

Расчет и конструирование машин

УДК 621.791

DOI 10.18698/0536-1044-2016-11-3-13

Влияние конструкции и относительного обжатия брикета сеток в процессе консолидации на межслойную прочность пористых сетчатых материалов

А.Ф. Третьяков

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

The Influence of Wire Mesh Block Configuration and Reduction Rate on the Interlaminar Strength of Porous Net Materials during the Consolidation Process

A.F. TretyakovBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: tretyakov@bmstu.ru

i Пористые сетчатые материалы, полученные сваркой давлением металлических тканых сеток, применяют для изготовления проницаемых изделий с требуемыми свойствами. При исследовании межслойной прочности использован структурный подход, который предполагает определение прочности исходя из геометрических параметров (типоразмера) сеток, их количества, взаимного расположения, механизма пластической деформации и качества консолидации структурообразующих элементов. Получены функциональные зависимости, анализ которых позволяет определить конструктивные и технологические параметры, обеспечивающие максимальную межслойную прочность пористых сетчатых материалов при заданных значениях относительного обжатия брикета сеток. Показано, что низкое качество сварных соединений проволок, образованных в процессе сварки прокаткой, объясняется высоким сопротивлением деформированию микронеровностей и низкой скоростью массопереноса в зоне контакта. Повышение межслойной прочности пористых сетчатых материалов при низких скоростях деформации достигается в результате контактной ползучести и увеличения скорости диффузионного массопереноса, а при интенсивном динамическом нагружении — путем локального нагрева контактных поверхностей, снижения сопротивления деформированию микронеровностей и повышения скорости массопереноса. Определены параметры, обеспечивающие максимальную межслойную прочность пористых сетчатых материалов.

Ключевые слова: пористый сетчатый материал, анизотропия, межслойная прочность, относительное обжатие, скорость деформации, сварка.



Porous net materials manufactured by pressure welding of metal wire meshes are used to make permeable products with required properties. A structured approach is used to analyze the interlaminar strength, which involves determining the strength using the mesh

geometric parameters (typical sizes), number of meshes, their mutual bracing, plastic deformation mechanism as well as the quality of structural element consolidation. Functional dependencies are obtained, which can be used to determine the design and technological parameters that provide maximum interlaminar strength of porous net materials with specified values of relative wire block reduction. It is shown that the poor quality of welded mesh joints formed by roll welding can be explained by the high resistance of micro-rough surfaces to deformation, and the low rate of mass transfer in the contact area. An improved interlaminar strength of porous net materials at low rates of deformation can be achieved through contact creep flow and an increased rate of diffusion mass transfer. At intensive dynamic loading, the interlaminar strength can be increased by local heating of contact surfaces, a decrease in the resistance to deformation of micro-rough surfaces, and an increase in the rate of mass transfer. The parameters that provide maximum interlaminar strength of porous net materials are determined.

Keywords: porous wire mesh (porous net material), anisotropy, interlaminar strength, reduction rate, deformation rate, welding.

Пористые материалы (ПМ), используемые в различных областях науки и техники, отличаются от компактных материалов большей проницаемостью и меньшей плотностью. Их можно разделить на две большие группы: ПМ на неметаллической основе и ПМ на металлической основе. Последние широко применяют в машиностроении, теплоэнергетике, ракетной, авиационной, химической и других отраслях промышленности. Это объясняется тем, что такие ПМ имеют лучшие прочностные, теплофизические, гидравлические, технологические свойства и способны работать при высоких температурах и давлениях.

К ПМ на металлической основе можно отнести пористые порошковые материалы, пористые волоконные материалы, пористые сетчатые материалы (ПСМ), комбинированные пористые проницаемые материалы и др. [1].

ПСМ, изготавливаемые консолидацией тканых проволоочных сеток с применением горячей деформации в контролируемой газовой среде, представляют значительный интерес для проницаемых изделий с требуемыми характеристиками. Благодаря организованной структуре и сварке проволок сеток между собой они обладают стабильными и воспроизводимыми свойствами. ПСМ применяют при изготовлении фильтрующих элементов [2, 3] для очистки жидкостей и газов от механических примесей, систем теплозащиты ракетных двигателей [4], оболочек турбинных лопаток парогазовых установок и газотурбинных двигателей [5–7], капиллярных заборных установок [8] и других изделий.

