

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Н. Н. Зубков, А. Ф. Поляков, Ю. Л. Шехтер, Гидравлические характеристики пористых материалов для системы проникающего охлаждения, *ТВТ*, 2010, том 48, выпуск 2, 250–256

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.86

13 января 2025 г., 00:48:04



УДК 621.438

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПРОНИКАЮЩЕГО ОХЛАЖДЕНИЯ

© 2010 г. Н. Н. Зубков*, А. Ф. Поляков**, Ю. Л. Шехтер**

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Поступила в редакцию 26.12.2008 г.

В результате лабораторного и численного экспериментов впервые получены данные по гидравлическому сопротивлению и структуре течения в образцах листового пористого материала, изготовленного по оригинальной технологии двухстороннего деформирующего резания. Работа направлена на создание эффективной системы проникающего охлаждения с тангенциальным вдувом охлаждающего газа на микрошероховатую поверхность.

ВВЕДЕНИЕ

Для создания высокоэффективной системы проникающего пористого охлаждения требуется использование таких материалов и технологий, которые обеспечили бы стабильность и воспроизводимость гидравлических и тепловых характеристик оболочек в процессе изготовления и эксплуатации, а также их “предсказуемость” при проектировании. На первом этапе в качестве листового материала для системы проникающего охлаждения был исследован пористый сетчатый материал (ПСМ). Выполнен большой объем термомеханических, гидравлических и тепловых испытаний. Основным достоинством ПСМ является организованность и воспроизводимость его структуры. В то же время при использовании ПСМ для обеспечения распределенного вдува и тепловой защиты криволинейных поверхностей возникают серьезные трудности, которые порой являются непреодолимыми. Именно указанные требования необходимо учитывать при разработке систем проникающего охлаждения передней кромки лопаток газовых турбин, когда во внешнем потоке высокотемпературного газа реализуются большие градиенты давления. Новая уникальная технология деформирующего резания позволяет создать листовой пористый материал, не имеющий характерных для ПСМ недостатков.

Настоящая статья посвящена краткому описанию метода получения листового пористого материала двухстороннего деформирующего резания (ЛПМДР) и изложению результатов исследования его гидравлических характеристик. В частности, исследованы образцы со специальными тангенциальными выходными каналами, предназначенными для разработки высокоэффективной системы проникающего охлаждения передних кромок обтекаемых тел. Данные по гидравлическому со-

противлению ЛПМДР сравниваются с имеющимися результатами для ПСМ.

ЛИСТОВОЙ ПОРИСТЫЙ МАТЕРИАЛ ДУХСТОРОННЕГО ДЕФОРМИРУЮЩЕГО РЕЗАНИЯ

В МГТУ им. Н.Э. Баумана активно ведутся исследования нового метода формообразования, основой которого являются одновременно как процесс резания, так и процесс пластического деформирования [1, 2]. Метод получил название “деформирующее резание”. Использование такого метода, запатентованного в основных развитых странах [3], позволяет выйти на получение качественно новых характеристик проницаемых листовых материалов.

Метод деформирующего резания основан на лезвийной обработке и одновременном деформировании подрезанных поверхностных слоев заготовки с формированием мелкошаговых глубоких и узких канавок. Совокупность слоев, подрезанных главной режущей кромкой и не отделившихся от заготовки, образует поверхностный макро рельеф в виде ребер. Ширина канавок может составлять от единиц до сотен микрометров при глубине канавок, в десятки раз превышающей их ширину. Модель зоны резания представлена на рис. 1.

Получение проницаемой оболочки для последующего использования в проникающем охлаждении основано на обработке двух сторон металлической листовой заготовки методом деформирующего резания. Принцип получения проницаемой структуры заключается в формировании орбиты на обеих сторонах заготовки в перпендикулярных друг другу направлениях, при этом глубину резания при обработке каждой стороны необ-

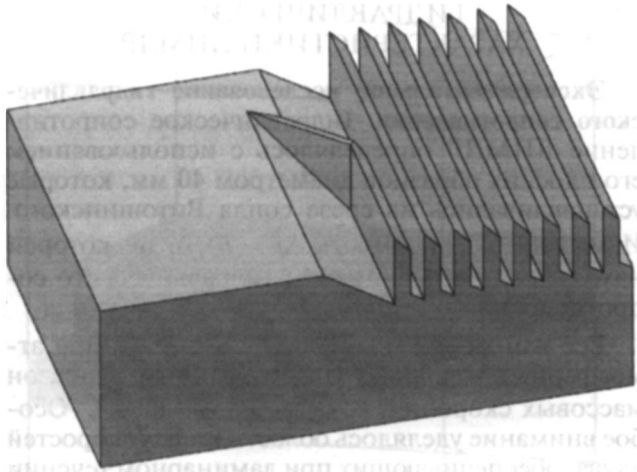


Рис. 1. Модель зоны резания.

