

УДК 532.526.4

© 1991 г.

**Г. В. ЕНЮТИН, Ю. А. ЛАШКОВ, Н. В. САМОЙЛОВА,
И. В. ФАДЕЕВ, Е. А. ШУМИЛКИНА**

ВЛИЯНИЕ СКОСА ПОТОКА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕЛКОРЕБРИСТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В малотурбулентной аэродинамической трубе весовым методом проведено исследование влияния угла скоса набегающего потока по отношению к направлению ребер на снижение сопротивления трения оребренной поверхности. Показано, что увеличение угла скоса потока до $10\text{--}15^\circ$ практически не снижает эффективности оребрения. Рассмотрено воздействие относительного притупления Δ/s вершин (s — шаг оребрения) ребер на сопротивление трения: заметное снижение эффективности продольного оребрения наблюдается при $\Delta/s \geq 0,05$.

1. Одним из возможных способов снижения турбулентного трения является продольное микрооребрение поверхности. При этом высота ребер h и шаг оребрения s имеют величину порядка поперечных размеров пристеночных турбулентных вихревых структур.

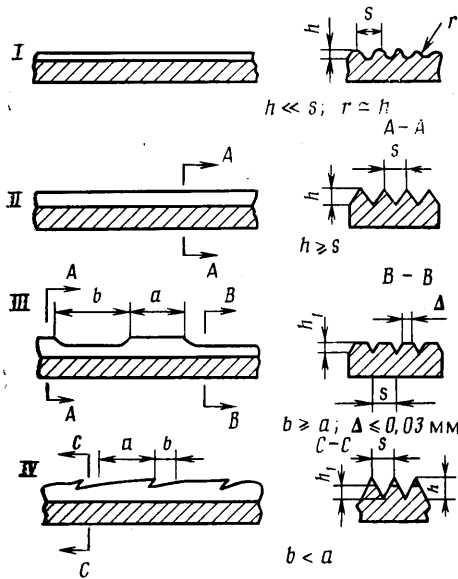
Измерения сопротивления трения на мелкорребристых поверхностях впервые были проведены Уолшем и Линдеманом [1, 2]. Максимальное снижение сопротивления турбулентного трения составляло 8%. К настоящему времени достаточно подробные исследования аэродинамических характеристик оребрения — «риблетов» описаны как в зарубежной, так и в отечественной литературе [3–4]. Авторами данной работы испытано свыше 50 моделей с различной геометрией оребрения. При этом наибольшее снижение трения достигало 8–10%.

Достаточно эффективное снижение сопротивления трения, полученное в лабораторных условиях, вызвало интерес к оребрению поверхности как возможному способу снижения сопротивления трения на практике. Были разработаны и запатентованы гибкие пленки с оребрением для оклеивания поверхности самолета. За рубежом опубликованы результаты натурных испытаний, а также данные о подготовке летных испытаний. При рассмотрении возможности применения оребренных поверхностей на самолете необходимо определить влияние на эффективность оребрения различных факторов, отличающих реальные условия обтекания от лабораторных. Авторами ранее были исследованы воздействия продольного градиента давления и внешней турбулентности на снижение поверхностного трения на риблетах. В данной работе исследовано влияние угла скоса потока α относительно направления ребер на сопротивление трения оребренной поверхности. Кроме того, изучено изменение эффективности оребрения при затуплении вершин ребер, что, вообще говоря, может происходить в процессе эксплуатации покрытия. Отметим, что ранее в [1] получены результаты для риблетов с высотой ребра $h=0,2$ и $0,3$ мм при углах скоса $\alpha=0, 15, 30^\circ$ и сделан вывод о том, что ребристые поверхности относительно нечувствительны к величине угла α вплоть до 15° (трение увеличивается всего на 1–2%). Однако при $\alpha=30^\circ$ снижение трения по сравнению с гладкими поверхностями вообще не наблюдалось.

Изложенные ниже результаты получены в малотурбулентной аэродинамической трубе с поперечным сечением рабочей части 1000×1000 мм

и длиной 4 м. Скорость потока U_∞ при испытаниях достигала 100 м/с. Среднеквадратичные значения продольных пульсаций скорости в ядре потока не превышали 0,02–0,04%. Базовая модель представляла собой пластину размерами 75×1000×3380 мм, которая устанавливалась горизонтально в среднем по высоте сечения рабочей части.

Для измерения силы поверхностного трения пластина была оборудована полупроводниковыми тензовесами с плавающим элементом размером 285×285 мм. Плавающий элемент размещался в люке, при этом зазор по периметру плавающего элемента составлял 0,015–0,05 мм. На плавающем элементе поочередно размещались исследуемая оребренная или эталонная гладкая поверхности. На расстоянии ≈ 1400 мм вверх по потоку от передней кромки плавающего элемента устанавливался турбулизатор в виде выступа размерами 3×20×1000 мм. Погрешность измерения снижения турбулентного трения в данных опытах составляла примерно 1%.



Фиг. 1

2. Исследование влияния угла скоса α потока на сопротивление трения проводилось на моделях с различной геометрией оребрения, показанных на фиг. 1. Геометрические размеры моделей приведены в таблице. Для изменения ориентации ребер относительно направления потока исследуемая поверхность на-

клеивалась на вращающийся относительно плавающего элемента диск диаметром 279,5 мм.

Методика обработки результатов весовых испытаний, а также базовая модель и тензовесы подробно описаны в [3, 4]. На основании прямых измерений силы трения F , а также измерений параметров потока определялись местный коэффициент трения c_f и число Рейнольдса Re_l . Величина отношения c_f оребренной поверхности к коэффициенту трения

Тип	Номер модели	s, мм	h, мм	h ₁ , мм	a, мм	b/a	Δ, мм
I	44	0,20	0,06	—	—	—	—
II	8	0,26	0,50	—	—	—	0,03
	48	0,20	0,20	—	—	—	0,02
III	15	0,26	0,25	0,18	0,5	1,5	0,07
	24	0,26	0,25	0,18	7,0	1,0	0,07
IV	18	0,26	0,25	0,10	0,5	0,5	0,16

c_{f_0} эталонной гладкой поверхности $c_f^0 = c_f / c_{f_0}$ при одинаковых значениях числа Рейнольдса $Re_l = U_\infty l / \nu$ (ν — кинематическая вязкость, l — эффективная длина) использовалась как критерий эффективности воздействия оребрения. Измеренные значения c_{f_0} предварительно аппроксимировались зависимостью вида

$$c_{f_0} = A [\lg(Re_l - c)]^m$$

где A , c , m — константы. Результаты измерения трения гладкой поверхности, как уже отмечалось ранее [3, 4], хорошо согласуются с известными экспериментальными данными.

Особенностью проведенных испытаний со скосом потока являлось то, что оребренной была не вся поверхность плавающего элемента, а лишь ее часть — поверхность круга. При обработке результатов предполагалось отсутствие взаимного влияния оребренной и гладкой частей поверхности плавающего элемента.

При указанном предположении, учитывая, что отношение площадей гладкой и оребренной частей поверхности равно 0,32, значение коэффициента трения оребренной поверхности c_f определялось на основании измеренного значения c_{f_2} и коэффициента трения гладкой пластины c_{f_0} по формуле

$$c_f = 1,32c_{f_2} - 0,32c_{f_0}$$

Значение c_{f_0} рассчитывалось с помощью указанной выше аппроксимации.

3. Результаты исследований влияния угла скоса потока α на эффективность риблетов представлены на фиг. 2–4. На фиг. 2 приведены зависимости $c_f^\circ(s^+)$ (где $s^+ = sU_\infty \sqrt{c_f}/2\nu$) при $\alpha = 0-90^\circ$ для модели № 48. Это модель со сплошным оребрением, образуемым ребрами треугольной формы в поперечном сечении, размерами $h=0,2$ мм, $h/s=1$ (фиг. 1).

