НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА
НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ
Эл № ФС 77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408
электронный научно-технический журнал

Теплофизические свойства проницаемых элементов на основе пористых сетчатых материалов

 # 05, май 2012
DOI: 10.7463/0512.0400624

Третьяков А. Ф.

УДК 621.762.86

Россия, МГТУ им. Н.Э.Баумана
tretyakov@bmstu.ru

Введение

Пористые материалы, применяемые для изготовления сварных конструкций, помимо таких характеристик, как проницаемость, тонкость фильтрования, прочность, коррозионная стойкость, должны обладать удовлетворительной свариваемостью. Свойства сварных соединений таких заготовок в значительной степени зависят от химического состава структурообразующих элементов, их взаимного расположения, а также площади и качества твердофазных соединений между ними.

Анализ условий эксплуатации изделий из пористых материалов позволил установить, что сварные соединения должны обладать минимальной шириной шва, максимальной относительной прочностью при отсутствии в шве или околошовной зоне трещин и других сквозных дефектов, а также иметь минимальное окисление наружной и внутренней поверхностей.

Результаты исследования свойств порошковых волокновых и сетчатых материалов показали, что наиболее высокой свариваемостью обладают пористые заготовки, получаемые сваркой давлением металлических тканых сеток [1, 2]. Отличием пористых сетчатых материалов (ПСМ) является явно выраженная анизотропия свойств.

Результаты исследования свариваемости ПСМ показали, что помимо величины пористости, на качество соединений, полученных сваркой плавлением существенно влияет соотношение коэффициентов эффективной теплопроводности по толщине ($\lambda_{\perp}$) и в направлении, перпендикулярным движению источника сварки (λ_{wn}). Следует отметить, что при сварке высокопористых ПСМ, для которых характерна низкая теплопроводность по толщине, в зависимости от величины λ_{wn} возможно образование дефектов различного вида. Так, для пористых заготовок с высоким λ_{wn} в результате интенсивного теплоотвода в плоскости листа уменьшается глубина проплавления и возрастает градиент температуры по ширине сварочной ванны, что, в свою очередь, может привести к разрыву металла шва в процессе кристаллизации. А при сварке тех же элементов, но в направлении, для которого характерно малое λ_{wn} , происходит несплавление отдельных проволок с металлом шва в результате действия сил поверхностного натяжения на

границе жидкого металла оплавляющихся проволок и сварочной ванны. Кроме того, теплопроводность пористых материалов определяется их температурой, свойствами и взаимным расположением структурообразующих элементов. Экспериментальные исследования, выполненные автором, показали, что на ширину шва при оптимальном режиме сварки значительное влияние оказывает теплопроводность заготовок в направлении толщины и их теплоемкость [2].

Перенос теплоты в пористых телах может происходить путем контактной теплопроводности, конвекции и излучения. В большинстве случаев преобладающим механизмом переноса теплоты в пористых телах является контактная теплопроводность [3]. Величина анизотропии ПСМ определяется конструктивными параметрами исходных сеток их взаимным расположением, величиной их деформации в процессе сварки давлением и площадью образовавшихся контактов между проволоками.

1. Исследование процесса пластической деформации сеток и образования контактов между проволоками

При максимально возможной для ПСМ пористости, равной исходной пористости брикета [4], материал представляет собой набор не связанных между собой сеток. Поэтому теплопроводность в направлении толщины близка к нулю, а перпендикулярном направлении она зависит от конструкции брикета сеток и свойств материала проволок. В процессе сварки брикета сеток с увеличением их относительного обжатия (ε) теплопроводность получаемых материалов возрастает в результате образования соединений между проволоками сеток.