Экспериментальные исследования штампуемости ПСМ из стали 12Х18Н10Т [9] показали, что более технологичными являются заготовки

с высокой межслойной прочностью и низкой анизотропией механических свойств в плоскости листа. При этом установлено, что формирование лимитируется не только опасностью разрушения в плоскости листа, но и возможностью расслоения заготовки.

Цель работы — изучение влияния конструктивных параметров тканых сеток, их количества, взаимного расположения, а также технологических параметров сварки давлением проволок сеток на межслойную прочность ПСМ.

Конструктивные параметры сеток зависят от типа переплетения проволок, диаметров основ d_{oc} , утков d_{yt} и расстояния между основами l_{oc} , используя которые можно получить два безразмерных параметра — $n_d = d_{yt}/d_{oc}$ и $n_l = l_{oc}/d_{oc}$ — для определения основных характеристик сеток независимо от их типоразмера. По типу переплетения проволоочные тканые сетки подразделяют на сетки с квадратными ячейками и фильтровые сетки, которые могут быть полотняного, саржевого двухстороннего и одностороннего переплетения [2, 3].

Тканые сетки, выпускаемые отечественной промышленностью, маркируют номером, который для фильтровых сеток определяется номинальным числом основ на 1 дм их длины m_{oc} , а для сеток с квадратными ячейками — размером ячейки в свету a . В зависимости от типа плетения сеток расстояние между проволоками может быть описано следующим образом: для сеток с квадратными ячейками $l = a + d$ (d — диаметр проволок сетки), а для фильтровых — расстояниями между основами $l_{oc} = 100/m_{oc}$ и утками $l_{yt} = d_{yt}/K_c$, где $K_c = 1,0; 1,5$ и $2,0$ соответственно при полотняном, двухстороннем и одностороннем переплетении проволок [2].

Взаимное расположение сеток в брикете можно описать двумя параметрами: углом β , под которым проволоки соседних сеток перекрещиваются, и коэффициентом плотности упаковки слоев Ψ .

Коэффициент Ψ для двух слоев сеток представляет собой отношение

$$\Psi = \frac{2t_c}{h_{c1} + h_{c2}},$$

где t_c — расстояние между осями симметрии сеток толщиной h_{c1} и h_{c2} (рис. 1).

Толщина сетки зависит от диаметра проволок, типа их переплетения и определяется выражением:

- для фильтровых сеток

$$h_c = d_{oc} + 2d_{yt};$$

- для сеток с квадратными ячейками

$$h_c = 2d.$$

Расстояние t_c определяется геометрическими параметрами сеток, их взаимным расположением, а также случайным смещением в процессе сборки брикета. Поэтому расстояние между соседними слоями сеток является случайной величиной, значение которой находится в интервале

$$\frac{h_{c1} + h_{c2}}{2} \geq t_c \geq t_{min}.$$

При принятом допущении о том, что изменение коэффициента Ψ от смещения сеток друг относительно друга описывается линейной зависимостью, в работе [9] получено следующее выражение для оценки математического ожидания величины Ψ :

$$\bar{\Psi} = M[\Psi(x, y)] = \frac{3 + 5\Psi_{min}}{8}.$$

При заданном взаимном расположении структурообразующих элементов значение Ψ_{min} определяется геометрическими параметрами сеток. Так, для фильтровых сеток минимальное значение коэффициента Ψ достигается при параллельном расположении сеток ($\beta = 0$) плотняного переплетения [9]:

$$\Psi_{min} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{n_d}{1 + 2n_d} \left(\frac{n_l}{\sqrt{n_l^2 - (1 + n_d)^2}} - 0,3 \right) \right].$$

При расположении фильтровых сеток плотняного переплетения под углом $\beta \neq 0$, а для

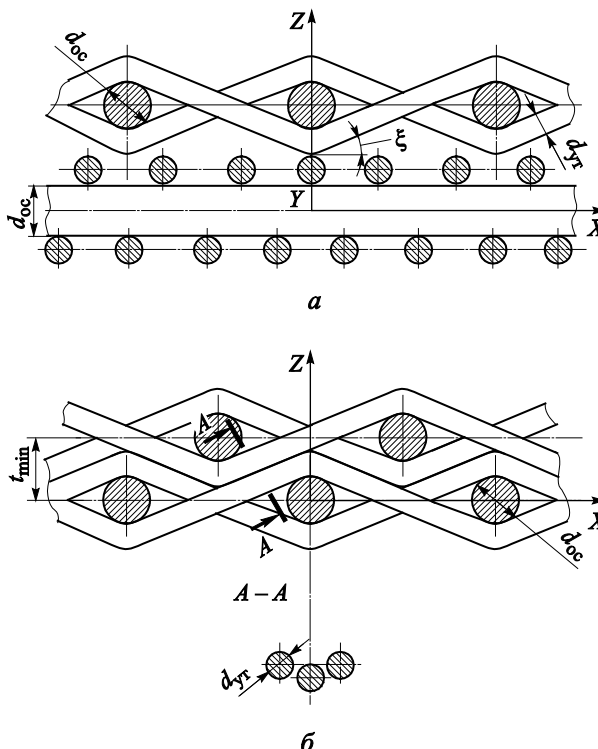


Рис. 1. Расположение фильтровых сеток в брикете: а — перпендикулярное; б — параллельное

сеток саржевого переплетения при любом взаимном расположении $\Psi_{min} = \Psi = 1,0$.

Выполненные совместно с Г.П. Полушкиным исследования показали, что наиболее плотная упаковка сеток с квадратными ячейками достигается при их параллельном расположении:

$$\Psi_{min} = \frac{1,5n_l}{\sqrt{n_l^2 - 1}} - 1.$$

Расчеты позволили установить, что значение Ψ_{min} при параллельном расположении сеток уменьшается с увеличением параметра n_l , а при $0 \leq \beta \leq 45^\circ$ с погрешностью 5...7 % можно принять $\Psi_{min} = 1,0$. Кроме того, для брикета, образованного сетками различного типоразмера, $\Psi = \Psi_{min} = 1,0$.

Таким образом, выполненные исследования влияния геометрических параметров сеток и их взаимного расположения на коэффициент плотности упаковки позволили получить выражения для определения толщины брикета, состоящего из n слоев:

$$h_{6p} = \frac{h'_{c1} + h_{cn}}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \bar{\Psi}_i \frac{h_{ci} + h_{ci+1}}{2},$$

где $h_{c1}, h_{ci}, h_{ci+1}, h_{cn}$ — толщина сеток соответственно 1-го, i -го, $(i+1)$ -го и n -го слоя сетки.

Свойства ПСМ определяются не только химическим составом, структурой материала проволок сеток, конструкцией брикета, но и технологическими параметрами, к которым относятся: температура нагрева, относительное обжатие брикета сеток, скорость деформации в процессе сварки, состав защитной среды и режим очистки сеток перед их консолидацией. Деформацию брикета сеток оценивали относительным обжатием, определяемым по известной формуле

$$\varepsilon = \Delta h / h_{\text{ср}},$$

где Δh — абсолютная величина уменьшения толщины брикета.

Анализ закономерностей пластической деформации структурообразующих элементов при обжатии брикета сеток в процессе прокатки и осадки показал, что при малых значениях ε происходит в основном заполнение пустот между слоями путем изгиба, а при достижении некоторого значения ε_n начинается образование перекрестий проволок в местах их совместной деформации. При этом относительная степень деформации перекрестий проволок ε_n , образовавшихся при изготовлении ПСМ, может быть описана линейным уравнением [9]

$$\varepsilon_n = \varepsilon - \varepsilon_n.$$

Кроме того, при $\varepsilon > \varepsilon_n$ происходит увеличение количества контактов между проволоками сеток в ПСМ, которое достигает максимума при $\varepsilon = \varepsilon_m$. Значение ε_m определяется из следующего уравнения, полученного совместно с Г.П. Полушкиным:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_n + \frac{1}{2} \left[1 - \frac{n_d}{(1 + 2n_d) \cos \xi} \right],$$

где ξ — угол наклона проволок сеток к оси X (рис. 1, а).

Количество перекрестий на единице площади $m_{\text{уд}}$ между i -м и $(i + 1)$ -м слоями сеток одного типоразмера, образовавшихся при $\varepsilon > \varepsilon_n$, определяется расстоянием между проволоками l_1 , l_2 и углом β , под которым они расположены. В том случае, когда ПСМ получают на основе сеток разного типоразмера, $m_{\text{уд}}$ зависит от типоразмеров тех сеток, которые обладают большими значениями l_1 и l_2 . Площадь единичного пластического контакта, образованного проволоками, определяется соотношением их диаметров, относительной степенью деформации перекрестий проволок ε_n и углом β .

Таким образом, ε_n , ε_n , ε_m являются важными параметрами процесса получения ПСМ, поскольку они определяют количество и площадь контактов, образованных проволоками при заданной конструкции брикета сеток. