

Технология и технологические машины

УДК 532.546


DOI 10.18698/0536-1044-2016-2-42-52

Гидравлическое сопротивление пористых металлов

Ф.В. Пелевин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Hydraulic Resistance of Porous Metals

F.V. PelevinBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: pelfv@rambler.ru

i Использование в теплообменных устройствах пористых сетчатых металлов (ПСМ) и организация межсеточного движения теплоносителя сквозь ПСМ — один из перспективных и эффективных способов интенсификации теплообмена и уменьшения гидравлических потерь. Приведены экспериментальные данные о вязкостных и инерционных коэффициентах сопротивления различных ПСМ, изготовленных методом диффузионной сварки в вакууме тканых сеток из хромоникелевой стали, никеля, меди, инвара при одномерной и двумерной фильтрации однофазного теплоносителя. Получены экспериментальные данные исследования гидравлического сопротивления пакетов тканых сеток и пористых сетчатых металлов при межсеточной и ортогональной фильтрации теплоносителя к плоскости сеток. Установлено, что на гидравлическое сопротивление ПСМ влияют пористость, тип переплетения и номер сетки, направление фильтрации теплоносителя относительно плоскости сетки и наличие механической обработки поверхности ПСМ.

Ключевые слова: пористый сетчатый металл, гидравлическое сопротивление, одномерная и двумерная межсеточная фильтрация теплоносителя, анизотропия.

i The use of porous mesh metals in heat exchanger apparatus and the creation of intermesh flow of the coolant through porous mesh metal are promising and efficient ways of intensifying heat exchange and decreasing hydraulic losses. The author of the article presents experimental data on viscous and inertial resistance coefficients of various porous metals manufactured of chrome-nickel steel, nickel, copper, and invar wire cloth using the diffusion vacuum welding method with one- or two-dimensional one-phase coolant filtration. Experimental data was obtained from studying the hydraulic resistance of packets of wire cloth and porous mesh metals under the coolant intermesh and orthogonal filtration to the mesh plane. It has been established that the hydraulic resistance of the porous mesh metal is affected by porosity, mesh type and mesh number, direction of the coolant filtration in relation to the mesh plane, and surface machining of the porous mesh.

Keywords: porous mesh metal, hydraulic resistance, one- and two-dimensional intermesh coolant filtration, anisotropy.

Пористые металлы (ПМ) широко применяют в технике как фильтрующие материалы и материалы для систем тепловой защиты, а также в теплообменных аппаратах (ТА). В рекуперативных ТА (РТА) ПМ используют прежде всего из-за высокой интенсификации теплообмена в пористых теплообменных трактах. Кроме того, ПМ увеличивают прочность и жесткость ТА. Одной из основных причин ограниченного применения ПМ в ТА и системах охлаждения является их высокое гидравлическое сопротивление при продольно-канальном движении теплоносителя сквозь ПМ и большой протяженности теплообменного тракта. У ПМ коэффициенты гидравлического сопротивления в тысячи, а иногда в десятки тысяч раз больше, чем у гладкого канала. Указанные обстоятельства объясняют интерес к исследованию гидравлического сопротивления в пористых металлах.

Одним из перспективных и эффективных способов интенсификации теплообмена и уменьшения гидравлических потерь в ПМ является принцип межканальной транспирации теплоносителя (МКТТ) с межсеточным движением теплоносителя сквозь пористый сетчатый металл (ПСМ). Применение принципа МКТТ сквозь ПСМ снижает потери давления в пористом теплообменном тракте РТА [1], что наряду с высокой теплопередачей делает этот тип РТА высокоэффективным [2].

На рис. 1 приведена схема РТА с МКТТ. Схема движения теплоносителя в тракте с МКТТ сквозь ПСМ рассмотрена в работе [1].

Эффективность пористого РТА с МКТТ во многом определяется типом пористого металла и технологией его изготовления. ПСМ обладает самой высокой прочностью среди ПМ [3, 4], высоким объемным внутрипоровым теплообменом [5], прогнозируемостью и стабильностью гидравлических характеристик [3], высокой теплопроводностью [6]. ПСМ используют в промышленности в качестве капиллярных систем отбора жидкости из баков космических двигательных установок, в смесительных головках жидкостных ракетных двигателей и как материалы для систем тепловой защиты [7]. Но технология их получения методом горячей прокатки нескольких слоев сеток [3] не позволяет получить элементы крупных осесимметричных заготовок, которые необходимы для РТА и систем охлаждения. ПСМ, изготовленные методом диффузионной сварки металличе-



Рис. 1. Схема РТА с МКТТ:
1 — фланец; 2 — вставка из ПСМ; 3 — корпус; 4 — подводящий и отводящий коллекторы; 5 — внутренняя стенка; 6 — подводящие и отводящие каналы

ских сеток в вакууме (рис. 2) [8], отвечают этим требованиям, но мало изучены. В связи с этим исследуем такие ПСМ.

Экспериментальное исследование и анализ гидравлического сопротивления пакетов сеток и пористых сетчатых металлов при одномерной фильтрации теплоносителя. В настоящее время известны различные ПМ: пористые порошковые материалы (ППМ), пористые волоконные материалы, ПСМ, пористые материалы из проволочных спиралей, высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ), комбинированные пористые проницаемые материалы. Каждый ПМ имеет только ему присущие параметры, в том числе вязкостный α и инерционный β коэффициенты сопротивления. Для ПМ характерны очень высокие значения объемной поверхности теплообмена $S_v = (4-20) \cdot 10^3$ ($\text{м}^2/\text{м}^3$) и чрезвычайно высокая интенсивность теплообмена между проницаемой пористой матрицей и протекающим сквозь нее теплоносителем из-за достаточно развитой поверхности их соприкосновения, а также большое гидравлическое сопротивление [1, 9, 10].