Принимая равенство тепловых потоков, передаваемых проволоками, сварными соединениями в реальном ПСМ, и фиктивным компактным телом, имеющим те же геометрические размеры и обладающим значением теплопроводности по толщине равным $\lambda_\perp$, в работе получена зависимость для расчета относительной величины

$$\frac{\lambda_\perp}{\lambda_к} = \min\left\{\left(\frac{\varphi \cdot Fr\ \overline{m}_{y\partial}}{\cos\theta}\right) i, i+1\right\}\ \ i = 1...n\ , \qquad (1)$$

где $\lambda_к$ - эффективная теплопроводность материала проволок;

φ - относительная площадь макроконтакта, на которой произошло образование равнопрочного сварного соединения;

Fr - площадь единичного макроконтакта проволок;

$\overline{m_{y\partial}}$ - число соединений проволок на единице площади между í-м и (í+1) слоями сеток, имеющими среднее относительное обжатие ε_n;

θ - угол между осью Z , перпендикулярной плоскости ПСМ, и нормалью к поверхностью γ -го соединения проволок [5];

n - число слоев сеток в ПСМ.

Процесс пластической деформации проволок при осадке брикета сеток можно представить протекающим в две стадии. На первом этапе уплотнение происходит в результате взаимного перемещения и изгиба элементов без образования пластического контакта между ними. На второй стадии при относительном обжатии, превышающим

некоторое значение $\varepsilon_н$, происходит образование пластического макро – и микроконтакта шероховатых поверхностей в местах их совместной деформации.

Размеры площади макроконтактов, образованных проволоками сеток, зависят от конструкции брикета заготовок и величины их обжатия. Поверхность дискретных микроконтактов на площади Fr определяется формой поперечного сечения проволок, состоянием их поверхности, реологическими и теплофизическими свойствами материала элементов, а также величиной и скоростью деформации при осадке.

Значение обжатия брикета сеток $\varepsilon_н$, при котором начинается образованием пластического макроконтакта между проволоками, предложено определять, как отношение максимального абсолютного уплотнения брикета заготовок Δh_{max}, при котором происходит только изгиб проволок, к его исходной толщине [4]. Поскольку величина Δh_{max} зависит от конструкции брикета, то значение $\varepsilon_н$, может быть определено следующим образом.

При параллельном расположении сеток (β=0)

$$\varepsilon_H = 1 - \frac{\psi^{//}{}_{\min}(n-1)+1}{\overline{\psi}(n-1)+1}. \qquad (2)$$

при непараллельном расположении сеток (β ≠ 0)

$$\varepsilon_H = 1 - \frac{\psi^{//}{}_{\min} + \overline{\psi}(n-1)+2}{2\left[\ \overline{\psi}(n-1)+1\ \right]}. \qquad (3)$$

Здесь $\overline{\psi}$ - математическое ожидание коэффициента плотности упаковки сеток в брикете, величине которого определяется по данным работы [4];

$\psi^{//}_{\min}$ - коэффициент, соответствующий состоянию наиболее плотной упаковки проволок контактирующих слоев сеток при β=0.

Анализ зависимостей (2), (3) позволил установить, что более высокое значение $\varepsilon_н$ характерно для брикета сеток с квадратными ячейками при β=0, причем величина $\varepsilon_н$ возрастает с увеличением количеством слоев сеток в брикете.

В расчетах площади микроконтакта сварных соединений проволок принимали, что величина обжатия перекрестий $\varepsilon_п$ при уплотнении брикета сеток описывается линейной зависимостью

$$\varepsilon_П = \varepsilon - \varepsilon_H . \qquad (4)$$

Число сварных соединений проволок между слоями сеток на единице площади $\overline{m_{уд}}$, имеющих среднее относительное обжатие $\varepsilon_{п,}$ описывается зависимостями.