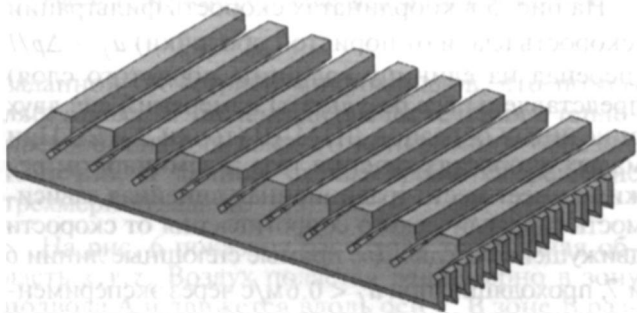


Рис. 3. Модель пористой оболочки с тангенциальными каналами.

ходимо назначать размером больше половины толщины обрабатываемого листа. В результате обработки получается пористая листовая структура с квадратной или прямоугольной формой отверстий в свету. На поверхности листа выход для охлаждающего газа имеет щелевую форму. Параметрическая модель структуры пористой оболочки показана на рис. 2. Данный метод позволяет формировать поверхности с распределенным вдувом и специальным образом организованной микрошероховатостью, включая тангенциальные выходные каналы. Такие геометрические параметры поверхности недостижимы ни для одного из существующих методов механической или физико-технической обработки. Управление расходными характеристиками получаемой пористой перегородки по ее площади можно осуществить, выполняя оребрение на одной или обеих сторонах листа с переменным шагом. Получение пористой оболочки с тангенциальными выходными каналами для охлаждающего газа возможно за счет создания наклонного оребрения на одной стороне листа, при этом

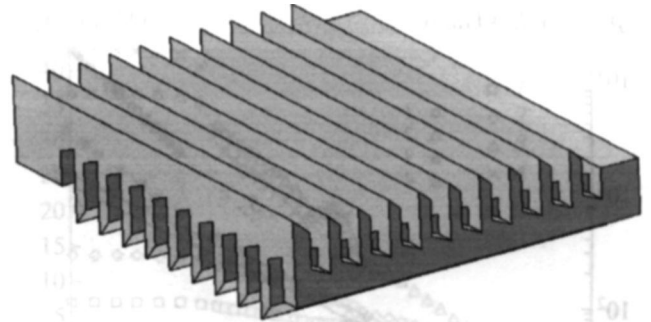


Рис. 2. Модель пористой оболочки.

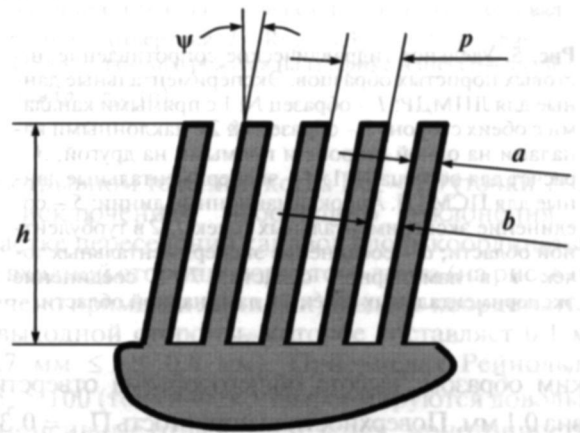


Рис. 4. Параметры ЛПМДР.

оребрение на другой стороне листа может быть выполнено без наклона (рис. 3).

При получении пористых перегородок методом деформирующего резания геометрические параметры, от которых зависят характеристики вдуваемого потока газа, полностью определяются параметрами оребренных структур, получаемых на противоположных сторонах листовой заготовки. Параметры оребренной структуры (рис. 4): p – шаг оребрения, ψ – наклон ребер к основанию, h – высота оребрения, a – толщина ребра. Важными параметрами являются также требуемая ширина канавки b и поверхностная пористость структуры Π , задаваемая отношением $\Pi = b/(p \cos \psi)$.

Толщина листовой заготовки из стали 03X17H14M3 для изготовления образца № 1 пористой оболочки (рис. 2) равнялась 0,3 мм. Обработка противоположных сторон листовой заготовки идентична. Обеспечено формирование оребрения с шириной межреберного зазора, составляющего 33% от величины шага, а именно $b = 83$ мкм. Шаг оребрения равен $p = 0,25$ мм. Высота ребер с одной стороны $h = 0,3$ мм, а с другой – $h = 0,4$ мм. Толщина готового образца составила $l = 0,6$ мм.

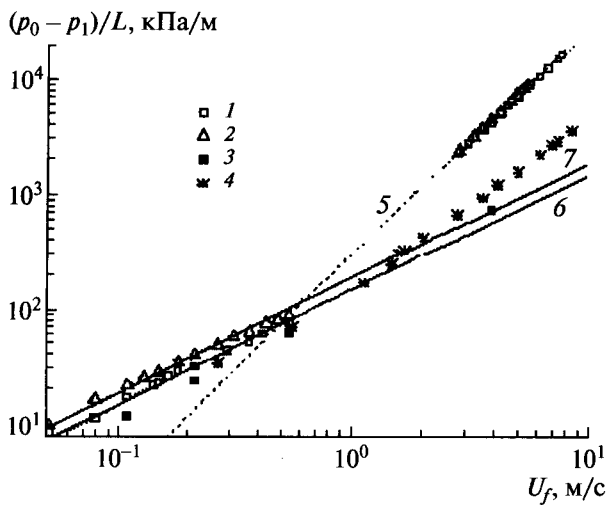


Рис. 5. Удельное гидравлическое сопротивление листовых пористых образцов. Экспериментальные данные для ЛПМДР: 1 — образец № 1 с прямыми каналами с обеих сторон; 2 — образец № 2 с наклонными каналами на одной стороне и прямыми на другой; 3 — расчет для образца № 1; 4 — экспериментальные данные для ПСМ [7]. Аппроксимационные линии: 5 — соединение экспериментальных точек 1, 2 в турбулентной области; 6 — соединение экспериментальных точек 1 в ламинарной области; 7 — соединение экспериментальных точек 2 в ламинарной области.

Таким образом, высота общего объема отверстий равна 0.1 мм. Поверхностная пористость $\Pi_{1s} = 0.33$. Объемная пористость, определенная как взвешиванием, так и расчетом по геометрии каналов, составляет $\Pi_1 = 0.37$.

Проверка возможности получения проницаемых перегородок с наклонными выходными каналами (для обеспечения тангенциального вдува охлаждающего газа) была осуществлена на модельном материале, обладающем большим запасом пластичности. В качестве модельного материала была выбрана медь марки М1 (образец № 2, рис. 3). Исходная толщина заготовки составляла 1.0 мм. На стороне листа с наклонным оребрением ширина щелевых выходов $b = 80$ мкм. Шаг оребрения равен $p = 0.5$ мм, наклон ребер $\psi = 43^\circ$. Высота наклонных ребер $h = 0.58$ мм. Оребрение на второй стороне листа выполнялось с вертикальным расположением ребер при ширине межреберного зазора, равной 0.365 мм. Шаг оребрения $p = 0.7$ мм. Высота прямых ребер $h = 1.22$ мм. Толщина проницаемого образца $l = 1.6$ мм. Высота общего объема отверстий составила 0.2 мм. Объемная пористость, определенная как взвешиванием, так и расчетом по геометрии каналов, равна $\Pi_2 = 0.5$.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛПМДР

Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления. Гидравлическое сопротивление ЛПМДР определялось с использованием его плоских образцов диаметром 40 мм, которые устанавливались на срезе сопла Витошинского. Измерялась зависимость $\Delta p = f(u_f)$, по которой находились коэффициенты гидравлического сопротивления.

Все измерения проведены с воздухом при атмосферных условиях. Исследованный диапазон массовых скоростей воздуха 0.05–8 кг/м²с. Особое внимание уделялось области малых скоростей вдува, обеспечивающих при ламинарном течении через пористый слой безотрывное вытекание охлаждающего газа в пограничный слой горячего газа в системе проникающего охлаждения.

На рис. 5 в координатах скорость фильтрации (скорость вдали от пористой оболочки) $u_f - \Delta p/l$ (перепад на единицу толщины пористого слоя) представлены все результаты измерений для двух описанных образцов ЛПМДР (точки 1 и 2). При малых скоростях течения газа в ламинарном режиме имеет место традиционная линейная зависимость гидравлического сопротивления от скорости движущейся среды. Две прямые сплошные линии 6 и 7, проходящие при $u_f < 0.6$ м/с через экспериментальные точки 1 и 2 соответственно, описываются зависимостями $\Delta p/l = c_1 u_f$, $c_1 = 150$, $c_2 = 190$. В инерционной области с отрывными течениями реализуется, как обычно, квадратичный закон. При этом наблюдается такая особенность. Если в линейной области удельное сопротивление для образца № 2 с наклонными каналами (точки 2) несколько выше, чем для образца № 1, то в квадратичной области данные для обоих образцов практически совпадают (линия 5). Возможно, при ламинарном течении различие связано с несколько большей длиной каналов в образце с наклонными каналами.

Численное моделирование структуры течения и сопротивления в микроканалах ЛПМДР. Наряду с лабораторным экспериментом выполнен численный эксперимент по анализу структуры течения и сопротивления в моделях ЛПМДР, аналогичных образцу № 1. Расчет трехмерного стационарного изотермического течения газа в микроканалах ЛПМДР проведен с использованием программного комплекса ANES, разработанного на кафедре ИТФ МЭИ (ТУ) В.И. Артемовым [4, 5]. В работе [6] с использованием ANES на примере щелевого пористого слоя выполнен численный эксперимент по структуре течения и теплообмену в пористом слое. В такой идеализированной постановке получено решение двумерной задачи. Однако ЛПМДР является реальным изделием со строго

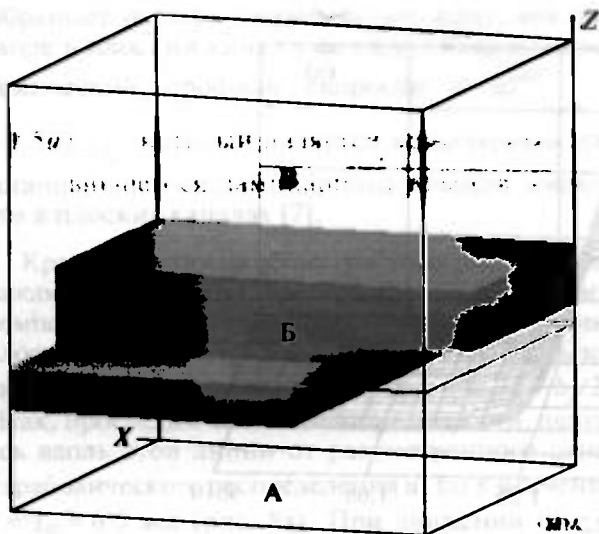


Рис. 6. Расчетный объем (пропорции не соблюдены).

заданной геометрией микроканалов, что позволяет провести численный расчет течения и теплообмена для каждого конкретного образца. Конечно, в данном случае требуется решение трехмерной задачи.

На рис. 6 показана расчетная трехмерная область x, y, z . Воздух подается равномерно в зону подвода А и движется вдоль оси z . В зоне В размещена четверть ячейки ЛПМДР – половина шага $(a + b)$ по обеим координатам x, y , а именно $(b_x/2 + a_x/2)$, $(a_y/2 + b_y/2)$ (см. рис. 2, 4). Зона В – истечение газа в свободный объем.

По боковым границам характерного элемента ЛПМДР задаются условия симметрии, т.е. нулевые значения производных всех трех компонент скорости.

На рис. 7 показаны распределения давления вдоль линии, проходящей через центр сквозного «квадратного» отверстия $x = 0, y = (a_y + b_y)/2$ от начала и до конца расчетной длины $(0 \leq z \leq L_0 + L + L_1)$. Числа Рейнольдса $Re_r = u_f d_e / (\nu)$ определяются по эквивалентному диаметру $d_e = 4V/S = 0.17$ мм, что очень близко к эквивалентному диаметру щелевых каналов на входе и выходе из пористого слоя $d_{e0} = d_{e1} = 2b = 0.16$ мм. Здесь V – полный объем каналов, S – смачиваемая поверхность, индексы 0 и 1 относятся ко входу в пористый слой и к выходу из него соответственно. Предвключенный участок (зона А) равен $L_0 = 0.5$ мм, толщина пористого слоя $L = 0.6$ мм (зона В), а участок отвода газа $L_1 = 1.0$ мм (зона В). На рис. 7 предвключенный и отводящий участки показаны укороченными. По всей толщине пористого слоя давление изменяется практически линейно при ламинарном

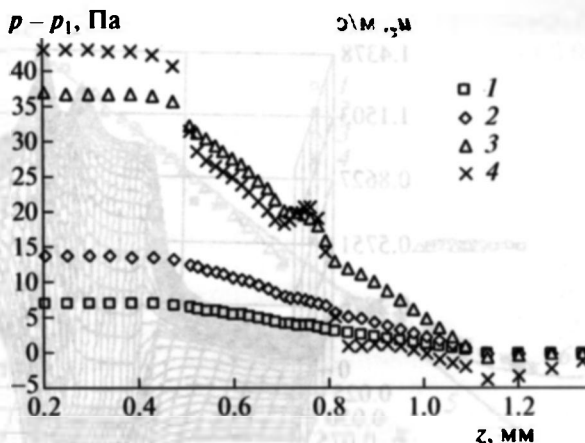


Рис. 7. Распределение давления вдоль координаты z на линии, проходящей через центр сквозного «квадратного» отверстия: 1 – $Re_r = 3.3$, 2 – 6.5, 3 – 16.6, 4 – 118 (для данного режима на графике нанесены значения $(p - p_1)/10$).

безотрывном течении, когда $Re_r < 20$ (точки 1–3), за исключением небольшого отклонения на участке пересечения канавок вдоль координаты y со входной стороны пористого листа (на рис. 6 отмечено прямыми линиями) и вдоль координаты x с выходной стороны, которое составляет 0.1 мм $(0.7 \text{ мм} \leq z \leq 0.8 \text{ мм})$. При числах Рейнольдса $Re_r > 100$ (точки 4), когда формируются довольно интенсивные отрывные течения, монотонность в изменении давления отсутствует. Вблизи выхода газа из пористого слоя наблюдается существенное падение давления даже по сравнению с давлением вдали от выхода p_1 , принятого за величину отсчета. Точки 4 демонстрируют качественную картину гидродинамики при относительно больших числах Рейнольдса, однако принятая методика численного эксперимента не позволяет строго отследить разномасштабные вихревые течения в этом случае, несмотря на то, что для рассматриваемого режима итерационный счет сошелся. Такая ситуация, естественно, отражается и на интегральной величине перепада давления по толщине пористого слоя. Об этом свидетельствует приведенное на рис. 5 рассчитанное значение удельного перепада давления в данном режиме (точка 3 при $u_f = 3.9$ м/с), которое значительно (фактически на порядок) меньше экспериментальной величины. В то же время при $Re_r < 20$ расчетные точки $(p_0 - p_1)/L$ близки к экспериментальным. Несколько большие экспериментальные значения связаны, очевидно, с влиянием краевых эффектов по периметру закрепления опытного образца в сопловой аппарат. В расчетах же этот эффект не учитывался, так как рассматривалась симметричная ячейка во внутренней части образца. Более того, предметом нашего интереса явля-

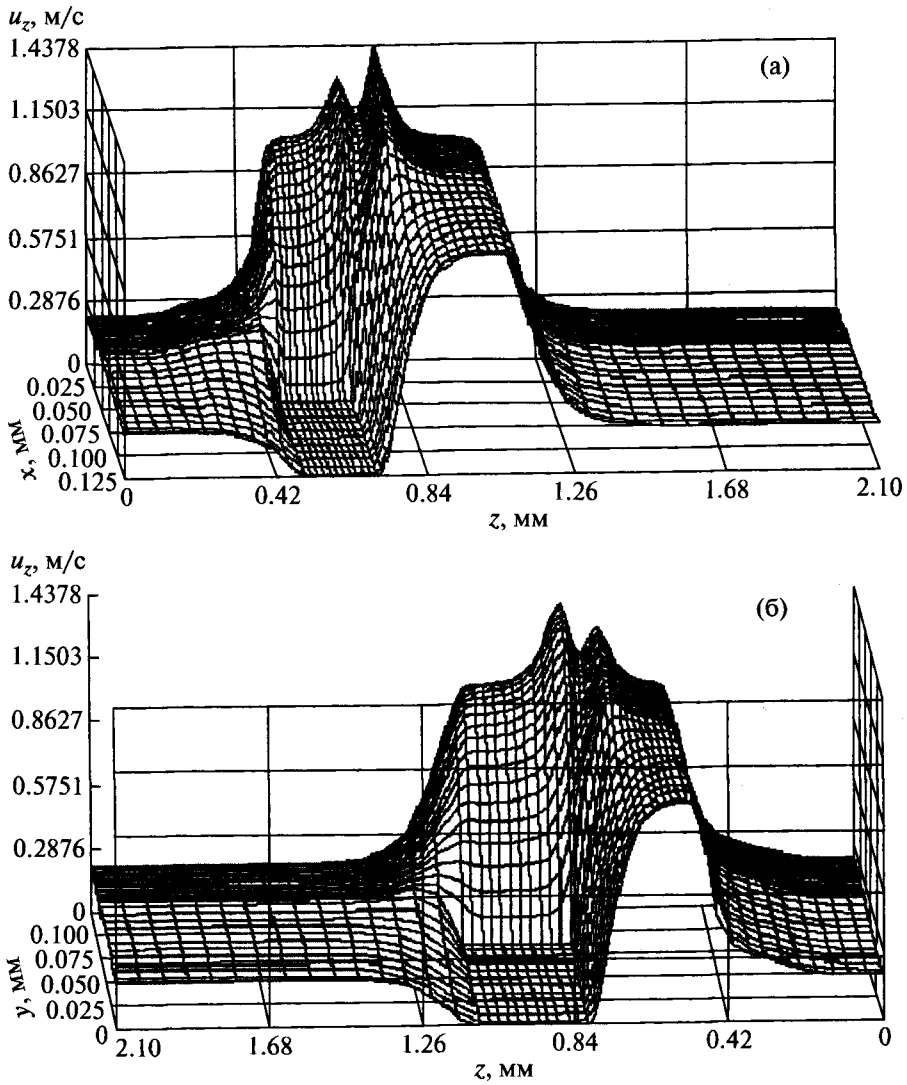


Рис. 8. Распределения продольной компоненты скорости при $Re_e = 6.5$ в плоскостях, проходящих через ось сквозного канала: (а) – плоскость симметрии выходного канала ($y = a/2 + b/2$), (б) – плоскость симметрии входного канала ($x = 0$).

ется разработка эффективной системы проникающего охлаждения, которая не допускает отрывов потока газа на обтекаемой поверхности. Таким образом, рабочими в данном случае будут режимы с $Re_e < 20$.

На рис. 8 показаны распределения компоненты скорости u_z в двух плоскостях, проходящих через плоскости симметрии выходного канала – плоскость $x - z$ при $y = (a_y/2 + b_y/2)$ (рис. 8а) и входного канала – плоскость $y - z$ при $x = 0$ (рис. 8б). Темные полосы с более густой сеткой проходят по каналам в пористом слое. Начнем с рассмотрения плоскости, проходящей через входной канал (рис. 8б). В начале рассматриваемой плоскости, как и по всей поверхности $z = 0$, задана однородная величина скорости $u_0 \equiv u_f = 0.215$ м/с. При

входе в канал ($z = 0.5$ мм) скорость существенно увеличивается, так как поверхность втекания газа меньше общей площади, а именно среднее значение скорости втекания газа в пористый слой $\bar{u}_z|_{z=L_0} = u_0(a+b)^2/(b(a+b)) = 0.215 \times 0.25/0.08 = 0.67$ м/с. На рис. 8б при $z = L_0 = 0.5$ мм величина $u_z \approx 1$ м/с однородна в плоскости симметрии входного канала, а распределение u_z поперек входного канала по координате x при этом значении z показано на рис. 8а. На стенке канала ($x = b_x/2 = b/2 = 0.04$ мм) значение $u_z = 0$. Минимальная толщина листа со стороны входа (нижняя часть на рис. 6) $h_0 = 0.2$ мм показана на рис. 8а стороной с нулевым значением скорости $u_z = 0$ вдоль координаты z ($0.5 \leq z \leq 0.7$ мм, $0.04 \leq x \leq 0.125$ мм).

Обращает на себя внимание тот факт, что при входе в плоский канал уже сформирован параболический профиль скорости с $u_z^{\max}|_{z=L_0} = 1.5\bar{u}_z|_{z=L_0}$, который является характерным для установившегося ламинарного течения жидкости в плоских каналах [7].

Крайние линии на обоих графиках рис. 8 с двумя пиками характеризуют распределение продольной компоненты скорости вдоль линии пересечения плоскостей симметрии каналов, т.е. центральной линии сквозного отверстия ($x = 0, y = a_y/2 + b_y/2$). Итак, проследим за изменением скорости, двигаясь вдоль этой линии от рассмотренного ранее параболического распределения u_z по x в сечении $z = L_0 = 0.5$ мм (рис. 8а). При движении от $z = 0.5$ мм до $z = 0.7$ мм, выделенного на рис. 6 сплошной линией, распределение u_z деформируется за счет увеличения максимума, значение которого достигает величины $u_z^{\max} \cong 1.25$ м/с. Это происходит в результате поступления газа вдоль оси y из-под верхней полки пористой пластины, о чем можно судить по рис. 8б. После выхода из нижней полки на расстоянии 0.1 мм до подхода к верхней полке, т.е. от 0.7 до 0.8 мм, существует общее свободное пространство пересечения нижнего (вдоль y) и верхнего (вдоль x) каналов. В этой области максимум u_z несколько уменьшается в начале раскрытия каналов, а затем резко увеличивается до $u_z^{\max} \cong 1.44$ м/с за счет уменьшения свободной поверхности при входе в зону верхней полки. Верхняя полка толщиной 0.3 мм, показанная на рис. 8б прямоугольником с $u_z = 0$, находится в диапазоне $0.8 \leq z \leq 1.1$ мм. На выходе из верхнего канала скорость, равномерная вдоль канала, поперек канала имеет практически то же параболическое распределение (рис. 8б, $z = 1.1$ мм), что и на входе в пористый слой (рис. 8а, $z = 0.5$ мм).

Положительным фактором является то, что, несмотря на наличие ограниченного сквозного отверстия, скорость перед выходом из пористого слоя выравнивается вдоль канала. Выравнивание скорости выхода газа из пористого слоя по всей его поверхности происходит на расстоянии от поверхности, равном приблизительно 0.25 мм (рис. 8а, 8б). При использовании ЛПМДР с тангенциальными выходными отверстиями, макетом чего является экспериментально исследованный образец № 2, можно с уверенностью говорить о еще более плавном выходе газа на обтекаемую поверхность. Однако для более детального выяснения картины течения газа на поверхности с тангенциальными отверстиями требуется проведение специальных экспериментов по исследованию структуры пристенного течения.

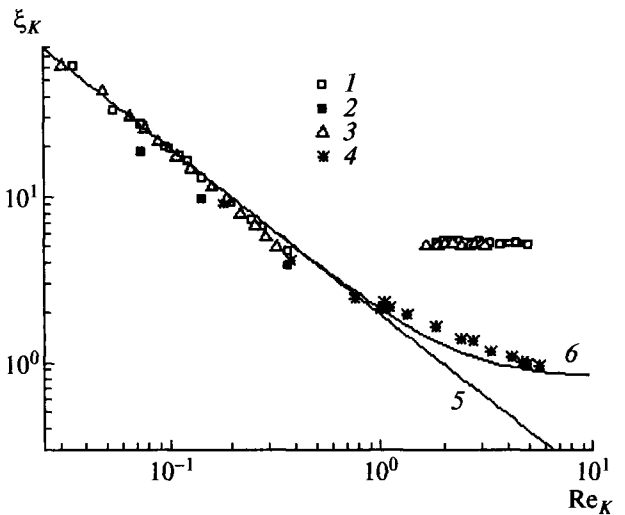


Рис. 9. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса: 1 – образец ЛПМДР № 1 с прямыми каналами с обеих сторон; 2 – результаты численного решения для образца № 1; 3 – образец ЛПМДР № 2 с наклонными каналами на одной стороне и прямыми на другой; 4 – экспериментальные данные для ПСМ [7]; 5 – $\xi_K = 2/Re_K$ (1); 6 – по расчетной зависимости, предложенной в [9] для параметров, соответствующих экспериментальным точкам 4.

АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ ОБОЛОЧКОВЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работах [8–10] исследованы гидравлические характеристики листового ПСМ. Гидравлическое сопротивление ПСМ в широком диапазоне чисел Рейнольдса обобщено в [10] с использованием коэффициента проницаемости K [м²]. Традиционные соотношения для гидравлического сопротивления с использованием \sqrt{K} в качестве характерного линейного масштаба примут вид

$$\Delta p/L = (p_0 - p_1)/L = (1/K)\mu u_0 + B\mu u_0^2 = (\xi_K/\sqrt{K})(\rho u_0^2/2), \quad (1)$$

$$\xi_K = (2/Re_K) + 2B\sqrt{K}, \quad (2)$$

где $Re_K = u_0\sqrt{K}/\nu$. Равенство в (1) представляет собой обобщенное уравнение Дарси, в котором $(1/K)$ – вязкостный коэффициент и B – инерционный коэффициент, а второе равенство записано с использованием общего коэффициента гидравлического сопротивления ξ .

Коэффициенты проницаемости для испытанных образцов ЛПМДР № 1 и № 2, определенные по опытным данным, представленным на рис. 5, составляют $K_1 = 1.2 \times 10^{-10}$ м² и $K_2 = 0.94 \times 10^{-10}$ м² соответственно.

Для образца ПСМ из сетки с квадратной ячейкой № 014 при степени обжатия в процессе горя-

чей прокатки $\varepsilon = 0.4$ средний размер пор равняется 0.09 мм, пористость $\Pi_{net} \cong 0.5$ и коэффициент проницаемости $K_{net} = 1.2 \times 10^{-10} \text{ м}^2$ [8, 10]. Все указанные параметры для выбранного образца ПСМ и испытанного в данной работе образца ЛПМДР № 1 близки.

Наряду с данными для ЛПМДР на рис. 5 нанесены экспериментальные данные по удельному перепаду давления на выбранном образце ПСМ (точки 4). В области ламинарного течения точки 4 совпадают с данными для ЛПМДР № 1, однако в ПСМ ламинарное течение сохраняется при несколько больших скоростях течения газа. На рис. 9 в координатах (2) более четко видны особенности изменения гидравлического сопротивления ЛПМДР и ПСМ. В ЛПМДР установление постоянных значений коэффициента гидравлического сопротивления в турбулентной области происходит значительно раньше, чем в ПСМ, при этом его величины в первом случае существенно больше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые получены данные о гидравлическом сопротивлении и структуре течения газа в листовом пористом материале, изготовленном по оригинальной технологии двухстороннего деформирующего резания.

При одних и тех же размерах пор в режиме ламинарного течения газа удельные сопротивления листовых пористого материала двухстороннего деформирующего резания и пористого сетчатого материала совпадают. Однако ламинарное течение в первом случае реализуется при меньших значениях числа Рейнольдса. При турбулентном течении для обоих материалов коэффициенты гидравлического сопротивления автомодельны относительно расхода газа, однако для ЛПМДР они существенно больше, чем для ПСМ.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты №№ 07-08-12136-офи, 06-08-00146-а, 09-08-00151-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зубков Н.Н.* Особенности реализации метода деформирующего резания // *Технология машиностроения.* 2001. №1. С. 19.
2. *Зубков Н.Н., Слепцов А.Д.* Получение микросеток и проницаемых щелевых труб механической обработкой // *Изв. вузов. Машиностроение.* 2007. № 3. С. 56.
3. Pat. 5775187 USA, Int. Cl. B23B 17/00. Method and Apparatus Producing a Surface with Alternating Ridges and Depressions / Zoubkov N.N. (РФ), Ovtchinnikov A.I. (РФ). № 545640. 1998.
4. *Артемов В.И., Макаров М.Е., Муров А.Г. и др.* Численное моделирование процессов тепломассопереноса в системе ANES // *Тр. ММФ-92.* Минск: Изд-во ИТМО, 1992.
5. *Артемов В.И., Яньков Г.Г., Карпов В.Е., Макаров М.Е.* Численное моделирование процессов тепло- и массообмена в элементах теплотехнического и энергетического оборудования // *Теплоэнергетика.* 2000. № 7. С. 52.
6. *Леонтьев А.И., Поляков А.Ф.* Моделирование внутреннего теплообмена в пористой проницаемой оболочке при малых числах Рейнольдса // *ТВТ.* 2008. Т. 46. № 6. С. 881.
7. *Петухов Б.С.* Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967. 411 с.
8. *Зейгарник Ю.А., Поляков А.Ф., Сухорученко С.Ю., Шехтер Ю.Л.* Гидравлические характеристики оболочек из пористых материалов // *ТВТ.* 1996. Т. 34. № 6. С. 924.
9. *Поляков А.Ф., Сухорученко С.Ю., Шехтер Ю.Л.* Структура ламинарного выхода газа из пористой сетчатой вставки // *ТВТ.* 2000. Т. 38. № 2. С. 284.
10. *Поляков А.Ф., Стратьев В.К., Сухорученко С.Ю. и др.* Структура и обобщенные гидравлические характеристики оболочек из пористых сетчатых материалов // *Изв. РАН. Энергетика.* 2000. № 3. С. 118.