Для использования в теплообменных трактах ПМ должен обладать следующими свойствами:

- минимальным гидравлическим сопротивлением в направлении движения теплоносителя;
- высокой теплопроводностью в направлении воздействия теплового потока;
- высокой удельной и ударной прочностью, необходимой для изготовления тонкостенных (3...5 мм) протяженных осесимметричных оболочек;

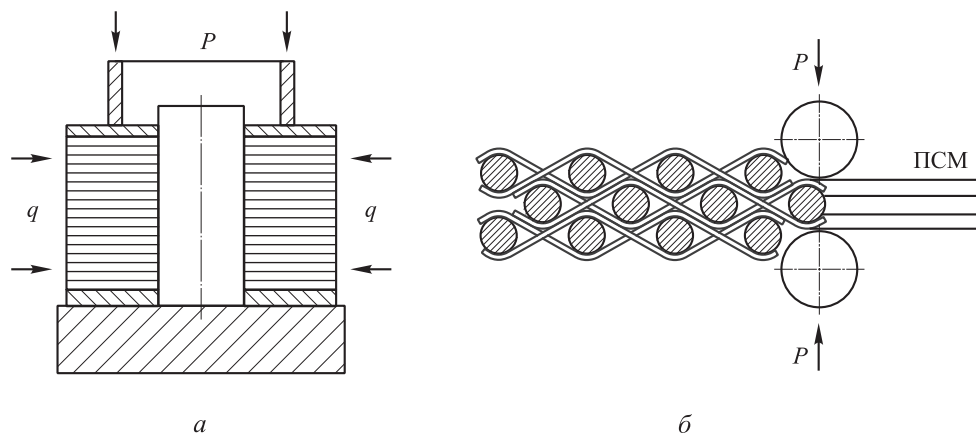


Рис. 2. Методы изготовления ПСМ:
а — диффузионно-вакуумная сварка сеток; б — прокатка пакета сеток

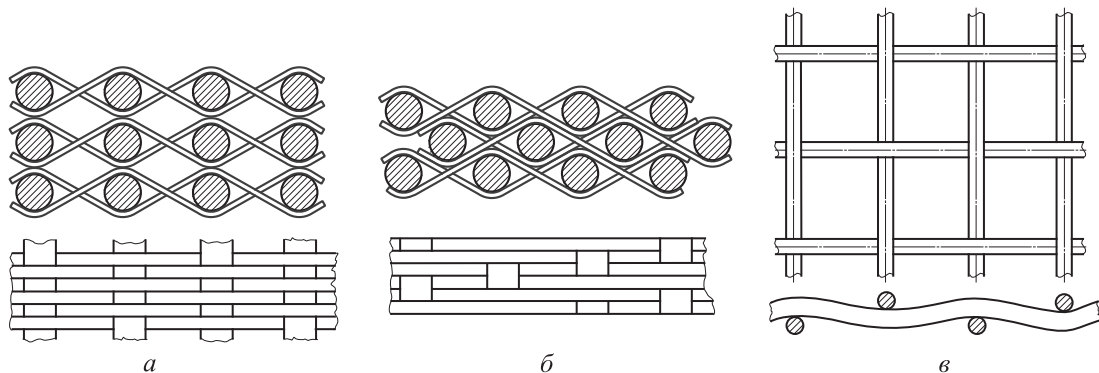


Рис. 3. Тканые сетки — фильтровая полотняная (а), фильтровая саржевая (б), с квадратной ячейкой простого переплетения (в) — и пакеты из них

• равномерной микроструктурой и стабильной проницаемостью.

Эти свойства присущи ПСМ, изготовленным методом диффузионной сварки тканых фильтровых сеток в вакууме.

Ввиду сложности точного определения размера пор в пакетах сеток и в ПСМ при исследовании гидравлического сопротивления пакетов сеток и ПСМ определялись вязкостный α и инерционный β коэффициенты пористой среды по методу, предложенному Ю.В. Ильиным. Используя эти коэффициенты, входящие в модифицированное уравнение Дарси, можно с большой точностью определять потери давления в ПМ:

$$(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/l = \alpha\mu v + \beta\rho v^2,$$

где $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$ — соответственно давление на входе в ПМ и выходе из ПМ; l — путь фильтрации теплоносителя через ПМ (толщина ПМ); μ — коэффициент динамической вязкости теплоносителя; ρ — плотность теплоносителя; v — скорость фильтрации теплоносителя,

отнесенная к полному сечению канала без учета заполнения площади проходного сечения ПМ.

ПСМ с одной и той же пористостью можно получить из сеток с разными типом переплетения и номером (рис. 3). Номенклатура сеток огромна, поэтому вначале выборочно исследовали сетки с разным типом переплетения и номером. Пакеты сеток и ПСМ, для которых получены наилучшие результаты, исследовали подробно.

Пакеты сеток. Для пористых РТА пакеты сеток не являются конструктивным материалом, поскольку сетки не связаны между собой. Однако изучение гидравлического сопротивления пакетов сеток позволяет узнать те минимальные коэффициенты сопротивления, которые будут у ПСМ с пористостью, близкой к пористости пакета недеформированных тканых сеток.

При движении теплоносителя сквозь ПСМ может измениться направление его фильтрации относительно плоскости сеток. Поэтому экспериментальные данные по гидравлическо-

му сопротивлению получены при одномерном течении теплоносителя в пакетах тканых плотняных фильтровых сеток П24, П60 и саржевых фильтровых сеток С120, С200, С600/2200 (ГОСТ 3187-76) при межсеточной и ортогональной плоскости сеток фильтрации теплоносителя (табл. 1). Пакеты и ПСМ из вязанных сеток подробно не исследовали, поскольку у них коэффициент вариации средних размеров больше, чем у ПСМ из тканых сеток.

Установлена анизотропия гидравлического сопротивления пакетов сеток. Инерционный коэффициент сопротивления при межсеточной фильтрации теплоносителя имеет меньшее значение, чем при ортогональной плоскости сеток фильтрации теплоносителя. Рост коэффициентов сопротивления α и β наблюдается не толь-

ко при снижении пористости сетки, но и при увеличении числа основ и утков тканой фильтровой сетки (при уменьшении диаметра проволоки).

Уменьшение сопротивления связано и со способом укладки сеток в пакет. У фильтровых тканых сеток при межсеточной фильтрации теплоносителя и при угле φ между основами соседних сеток, отличном от 0° , диаметр поровых каналов увеличивается, а коэффициенты сопротивления α и β уменьшаются (табл. 2).

Установлено, что у сеток из мелкопористой саржевой сетки С120 коэффициенты сопротивления пакетов на порядок больше, чем у пакетов крупнопористых плотняных сеток П60, П24 (см. табл. 1.). При межсеточной фильтрации теплоносителя число сеток в пакете не

Таблица 1

Коэффициенты сопротивления пакетов сеток при межсеточной (||) и ортогональной (⊥) плоскости сеток фильтрации теплоносителя

Пористость сетки	Тип переплетения и номер сетки	Число сеток в пакете	Направление фильтрации	Угол между сетками φ , град	Коэффициенты сопротивления пакетов сеток	
					$\alpha, \text{м}^{-2} \cdot 10^{-8}$	$\beta, \text{м}^{-1} \cdot 10^{-3}$
0,71	П24	7		90	15,1	0,8238
0,65	П60	10		90	7,615	2,159
0,41	С120	16		90	162,9	22,01
0,71	П24	9	⊥	0	36,99	8,553
0,65	П60	6	⊥	45	1,117	3,850
		4			—	3,667
0,41	С120	2	⊥	45	118,6	25,83
		1			70,2	25,88
0,31	С200	3	⊥	45	226,0	100,1
		1			113,6	80,89
0,32	С600/2200	4	⊥	Произвольный	1 016,9	248,4
		2			1 011,0	196,6
		1			877,45	168,5

Таблица 2

Влияние угла φ между соседними сетками на коэффициенты сопротивления

Тип переплетения и номер сетки	Число сеток в пакете	Угол между сетками φ , град	Коэффициенты сопротивления пакетов сеток	
			$\alpha, \text{м}^{-2} \cdot 10^{-8}$	$\beta, \text{м}^{-1} \cdot 10^{-3}$
П24	6	0	19,27	2,806
П24	7	90	15,1	0,8238
П60	14	0	95,34	27,56
	10	90	7,615	2,159
С120	14	0	229,1	35,17
	16	90	162,9	22,01

влияет на гидравлическое сопротивление. При ортогональной плоскости сеток фильтрации теплоносителя наблюдается рост коэффициентов сопротивления с увеличением числа сеток. У крупных сеток типа П60 этот рост незначителен (менее 5 %). Следует отметить, что пакеты сеток могут изменять свои размеры при переменных нагрузках, а это приведет к изменению коэффициентов сопротивления.

Из табл. 1 и 2 следует, что минимальное гидравлическое сопротивление наблюдается у пакетов из сеток полотняного переплетения П24, П60 при межсеточной фильтрации теплоносителя и при угле φ , отличном от 0° . Следовательно, наименьшее гидравлическое сопротивление ПСМ, изготовленных методом диффузионной сварки сеток в вакууме с пористостью, близкой к пористости исходной сетки, предполагается у ПСМ, выполненных из сеток типа П24, П60, при межсеточной фильтрации теплоносителя и при угле $\varphi > 0^\circ$.

Пористые сетчатые металлы. В работе приведены результаты исследования по определению коэффициентов сопротивления ПСМ, изготовленных методом диффузионной сварки в вакууме хромоникелевых (12Х18Н9Т) тканых фильтровых сеток П24, П60, С120, С600/2200 (ГОСТ 3187–76) и тканых сеток с квадратной ячейкой простого переплетения 0,7 и 0,8 при одномерной межсеточной фильтрации теплоносителя и при фильтрации теплоносителя ортогонально плоскости сеток в диапазоне пористости 0,2–0,707. Коэффициенты сопротивления ПСМ определяли на пористых образцах, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда с квадратным основанием при угле φ смещения между основами соседних фильтровых сеток, равном 45° . При таком угле в осесимметричных пористых оболочках обеспечивается практически равномерная радиальная теплопроводность пористой оболочки. Проницаемость наружной поверхности пористых образцов после механической обработки восстанавливали электрохимическим методом. Коэффициенты сопротивления ПСМ определяли при температуре фильтруемого воздуха 280...290 К.

При межсеточной фильтрации воздуха даже при малых скоростях фильтрации ($v < 2...4$ м/с; $l = 9,9$ мм) наблюдается переходный режим движения теплоносителя, переходящий в турбулентный с увеличением скорости фильтрации.

С уменьшением пористости образцов и диаметра поровых каналов турбулентный режим движения наступает при меньших скоростях фильтрации. При турбулентном режиме движения наблюдается квадратичная зависимость градиента давления в ПСМ от скорости фильтрации. При фильтрации дистиллированной воды через ПСМ в диапазоне скоростей фильтрации $v = 0,01...0,07$ м/с наблюдается ламинарный режим движения

$$\Delta P/l = \alpha \mu v,$$

переходящий в переходный и турбулентный.

Для газообразных теплоносителей в этом диапазоне удельных расходов $\rho v = 70$ кг/(м²·с) наблюдается турбулентный режим течения.

В табл. 3–7 приведены результаты экспериментальных исследований коэффициентов сопротивления ПСМ, изготовленных методом диффузионной сварки в вакууме нержавеющей хромоникелевых (12Х18Н9Т) тканых фильтровых сеток П24, П60, С120, никелевой саржевой сетки С600/2200, хромоникелевых (12Х18Н9Т) сеток с квадратной ячейкой 0,8, медных сеток с квадратной ячейкой 0,7.

Исследовалось гидравлическое сопротивление ПСМ при межсеточной и ортогональной плоскости сеток фильтрации теплоносителя.

Коэффициенты сопротивления ПСМ, изготовленных методом диффузионной сварки в вакууме тканых полотняных и саржевых фильтровых сеток, отличаются от других ПМ стабильностью гидравлического сопротивления,

Таблица 3

Коэффициенты сопротивления ПСМ из тканых фильтровых сеток при межсеточной фильтрации теплоносителя

Пористость ПСМ	Тип переплетения и номер сетки	Коэффициент сопротивления ПСМ	
		$\alpha, \text{м}^{-2} \cdot 10^{-9}$	$\beta, \text{м}^{-1} \cdot 10^{-4}$
0,291	П60	33,1	16,96
0,337	П60	19,36	13,4
0,416	П60	5,08	7,69
0,455	П60	3,91	3,41
0,463	П60	3,87	2,6
0,476	П60	3,6	1,42
0,302	С120	116,66	37,35
0,324	С120	94,44	25,6
0,200	С600/2200	1 400	14 000

Таблица 4

Коэффициенты сопротивления ПСМ из тканых сеток — с квадратной ячейкой, вязаной и саржевой С200

Тип сетки	Пористость ПСМ	Направление фильтрации	Коэффициент сопротивления ПСМ	
			$\alpha, \text{м}^{-2} \cdot 10^{-9}$	$\beta, \text{м}^{-1} \cdot 10^{-4}$
КЯ 0,7	0,530		27,11	4,937
		⊥	18,39	4,189
КЯ 0,7	0,535		19,04	4,329
		⊥	22,36	4,052
КЯ 0,8	0,582	⊥	21,11	0,920
			0,7283	0,8958
		⊥	3,82	0,564
КЯ 0,8	0,707		7,724	0,5301
		⊥	8,816	0,2303
Вязаная сетка	0,612	⊥	6,171	1,325
С200	0,323	⊥	86,8	62,64

Примечание. КЯ — сетка с квадратной ячейкой.

так как они выполнены из стандартных сеток (ГОСТ 3187–76) с известными и стабильными характеристиками.

Различная пористость образцов, изготовленных диффузионной сваркой пакетов из одинаковых сеток, объясняется различными степенью нагрева пакета в индукционной печи и давлением сжатия пакета сеток. С повышением степени деформации пакета сеток уменьшается объем пор и увеличиваются коэффициенты сопротивления ПСМ.

Тканые фильтровые сетки по структуре и свойствам анизотропны, поэтому важно, как собираются их пакеты для последующей диффузионной сварки. Для исследования гидравлической анизотропии ПСМ испытывали пористые образцы из полотняной сетки в форме прямоугольного параллелепипеда с квадратом в основании 9,9×9,9 мм и длиной 65...69 мм (рис. 4), а также образцы в форме куба 9,9×9,9×9,9 мм. На рис. 4, б видны основы и утки фильтровой полотняной сетки. В качестве фильтруемой среды использовался воздух. Диапазон изменения массовой скорости

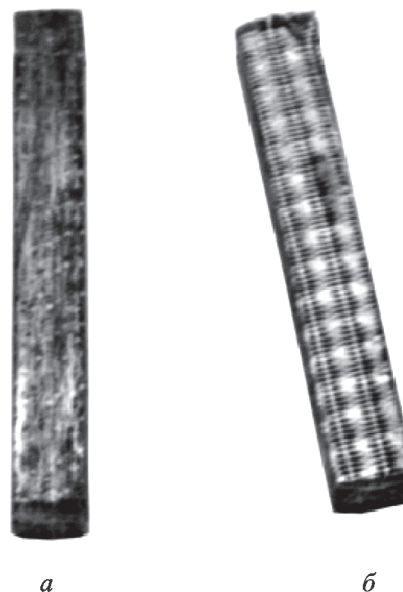


Рис. 4. Образцы ПСМ из полотняной сетки: а — вид на ПСМ с восстановленной проницаемостью при межсеточной фильтрации; б — вид на ПСМ при ортогональной плоскости сетки фильтрации теплоносителя

2...24 кг/(м²·с). Анализ результатов гидравлического сопротивления ПСМ показал, что ПСМ, как и пакеты сеток, — анизотропный материал. Например, для ПСМ из сетки П60 с пористостью $\Pi = 0,48$ при фильтрации теплоносителя ортогонально (⊥) плоскости сеток и при межсеточной (||) фильтрации отношение коэффициентов сопротивления составило $\alpha_{\perp}/\alpha_{||} = 2,7$ и $\beta_{\perp}/\beta_{||} = 2,4$. Отношение коэффициентов сопротивления ПСМ при ортогональной и межсеточной фильтрации теплоносителя приведены в табл. 5.