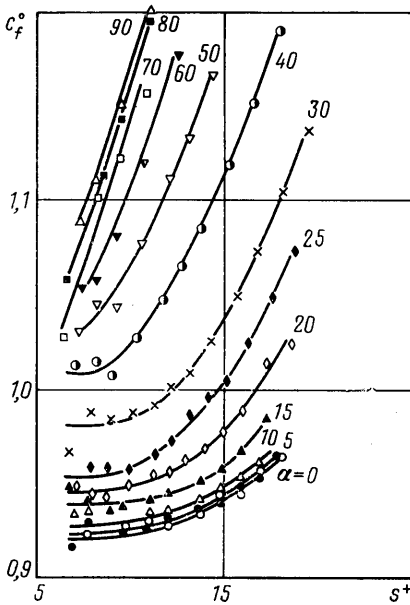
Видно, что кривые при $\alpha \leq 10^\circ$ практически совпадают, причем почти полное совпадение наблюдается в наиболее важной области s^+ , соответствующей минимуму c_f° . При увеличении α до 15° максимальный выигрыш в трении уменьшается на $\sim 1\%$, т. е., вообще говоря, в пределах точности эксперимента, однако это различие носит систематический характер. С дальнейшим увеличением α ($\alpha > 15^\circ$) выигрыш в трении падает более интенсивно и при $\alpha = 40^\circ$ данное оребрение вообще не снижает сопротивления трению по сравнению с гладкой поверхностью.

Эти результаты хорошо согласуются с данными [1], где также наблюдается лишь небольшое различие (1–2%) при $\alpha \leq 15^\circ$, однако в нашем случае при $\alpha = 30^\circ$ еще имеет место выигрыш в трении в отличие от [1], что, по-видимому, объясняется различием в геометрии рассматриваемых моделей.

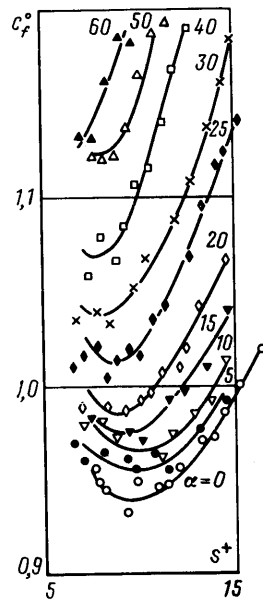
Аналогичные зависимости $c_f^\circ(s^+)$ при различных α для модели № 8 ($h=0,5$ мм) представлены на фиг. 3 ($h/s \approx 2$). В этом случае сопротивление трения чувствительнее к углу скоса потока α . Так, при $\alpha = 15^\circ$ максимальный выигрыш в трении снижается на 3%, причем уже при $\alpha = 22^\circ$ выигрыш в трении по сравнению с гладкой пластиной вообще исчезает. В [1] модели с аналогичным отношением h/s не рассматривались.

Из фиг. 2 и 3 видно, что минимумы зависимостей $c_f^\circ(s^+)$ с увеличением угла скоса потока α становятся все более острыми и смещаются в область меньших значений s^+ , при этом диапазон значений s^+ , где наблюдается выигрыш в трении ($c_f^\circ < 1$), сужаются.

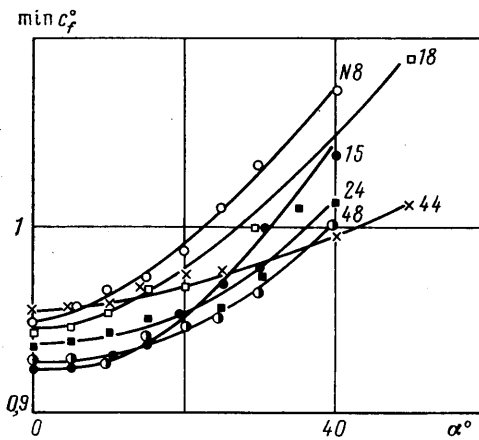
Максимальный выигрыш в трении (т. е. $\min c_f^\circ$) в зависимости от угла скоса потока α для всех исследованных шести моделей представлен на фиг. 4. Кривые на фиг. 4 построены на основании полиномиальной аппроксимации экспериментальных зависимостей $c_f^\circ(s^+)$. Из фиг. 4 видно, что чувствительность эффективности оребрения к углу α скоса потока зависит главным образом от отношения h/s . При малых значениях h/s ($h/s \approx 0,3$, модель № 44) характеристика наиболее пологая. При $h/s \approx 1$ наблюдается относительно слабая чувствительность сопротивления трения к скосу потока: эффективность снижается всего на 1–1,5% при $\alpha = 15^\circ$. Модель № 8 с относительно высоким ребром ($h/s \approx 2$), как уже отмечалось, заметно чувствительнее к углу скоса потока α . Кроме того,



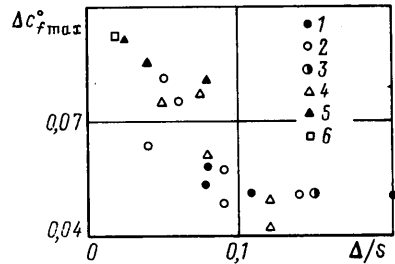
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

из фиг. 4 следует, что чем больше h/s , тем быстрее (с увеличением α) исчезает выигрыш в трении: с повышением h/s от 0,3 до 2 предельный угол α уменьшается от 42 до 22°.

В силу симметрии скалярных характеристик течения относительно $\alpha=0$ выигрыш в сопротивлении трения при малых значениях этого угла должен определяться четной степенью α , т. е. зависимость от α должна быть слабой, что и подтверждается полученными результатами. Однако геометрия оребренной поверхности определяет чувствительность характеристик оребрения к углу скоса потока.

Приведенные на фиг. 2–4 результаты измерений эффективности оребренных поверхностей представлены как функция параметра подобия s^+ , который наряду с h^+ , по мнению большинства исследователей, является основным параметром, определяющим эффективность оребрения заданной геометрии. В то же время результаты настоящих исследований показали, что при одинаковых значениях s^+ физически более мелкое, но

геометрически подобное оребрение дает меньший выигрыш в сопротивлении трения. Это может указывать на то, что на характеристики течения в пристеночной области наряду с параметром s^+ могут заметно влиять и другие параметры подобия (например, отношение h/δ , где δ — толщина пограничного слоя). Вместе с тем следует отметить, что обеспечить точное геометрическое подобие (в основном величину относительного притупления вершин) для оребрений различных размеров технологически невозможно.

Для изучения влияния степени затупления вершины ребра проведены параметрические испытания оребрения треугольной формы при одинаковых физических значениях s , но различных притуплениях Δ . На фиг. 5 точки 1 соответствуют моделям с шагом оребрения $s=0,1$ мм, точки 2—6 соответствуют $s=0,2, 0,23, 0,26, 0,32, 0,53$ мм. Из представленных на фиг. 5 результатов следует, что при относительной величине притупления $\Delta/s \leq 0,05$ выигрыш в трении Δc_f° уменьшается на величину, меньшую 1%. Дальнейшее увеличение притупления уже заметно ухудшает эффективность оребрения: так, при $\Delta/s=0,2$ величина Δc_f° снижается вдвое.

Относительное притупление наиболее мелкого оребрения ($h=s=0,1$ мм) в наших опытах достигало 0,1—0,15, что, учитывая результаты, представленные на фиг. 5, и объясняет более низкую эффективность (при одинаковых значениях s^+) оребрения с мелким шагом.

Таким образом, результаты проведенных исследований подтверждают, что основным критерием подобия, определяющим эффективность оребрения одинаковой геометрии (включая притупление), является параметр s^+ (или h^+). Другой важный для практических приложений вывод: ошутимая потеря эффективности оребрения наблюдается при $\Delta/s \geq 0,05$.

Следует отметить, что слабая чувствительность характеристик оребрения к скосу потока при малой относительной высоте ребра h/s , наблюдаемая на модели № 44 (фиг. 4), возможно, связана также с большим притуплением вершин у этой модели. Острые вершины ребер, повернутые под углом к потоку, способствуют, по-видимому, срыву вихрей и соответственно увеличению сопротивления трения. В целом, как показали результаты исследований, для наиболее эффективных оребренных поверхностей с малым притуплением вершин скос потока вплоть до $\alpha \approx 10^\circ$ практически не влияет на сопротивление трения.

Авторы выражают благодарность В. В. Михайлову за внимание к работе и ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walsh M. J., Lindemann A. M. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction // 22nd AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reno, Nevada, January 9—12, 1984. 10 с.
2. Снижение вязкостного трения/Под ред. Г. В. Хью. М.: Машиностроение, 1984. 464 с.
3. Енютин Г. В., Лашков Ю. А., Самойлова Н. В. и др. Экспериментальное исследование влияния продольного оребрения на сопротивление трения плоской пластины // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 2. С. 140—145.
4. Енютин Г. В., Лашков Ю. А., Самойлова Н. В. и др. Влияние продольного оребрения на сопротивление турбулентного трения // Уч. зап. ЦАГИ. 1988. Т. 19. № 4. С. 37—44.

Москва
Харьков

Поступила в редакцию
27.XII.1989