При $\varepsilon_H < \varepsilon < \varepsilon_M$

$$\overline{m}_{\text{уд}} = \frac{m_{\text{уд max}}}{3}\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{\text{н}}}{\varepsilon_{\text{м}} - \varepsilon_{н}}\right)\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{н}}{\varepsilon}\right), \quad (5)$$

при $\varepsilon > \varepsilon_H$

$$\overline{m}_{\text{уд}} = \frac{1/3(\varepsilon_{м} - \varepsilon_{н}) + (\varepsilon - \varepsilon_{н})}{\varepsilon} m_{\text{уд max}} . \quad (6)$$

Здесь $\varepsilon_м$ - обжатие брикета сеток, при котором формируется максимальное числа перекрестий проволок, величина которых определяется как

$$m_{\text{уд max}} = (1 - \frac{1}{2n_\ell})^2 m_{\text{ут}}^2 \sin\beta , \quad (7)$$

где $n_\ell = \frac{\ell}{d_{ос}}$, ℓ - расстояние между проволоками одного слоя сетки;

$d_{ос}$ - диаметр основ сетки;

$m_{ут}$ - количество утков на длине 100 мм.

Экспериментальные исследования процесса образования площади макроконтакта единичного сварочного соединения проволок, выполненные в работе [5], позволили получить уравнение регрессии, анализ которого показал, что величина F_r возрастет с увеличением ε_n, радиуса кривизны поверхности элементов соединений и уменьшением угла β между ними.

Величина относительной площади макроконтакта (φ), на которой произошло образование равнопрочного сварного соединения, по данным работ [6, 7], может изменяться в пределах от 0 до 1. Анализ полученных зависимостей (I) …..(7) показал, что относительная теплопроводность ПСМ в направлении толщины возрастает с уменьшением $n_\ell, \overline{\psi}$ и увеличением геометрических размеров проволок, повышением обжатия брикета сеток и качества сварных соединений.

Зависимость $\lambda_\perp / \lambda_к$ для материалов на основе фильтровой сетки П60 (ГОСТ 3187-76) при $\beta=90^0$ и φ = 0,3 от пористости приведена на рис. 1. Величину пористости определяли по данным работы [4]

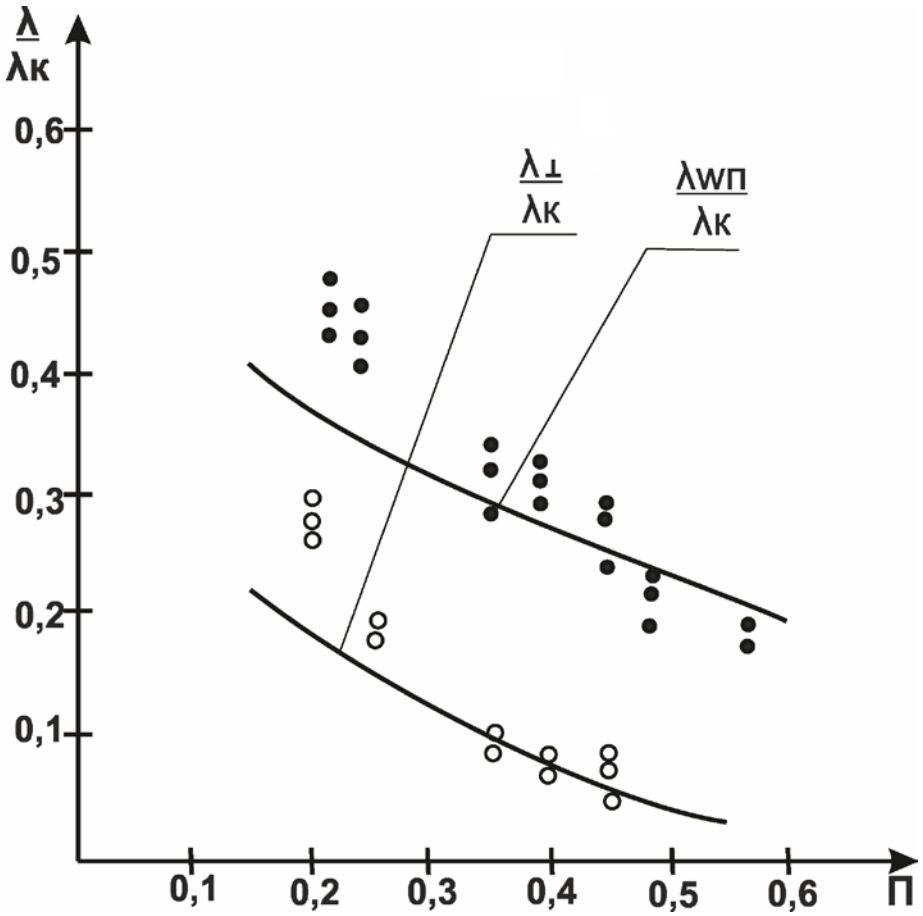

Рис. 1: Зависимость относительной теплопроводности по толщине $\lambda_{\perp} / \lambda_к$ и в плоскости листа $\lambda_{wп} / \lambda_к$ в направлении w=0; 90º от пористости ИСМ на основе фильтровой сетки П60 при β = 90º:

——— - расчетные значения;

● , ○ – экспериментальные данные [9]

2. Анализ анизотропии теплопроводности ПСМ в плоскости листа

Эффективную теплопроводность пористых заготовок в плоскости листа рассчитывали из условия, что тепловой поток от линейного источника передается только в перпендикулярном направлении и равен сумме потоков q_i, передаваемых каждым слоем сеток, а значение q_i пропорционально площади поперечного сечения проволок и сварных соединений между ними в направлении распространения тепла W. Относительную теплопроводность материала в направлении W вычисляли как

$$\frac{\lambda_{wn}}{\lambda_k} = \frac{\sum_{i-1}^{n} \left(F_{inp} + \Delta F_i \right)}{B \cdot h_n},$$

где F_{inp} - площадь поперечного сечения проволок í -го слоя сеток на ширине B в сечение, которое перпендикулярно направлению W;

ΔF_i - площадь сварных соединений, образованных утками фильтровых сеток в і-м слое сетки на ширине В;
$h_п$ - толщина ПСМ.

Величина ΔF_i для фильтровых сеток в направлении основ возрастает с увеличением степени деформации при сварке проволок в соответствии с зависимостью, приведенной в работе [8].

В общем виде относительная эффективная теплопроводность ПСМ в плоскости листа может быть определена из следующего выражения

$$\frac{\lambda_{wn}}{\lambda_k} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\frac{\pi d_{ioc}^2}{4} + \Delta F_i\right) m_{i\cdot oc}\cos\omega_i + \frac{\pi d_{i\text{ут}}^2}{4} m_{i\cdot\text{ут}}\sin\omega_i\right]}{100\left[\frac{h_{1c} + h_{nc}}{2} + \sum_{i=1}^{n}\overline{\psi}\left(\frac{h_{ic} + h_{i+1c}}{2}\right)\right](1-\varepsilon)}, \qquad (8)$$

где ω_i - угол между осью у, совпадающей с направлением і-го слоя сетки, и исследуемым направлением:
$d_{ос}$ - диаметр основ сетки;
$m_{ос}$ – число основ на длине 100 мм;
$h_{1с}; h_{ic}; h_{(i+1)c}; h_{пс}$ - толщина сеток соответственно 1-го, і-го, (і +1)- го и последнего слоя.

Для ПСМ с перпендикулярным расположением фильтровых сеток одного типоразмера выражение (8) преобразуется к виду

$$\frac{\lambda_{wn}}{\lambda_k} = \frac{\left(\frac{\pi d_{oc}^2}{4} + \Delta F\right) m_{oc} + \frac{\pi d_{\text{ут}}^2}{4} m_{\text{ут}}}{200\,(\mathrm{d}_{\text{ос}} + d_{\text{ут}})(1-\varepsilon)}(\sin\omega + \cos\omega), \qquad (9)$$

а для материалов на основе сеток с квадратными ячейками, расположенными под углом $\beta = 45^0$ к виду

$$\frac{\lambda_{wn}}{\lambda_k} = \frac{\pi d}{16(a+d)}\left[\frac{\cos\omega + \cos(\omega + 45^0) + \sin\omega + \sin(\omega + 45^0)}{1-\varepsilon}\right], \qquad (10)$$

где α - размер ячейки сетки с квадратными ячейками в свету;
d - диаметр проволок.

Подставляя в уравнения (9) и (10) значения $d_{ос}$, ΔF, $d_{ут}$, $m_{ос}$, $m_у$, для фильтровой сетки П6О при $\beta = 90^0$, и d, α - для сетки с квадратными ячейками №1 (ГОСТ 3826-82) при $\beta = 45^0$, получены зависимости $\lambda_{wn}/\lambda_к$ от величины ε. На рис. 2,3 в полярных координатах приведены графические значения эффективной теплопроводности ПСМ, полученных при

различных значениях величины обжатия брикета сеток при изготовлении пористых материалов

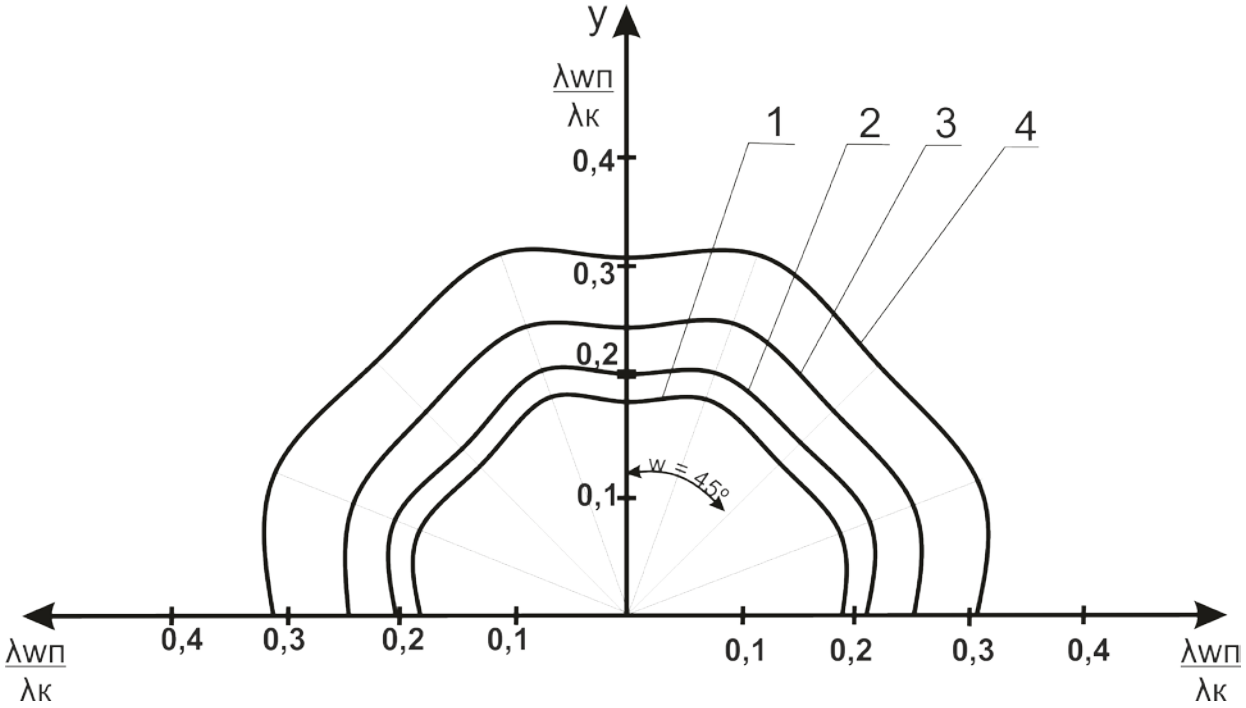

Рис. 2. Зависимость относительной теплопроводности в плоскости листа $\lambda_{wп} / \lambda_к$ ПСМ на основе сеток с квадратными ячейками №1 при β = 45° от величины обжатия брикета сеток при сварке:

1 — ε = 0,3; 2 — ε = 0,4; 3 — ε = 0,5; 4 — ε = 0,6

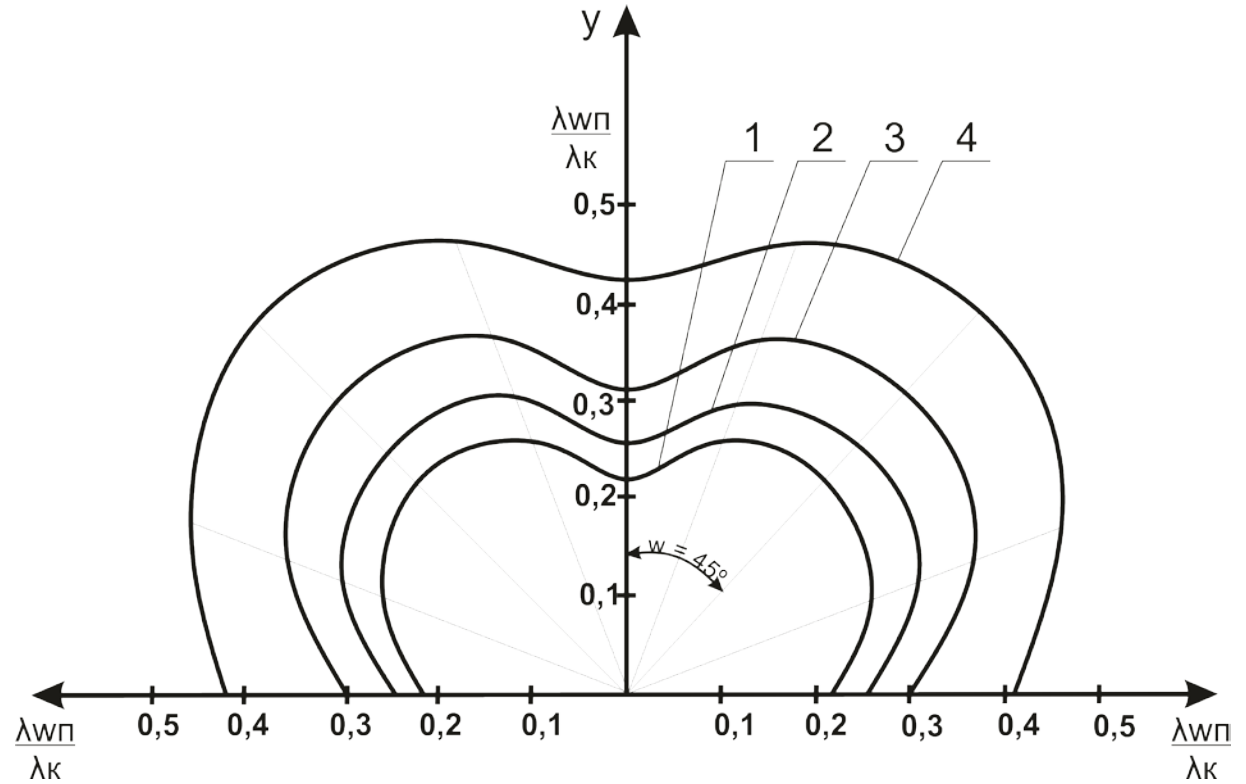

Рис. 3: Зависимость относительной теплопроводности в плоскости листа $\lambda_{wп} / \lambda_к$ ПСМ на основе фильтровых сеток П60 при β = 90° от величины обжатия брикета сеток при сварке:

1 — ε = 0,3; 2 — ε = 0,4; 3 — ε = 0,5; 4 — ε = 0,6

Исследование зависимости (8) и анализ данных, приведенных на рис. 2, 3, позволили установить, что с уменьшением коэффициента плотности упаковки сеток в брикете и увеличением обжатия в процессе сварки, эффективная теплопроводность получаемых материалов возрастает. Снижение анизотропии в плоскости листа может быть достигнуто путем применения сеток с квадратными ячейками, увеличением число их слоев и за счет равенства углов, под которыми проволоки сеток перекрещиваются, т.е.

$$\beta_1 = \beta_2 = ... = \beta_i = ... = \beta_{n-1} = \frac{\pi}{2n}.$$

Зависимость $\lambda_{wn}/\lambda_к$ от пористости материала на основе сетки П6О в направлении $\omega = 0; 90^0$, приведенная на рис. 1, показывает, что теплопроводность в плоскости листа возрастает с уменьшением пористости брикета сеток за счет сварки проволок сеток между собой.

Экспериментальные исследования теплопроводности ПСМ, полученных на основе сеток П40, П60, П76 из стали 12Х18Н10Т, выполненные авторами работы [9] методом цилиндра в направлении толщины и методом пластин в плоскости, показали, что полученные расчетные зависимости $\lambda_\perp/\lambda_к$, $\lambda_{wn}/\lambda_к$ от пористости с достаточной точностью для приближенных расчетов подтверждаются экспериментальными данными. Увеличение расхождения между экспериментальными и расчетными значениями для ПСМ, полученных при значительных обжатиях брикета, т.е. с пористостью П<0,25, объясняется существенным искажением геометрических параметров сеток.

Экспериментальные исследования удельной теплоемкости ПСМ (Сп), проведенными автором совместно с А.Ф. Севостьяновым, позволили установить, что величина Сп определяется теплоемкостью структурообразующих элементов Ск и величиной пористости материала, т.е.

$$C_П = C_К(1 - П).$$

Проведенные исследования показали, что коэффициент термического расширения ПСМ в диапазоне температур от 200 до 773 ^{0}К практически не зависит от величины пористости и равен КТР структурообразующих элементов пористых материалов.

Полученные уравнения для расчета эффективной теплопроводности и теплоемкости ПСМ могут быть использованы для расчета погонной энергии, необходимой для образования сварных стыковых соединений и ширины шва при электронно-лучевой и аргонодуговой сварке.

Заключение

1) Установлено, что при сварке плавлением ПСМ помимо величины пористости, на условия формирования сварных соединений существенно влияет соотношение коэффициентов эффективной теплопроводности по толщине $\lambda_\perp$ и в направлении, перпендикулярном движению источника λ_{wn}. При увеличении $\lambda_\perp / \lambda_{wn}$ и уменьшении пористости кромок качество сварных соединений возрастает.

2) Анализ полученных зависимостей для расчета эффективной теплопроводности ПСМ позволил установить, что снижение анизотропии в плоскости листа может быть

достигнуто путем увеличения числа сеток с квадратными ячейками и уменьшением угла, под которым проволоки соседних слоев перекрещиваются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пористые проницаемые материалы. Справочник. изд. /Под ред. С.В. Белова. – М.: Металлургия. 1987. 335 с.

2. Сварка и свариваемые материалы: В 3–х т. Т.1. Свариваемость материалов. Справ. изд. /Под ред. Э.Л. Макарова. М.: Металлургия. 1991. 528 с.

3. Поляев В.М., Майоров В.А., Васильев Л.Л. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов. М.: Машиностроение. 1988. 168 с.

4. Третьяков А.Ф. Пористость материалов на основе тканых сеток // Порошковая металлургия. 1986. №8. С. 70-75

5. Полушкин Г.П., Третьяков А.Ф. Прочность пористых сетчатых материалов на отрыв. // Проблемы прочности. 1984. №2. С. 46-50.

6. О влиянии глубины вакуума при сварке прокаткой крестообразных сварных соединений проволок из стали 12Х18Н9Т и латуни Л8О / Ю.И. Синельников, В.С. Теплов, А.Ф. Третьяков, В.В. Звягинцев. Сварочное производство. 1976. №7. С. 3-14.

7. Условия образования крестообразных соединений проволок из титановых сплавов при диффузионной сварке / А.Ф. Третьяков, Г.Е. Лозеев и др. Автоматическая сварка. 1982. №8. С. 30-32.

8. Третьяков А.Ф. Синельников Ю.И.. Расчет предела прочности пористых материалов на основе металлических сеток из стали 12Х18Н9Т // Авиационная промышленность. 1975. №2. С. 69-71.

9. Поляев В.М., Горбатовский А.А. Теплопроводность пористого материала на основе металлических сеток. // Авиационная промышленность. 1883. №1, С. 53-55.

electronic scientific and technical periodical
SCIENCE and EDUCATION
EL № FS 77 - 30569. №0421100025. ISSN 1994-0408

Thermophysical properties of permeable elements based on porous net materials

05, May 2012
DOI: 10.7463/0512.0400624

Tret'yakov A.F.

Russia, Bauman Moscow State Technical University
tretyakov@bmstu.ru

The author revealed the influence of thermalphysic properties of porous net materials (PNM) on the formation mechanism of the joint produced by the fusion welding. The designs of get-forming elements and plastic deformation in the PNM manufacture process have action upon anisotropy of efficient thermal conductivity. The method is presented to calculate the PNM efficient thermal conductivity and its anisotropy. Functional relationships are obtained to estimate technological process parameters providing the PNM production with prescribed thermalphysic properties. Experimental research of efficient thermal conductivity confirmed the adequacy of the obtained regularities; the research was performed both by the cylinder method and the plate method. The results of theoretical and experimental studies of thermalphysic properties are used for evaluation of energy input rate necessary for fusion welding of porous elements.

Publications with keywords: welding, strain, thermal conductivity, porous net material, anisotropy, porosity, heat substances, net briquette cogging
Publications with words: welding, strain, thermal conductivity, porous net material, anisotropy, porosity, heat substances, net briquette cogging

References

1. Belov S.V., Ed. *Poristye pronitsaemye materialy. Spravochnik* [Porous permeable materials. Handbook]. Moscow, Metallurgiia, 1987. 335 p.

2. Makarov E.L., Ed. *Svarka i svarivaemye materialy: V 3–kh t. T. 1. Svarivaemost' materialov.* [Welding and welded materials: In 3 vols. Vol. 1. Weldability materials]. Moscow, Metallurgiia, 1991. 528 p.

3. Poliaev V.M., Maiorov V.A., Vasil'ev L.L. *Gidrodinamika i teploobmen v poristykh elementakh konstruktsii letatel'nykh apparatov* [Hydrodynamics and heat transfer in porous elements of constructions of aircrafts]. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 168 p.

4. Tret'iakov A.F. Poristost' materialov na osnove tkanykh setok [The porosity of the materials on the basis of the woven mesh]. *Poroshkovaia metallurgiia*, 1986, no. 8, pp. 70-75.

5. Polushkin G.P., Tret'iakov A.F. Prochnost' poristykh setchatykh materialov na otryv [The strength of the porous mesh material on detachment]. *Problemy prochnosti*, 1984, no. 2, pp. 46-50.

6. Sinel'nikov Iu.I., Teplov V.S., Tret'iakov A.F., Zviagintsev V.V. O vliianii glubiny vakuuma pri svarke prokatkoi krestoobraznykh svarnykh soedinenii provolok iz stali 12Kh18N9T i latuni L8O [The effect of the depth of the vacuum during welding rolling cross wires welded joints of steel 12X18H9T and brass L8O]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1976, no. 7, pp. 3-14.

7. Tret'iakov A.F., Lozeev G.E., et al. Usloviia obrazovaniia krestoobraznykh soedinenii provolok iz titanovykh splavov pri diffuzionnoi svarke [Conditions of formation of cross-connection wires of titanium alloys in diffusion welding]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1982, no. 8, pp. 30-32.

8. Tret'iakov A.F. Sinel'nikov Iu.I. Raschet predela prochnosti poristykh materialov na osnove metallicheskikh setok iz stali 12X18H9T [Calculation of the tensile strength of porous materials on the basis of metal mesh of steel 12X18H9T]. *Aviatsionnaia promyshlennost'*, 1975, no. 2, pp. 69-71.

9. Poliaev V.M., Gorbatovskii A.A. Teploprovodnost' poristogo materiala na osnove metallicheskikh setok [The thermal conductivity of porous material on the basis of metal mesh]. *Aviatsionnaia promyshlennost'*, 1883, no. 1, pp. 53-55.