В табл. 6 приведены данные по анизотропии гидравлического сопротивления ПСМ из полотняной сетки П24.

Анализ приведенных данных показал, что заполнение теплообменного тракта ПСМ с меж-

Таблица 5

Отношение коэффициентов сопротивления ПСМ при ортогональной (⊥) и межсеточной (||) фильтрации теплоносителя

Пористость ПСМ	Тип сетки	Отношение коэффициентов сопротивления ПСМ	
		$\alpha_{\perp}/\alpha_{ }$	$\beta_{\perp}/\beta_{ }$
0,29	П60	1,9	105
0,3	С120	1,5	2,6
0,32	С120	1,3	2,5
0,256	П24	1,6	2,14

Таблица 6

Анизотропия гидравлического сопротивления ПСМ, изготовленного из полотняной сетки П24

Пористость ПСМ	Тип сетки	Направление фильтрации	Коэффициент сопротивления ПСМ	
			$\alpha, \text{м}^{-2} \cdot 10^{-9}$	$\beta, \text{м}^{-1} \cdot 10^{-4}$
0,214	П24	⊥	210	266
0,214	П24		120,64	58,48
0,235	П24	⊥	133,3	149,6
0,235	П24		88,08	51,86
0,247	П24	⊥	120,2	111,9
0,247	П24		75	46,14
0,256	П24	⊥	95,83	90,92
0,256	П24		59,68	42,44
0,386	П24	⊥	22,7	8,51
0,386	П24		8,221	3,611
0,412	П24	⊥	16,22	7,833
0,412	П24		7,945	3,363

точной фильтрацией теплоносителя позволяет уменьшить потери давления в тракте, заполненном ПСМ, при прочих равных условиях.

ПСМ из сетки с квадратной ячейкой простого переплетения (см. табл. 4) практически изотропны из-за способа переплетения проволок и хаотической укладки сетки в пакетах. Диаметр проволоки у медной сетки с квадратной ячейкой 0,7 равен 0,1 мм, у нержавеющей сетки с квадратной ячейкой 0,8 — 0,2 мм, а у вязаной сетки из инвара — 0,1 мм. Несмотря на высокую пористость, ПСМ из сетки с квадратной ячейкой и диаметром проволоки 0,1 мм имеет более высокие коэффициенты сопротивления, чем ПСМ из фильтровой тканой сетки П24 или П60. Это объясняется высокоразвитой внутренней структурой ПСМ из сетки с квадратной ячейкой. У ПСМ из сетки с квадратной ячейкой инерционный коэффициент при межсеточной фильтрации больше, чем при ортогональной. Гидравлическое сопротивление ПСМ из сетки с квадратной ячейкой нестабильно вследствие сдвига отдельных проволочек в сетке и произвольной ее укладки. Следовательно, для трактов с МКТТ ПСМ из этой сетки использовать не рекомендуется.

Как и у других ПМ, у ПСМ при межсеточной фильтрации теплоносителя сопротивление уменьшается с увеличением пористости образ-

цов. Так, увеличение пористости с 0,29 до 0,48 для ПСМ из сетки П60 приводит к уменьшению коэффициентов сопротивления α и β на порядок. Для уменьшения потерь давления в теплообменном пористом тракте или для увеличения скорости фильтрации теплоносителя при заданном перепаде давления необходимо применять ПСМ с максимально большой пористостью, которая ограничена пористостью исходной сетки и прочностными требованиями, предъявляемыми к ПСМ. Для получения ПСМ с большой пористостью и малым гидравлическим сопротивлением необходимо использовать крупнопористые сетки полотняного типа П60–П24 с пористостью 0,65–0,71, что позволяет изготовить ПСМ пористостью 0,4–0,5. Изготовление ПСМ с такой пористостью из сетки с низкой пористостью типа С120 невозможно.

Из табл. 3, 4 видно, что гидравлическое сопротивление ПСМ зависит не только от пористости, но и от типа сетки. Для исследования влияния типа сетки на гидравлическое сопротивление ПСМ при одинаковой пористости изготовлены и испытаны образцы из нержавеющей полотняной П60 и саржевой С120 сеток. При одинаковой пористости ($\Pi \approx 0,3$) гидравлическое сопротивление ПСМ при межсеточной фильтрации теплоносителя из более крупнопористой полотняной сетки П60 меньше, чем из сетки С120: $\alpha_{\text{С120}}/\alpha_{\text{П60}} = 3,9$; $\beta_{\text{С120}}/\beta_{\text{П60}} = 2,3$. ПСМ из саржевой сетки С120 имеет более сложную внутреннюю структуру с высокоразвитой поверхностью. При использовании ПСМ из более мелкопористой саржевой сетки С600/2200 наблюдается дальнейшее увеличение гидравлического сопротивления:

$$\frac{\alpha_{\text{С600}}}{\alpha_{\text{П60}}} = 7; \quad \frac{\beta_{\text{С600}}}{\beta_{\text{П60}}} = 92.$$

Пористость образцов составляла 0,2–0,22.

Достоинствами применения крупнопористой фильтровой сетки полотняного переплетения для изготовления ПСМ являются:

- меньшее гидравлическое сопротивление при одинаковой пористости;
- возможность получения ПСМ с высокой пористостью.

ПСМ после механической обработки имеют повышенное гидравлическое сопротивление за счет затирания пор инструментом. В табл. 7 приведены экспериментальные данные для образцов без вскрытия пористости. Значительное увеличение коэффициентов сопротивления по-

Таблица 7

Коэффициенты сопротивления ПСМ без вскрытия пористости

Пористость ПСМ	Тип сетки	Направление фильтрации	Коэффициент сопротивления ПСМ	
			$\alpha, \text{м}^{-2} \cdot 10^{-9}$	$\beta, \text{м}^{-1} \cdot 10^{-4}$
0,214	П24		241	208
0,247	П24		199,5	63
0,386	П24		11,36	5,48

сле механической обработки наблюдается у образцов с малой пористостью ($\Pi = 0,214$). С увеличением пористости ПСМ гидравлическое сопротивление уменьшается. Для ПСМ из сетки П24 при межсеточной фильтрации после механической обработки (без вскрытия пористости) получены следующие зависимости коэффициентов сопротивления от пористости:

$$\alpha = 6,651 \cdot 10^7 \cdot \Pi^{-5,479}; \quad \beta = 173,68 \cdot \Pi^{-5,993},$$

где пористость $\Pi = 0,214-0,386$.

Необходимо проводить восстановление проницаемости обработанной пористой поверхности. Если это невозможно, то рекомендуется использовать только ПСМ с пористостью, близкой к пористости исходной сетки.

Коэффициенты сопротивления ПСМ из сетки П60 с восстановленной проницаемостью при межсеточной фильтрации теплоносителя можно обобщить полиномом четвертой степени:

$$\alpha = (-5,148\Pi^4 + 7,917\Pi^3 - 4,409\Pi^2 + 1,034\Pi - 0,0824) \cdot 10^{13};$$

$$\beta = (3,345\Pi^4 - 5,232\Pi^3 + 3,022\Pi^2 - 0,7718\Pi + 0,07531) \cdot 10^8,$$

где $\Pi = 0,291-0,476$.

Для ПСМ из сетки П24 при межсеточной фильтрации теплоносителя получены зависимости

$$\alpha = 1,439 \cdot 10^8 \cdot \Pi^{-4,403};$$

$$\beta = (-8,9857\Pi^4 + 12,06\Pi^3 - 5,812\Pi^2 + 1,159\Pi - 0,07546) \cdot 10^8.$$

Результаты исследования гидравлического сопротивления для ПСМ из сетки П24 при ортогональной фильтрации теплоносителя можно обобщить следующими зависимостями:

$$\alpha = 5,888 \cdot 10^8 \cdot \Pi^{-3,779};$$

$$\beta = 516,75\Pi^{-5,507},$$

где пористость $\Pi = 0,214-0,412$.

Значения коэффициентов сопротивления α и β при межсеточной фильтрации теплоносителя у всех испытанных образцов более чем в десять раз меньше, чем у ППМ той же пористости [3]. Это можно объяснить низкой шероховатостью (1 мкм) холоднокатаной проволоки, меньшей извилистостью поровых каналов и регулярностью структуры.

Исследовали также гидравлическое сопротивление медного ВПЯМ как возможного материала для пористого наполнителя теплообменных трактов. Несмотря на высокую пористость ($\Pi = 0,75$) и большой средний диаметр пор ($d_{cp} \approx 1,5$ мм), коэффициенты сопротивления α и β у ВПЯМ больше, чем у ПСМ, что можно объяснить высокой шероховатостью внутренней поверхности, извилистостью поровых каналов и нерегулярностью структуры ($\alpha = 2,27 \cdot 10^9$; $\beta = 1,95 \cdot 10^5$). В работе [10] отмечено еще большее гидравлическое сопротивление ВПЯМ, что, вероятно, связано с введением среднего диаметра пор в зависимости по определению коэффициентов α и β и нерегулярностью структуры ВПЯМ.

Результаты исследования гидравлического сопротивления ПСМ, изготовленного из сетки П60, при межсеточной фильтрации теплоносителя удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными для ПСМ из полотняной сетки П72.

Результаты исследования гидравлического сопротивления ПСМ при двумерной межсеточной фильтрации теплоносителя. В трактах с МКТТ при двумерной межсеточной фильтрации теплоносителя зависимости между скоростью фильтрации теплоносителя в ПСМ и градиентом давления качественно остаются такими же, что и при одномерной межсеточной фильтрации теплоносителя. При фильтрации воды наблюдается ламинарный режим течения, с увеличением скорости фильтрации — переходный. При фильтрации воздуха в тех же трактах наблюдается турбулентный режим течения. С уменьшением пористости ПСМ и диаметра поровых каналов турбулентный режим течения наступает при меньших скоростях фильтрации теплоносителя.

При двумерной межсеточной фильтрации теплоносителя наблюдается увеличение коэффициентов сопротивления ПСМ по сравнению с одномерной (рис. 5). Это объясняется неоднородностью массовой скорости теплоносителя

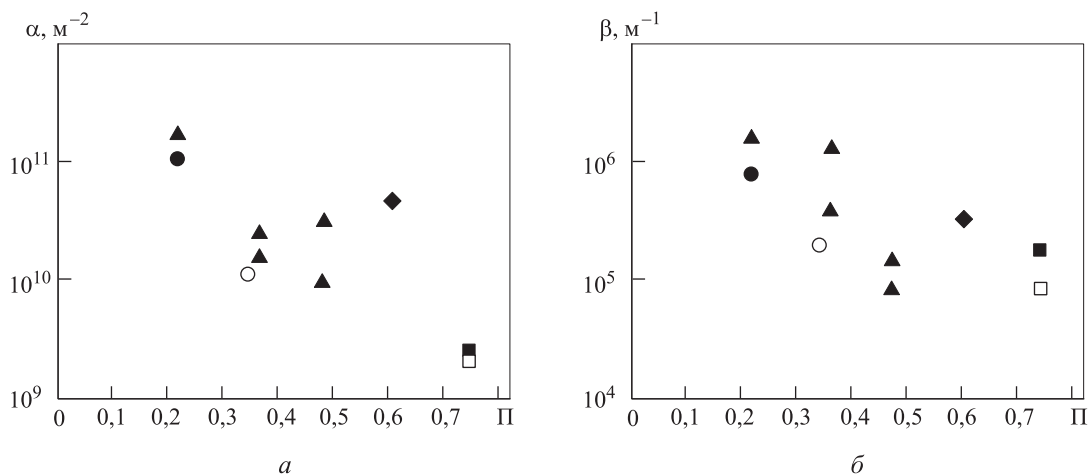


Рис. 5. Вязкостные (а) и инерционные (б) коэффициенты сопротивления ПСМ при двумерной межсеточной фильтрации теплоносителя:

▲ — ПСМ П60, ○ — ПСМ П24, ● — ПСМ С120, □ — ВПЯМ ($\Pi = 0,751$; $\delta = 4,9$ мм); ■ — ВПЯМ ($\Pi = 0,751$; $\delta = 5,25$ мм); ◆ — ПСМ из сетки с квадратной ячейкой 0,7 ($\Pi = 0,61$)

по толщине δ пористого наполнителя. В ПСМ с малыми пористостью и отношением l/δ большая часть расхода теплоносителя движется у наружной оболочки, фактическая площадь проходного сечения тракта уменьшается, что приводит к увеличению перепада давления и коэффициентов сопротивления α и β . С ростом отношения l/δ сопротивление уменьшается и приближается к сопротивлению ПСМ при одномерном движении. К потерям давления в ПСМ добавляются потери давления при течи теплоносителя в подводящих и отводящих каналах тракта с МКТТ, которые складываются из потерь на трение теплоносителя о стенки каналов и потерь от смешения струй при подводе и отводе теплоносителя через проникаемую поверхность канала.

При двумерной межсеточной фильтрации теплоносителя в тракте с МКТТ подтверждена тенденция к уменьшению коэффициентов сопротивления ПСМ с уменьшением номера (числа основ) сетки и увеличением пористости ПСМ. Как и при одномерной фильтрации, уменьшение номера исходной сетки ПСМ приводит к снижению коэффициентов сопротивления, хотя пористость ПСМ остается примерно такой же. Однако эта тенденция наблюдается до определенных границ по величине пористости ПСМ и степени деформации ПСМ. Так, при пористости ПСМ из сетки П60 $\Pi = 0,22$ коэффициенты α и β превышают коэффициенты сопротивления ПСМ из сетки С120 той же пористости, хотя при $\Pi \geq 0,3$ наблюдается обратная зависимость коэффици-

ентов сопротивления от пористости. Это объясняется тем, что получение материалов малой пористости ($\Pi \leq 0,22$) из крупнопористой сетки П60 сопровождается сильными деформациями исходного пакета сеток с одновременным уменьшением сечения поровых каналов, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления ПСМ.

Вследствие двумерности течения теплоносителя в трактах с МКТТ коэффициенты сопротивления ПСМ при одинаковой пористости зависят от отношения l/δ и толщины δ пористой вставки.

Например, у ПСМ из сетки П60 ($\Pi = 0,37$) с ростом δ от 3 до 5,6 мм и у ПСМ с пористостью $\Pi = 0,48$ при δ , равной 2 и 3 мм, коэффициенты сопротивления увеличиваются (см. рис. 5). Эта тенденция наблюдается и в трактах с ВПЯМ. При увеличении толщины медного ВПЯМ ($\Pi = 0,751$) от 4,9 до 5,25 мм и уменьшением отношения l/δ коэффициенты сопротивления повышаются.

Выводы

1. Показана зависимость гидравлического сопротивления пакетов сеток от пористости, типа переплетения и номера сетки, направления фильтрации теплоносителя и угла между соседними сетками. Установлено, что на гидравлическое сопротивление ПСМ влияют не только пористость, но и тип переплетения, и номер сетки, а также направление фильтрации газа относительно плоскости сетки и

наличие механической обработки поверхности ПСМ.

2. ПСМ, изготовленные методом диффузионной сварки в вакууме тканых полотняных фильтровых сеток типа П24 и П60, по сравнению с ПСМ, выполненными из других типов сеток, имеют минимальные коэффициенты сопротивления при межсеточной фильтрации теплоносителя. Восстановление проницаемости ПСМ после механической обработки поверхности уменьшает вязкостный и инерционный коэффициенты сопротивления ПСМ.

3. Установлена анизотропия свойств ПСМ, что необходимо учитывать при проектировании РТА и других средств тепловой защиты.

4. Оптимальное сочетание высокой прочности, хорошей технологичности, малого гидравлического сопротивления и стабильности коэффициентов сопротивления позволяют рекомендовать этот материал для использования его в качестве пористого наполнителя в РТА с МКТТ.

Литература

- [1] Леонтьев А.И., Пилюгин Н.Н., Полежаев Ю.В., Поляев В.М., ред. *Научные основы технологий 21 века*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 136 с.
- [2] Пелевин Ф.В., Пономарев А.В. Эффективность теплообмена в пористых сетчатых металлах при двумерном движении теплоносителя. *Тепловые процессы в технике*, 2014, т. 6, № 1, с. 41–48.
- [3] Белов С.В., ред. *Пористые проницаемые материалы: справочник*. Москва, Metallurgia, 1987. 335 с.
- [4] Синельников Ю.И., Третьяков А.Ф., Матурин Н.И., Колесников А.Г., Панов А.Д., Макарошкин В.И. *Пористые сетчатые материалы*. Москва, Metallurgia, 1983. 64 с.
- [5] Зейгарник Ю.А., Иванов Ф.П. Обобщение опытных данных по внутреннему теплообмену в пористых структурах. *Теплофизика высоких температур*, 2010, т. 48, № 3, с. 402–408.
- [6] Polyakov V.M., Gorbatsky A.A. Thermal Conductivity of Porous Latticed Materials. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1992, № 5, pp. 417–424.
- [7] Леонтьев А.И., Поляков А.Ф. Тепловое состояние пористой стенки при проникающем охлаждении. *Теплофизика высоких температур*, 2006, т. 44, № 1, 98 с.
- [8] Резник С.В., ред. *Конструкционные пористые материалы. В кн.: Материалы и покрытия в экстремальных условиях. В 3 т. Т. 2: Передовые технологии производства*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 296 с.
- [9] Зейгарник Ю.А., Иванов Ф.П. К оценке теплогидравлических характеристик пористых структур. *Тр. 5 Рос. нац. конф. по теплообмену*. Москва, МЭИ, В 8 т. 2010. Т. 5, с. 172–175.
- [10] Кирсанов Ю.А., Назипов Р.А., Башкирцев Г.В. Теплообмен и сопротивление при течении однофазного теплоносителя в высокопористой вставке. *Тр. 5 Рос. нац. конф. по теплообмену*. Москва, МЭИ, В 8 т. 2010. Т. 5, с. 176–179.

References

- [1] *Nauchnye osnovy tekhnologii 21 veka* [Scientific bases of technology of the 21 century]. Ed. Leont'ev A.I., Piliugin N.N., Polezhaev Iu.V., Poliaev V.M. Moscow, Bauman Press, 2000. 136 p.
- [2] Pelevin F.V., Ponomarev A.V. Effektivnost' teploobmena v poristykh setchatykh metallakh pri dvumernom dvizhenii teplonositel'ia [Efficiency of Heat Exchange in Porous Mesh Materials at Two-Dimensional Motion of Coolant]. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering]. 2014, vol. 6, no. 1, pp. 41–48.
- [3] *Poristye pronitsaemye materialy: spravochnik* [Porous permeable materials: handbook]. Eds. Belov S.V. Moscow, Metallurgiiia publ., 1987. 335 p.
- [4] Sinel'nikov Iu.I., Tret'iakov A.F., Maturin N.I., Kolesnikov A.G., Panov A.D., Makarochkin V.I. *Poristye setchatye materialy* [The porous mesh material]. Moscow, Metallurgiiia publ., 1983. 64 p.

- [5] Zeigarnik Yu.A., Ivanov F.P. Generalization of experimental data on internal heat transfer in porous structures. *High Temperature*, 2010, vol. 48, no. 3, pp. 382–387.
- [6] Polyayev V.M., Gorbatovsky A.A. Thermal Conductivity of Porous Latticed Materials. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1992, no. 5, pp. 417–424.
- [7] Leontiev A.I., Polyakov A.F. The thermal state of a porous wall under conditions of transpiration cooling. *High Temperature*, 2006, vol. 44, no. 1, pp. 99–107.
- [8] *Konstruksionnye poristye materialy. V kn. Materialy i pokrytiia v ekstremal'nykh usloviakh. V 3 t. T. 2. Peredovye tekhnologii proizvodstva* [Structural porous materials. The book materials and coatings under extreme conditions. In 3 vol. Vol. 2. Advanced production technology]. Ed. Reznik S.V. Moscow, Bauman Press, 2002. 296 p.
- [9] Zeigarnik Iu.A., Ivanov F.P. K otsenke teplogidravlicheskiykh kharakteristik poristykh struktur [Estimation of thermal-hydraulic characteristics of porous structures]. *Trudy 5 Rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu* [Proceedings of the 5 Russian National Conference on Heat Transfer]. Moscow, MEI publ., 2010, vol. 5, pp. 172–175.
- [10] Kirsanov Iu.A., Nazipov R.A., Bashkirtsev G.V. Teploobmen i soprotivlenie pri techenii odnofaznogo teplonositel'ia v vysokoporistoi vstavke [Heat transfer and resistance in the flow of coolant in the high single-pole insertion]. *Trudy 5 Rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu* [Proceedings of the 5 Russian National Conference on Heat Transfer]. Moscow, MEI publ., 2010, vol. 5, pp. 176–179.

Статья поступила в редакцию 02.12.2015

Информация об авторе

ПЕЛЕВИН Федор Викторович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pelfv@rambler.ru).

Information about the author

PELEVIN Feodor Viktorovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: pelfv@rambler.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография

М.А. Шолохова

«Траекторные задачи при автоматической и роботизированной сварке»

Применение новых видов материалов и технологий в сварочном производстве приводит к повышению требований к качеству сварных конструкций, что, в свою очередь, требует использования новых, более прогрессивных видов сварочного оборудования и систем контроля, обеспечивающих заданные свойства готовой продукции.

Приведены новейшие достижения в разработке систем слежения при сварке, классификация систем слежения, принципы их работы, область применения.

Издание предназначено для инженерно-технических работников, занимающихся созданием сварочных технологий, комплексов и оборудования, а также может быть использовано в качестве справочного пособия для подготовки специалистов по сварке.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru