55, № 6. С. 145–151.
6. **Bushnell D.M., Hefner J.N., Ash R.L.** Effect of compliant wall motion on turbulent boundary layers // *Phys. Fluids*. 1977. Vol. 20. P. S31–S48.
7. **Gad-el-Hak M., Blackwelder R.F., Riley J.J.** On the interaction of compliant coatings with boundary-layer flows // *J. Fluid Mech*. 1984. Vol. 140. P. 257–280.
8. **Xu S., Rempfer D., Lumley J.** Turbulence over a compliant surface: numerical simulation and analysis // *J. Fluid Mech*. 2003. Vol. 478. P. 11–34.
9. **Kim E., Choi H.** Space-time characteristics of a compliant wall in a turbulent channel flow // *J. Fluid Mech*. 2014. Vol. 756. P. 30–53.
10. **Choi K.-S., Yang X., Clayton B.R., Glover E.J., Atlar M., Semenov B.N., Kulik V.M.** Turbulent drag reduction using compliant surfaces // *Proc. Royal Soc. London A*. 1997. Vol. 453. P. 2229–2240.
11. **Ivanov O.O., Vedenev V.V., Kulik V.M., Boiko A.V.** The influence of compliant coatings on skin friction in the turbulent boundary layer // *J. of Physics: Conf. Series*. 2017. Vol. 894, No. 1. P. 012036.
12. **Lee T., Fisher M., Schwarz W.H.** Investigation of the stable interaction of a passive compliant surface with a turbulent boundary layer // *J. Fluid Mech*. 1993. Vol. 257. P. 373–401.
13. **Kulik V.M., Boiko A.V., Semenov B.N., Seoudi B.M., Chun H.H., Lee I.** Measurement of dynamic properties of viscoelastic materials // *Experimental Mechanics*. 2009. Vol. 49, No. 3. P. 417–425.
14. **Boiko A.V., Kulik V.M., Seoudi B.M., Chun H.H., Lee I.** Measurement method of complex viscoelastic material properties // *Int. J. of Solids and Structures*. 2010. Vol. 47, No. 3–4. P. 374–382.
15. **Kramer M.O.** Boundary layer stabilization by distributed damping // *J. American Society Naval Engineers*. 1960. Vol. 2, No. 1. P. 25–33.
16. **Blick E.F., Walters R.R., Smith R., Chu H.** Compliant coating skin friction experiments // *AIAA Paper*. 1969. No. 69–165.
17. **Ферри Дж.** Вязкоупругие свойства полимеров. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 535 с.
18. **Кулик В.М., Бойко А.В.** Формфактор сжатого цилиндрического образца // *Измерительная техника*. 2014. № 8. С. 36–38.
19. **Кулик В.М., Бойко А.В.** Формфактор полого цилиндрического образца при сдвиговой деформации // *Измерительная техника*. 2015. № 6. С. 15–17.
20. **Кулик В.М., Бойко А.В., Ли И.** Снижение трения податливыми покрытиями из однородного материала // *Теплофизика и аэромеханика*. 2018. Т. 25, № 4. С. 537–546.
21. **Кулик В.М.** Вынужденные колебания слоя вязкоупругого материала под действием конвективной волны давления // *Прикладная механика и техническая физика*. 2007. Т. 48, № 2. С. 90–97.
22. **Кулик В.М.** Деформация вязкоупругого покрытия в турбулентном течении // *Теплофизика и аэромеханика*. 2009. Т. 16, № 1. С. 43–56.
23. **Кулик В.М.** Динамическая податливость многослойных покрытий // *Теплофизика и аэромеханика*. 2016. Т. 23, № 4. С. 505–516.

*Статья поступила в редакцию 5 апреля 2018 г.,
после доработки — 5 апреля 2018 г.,
принята к публикации 1 августа 2018 г.*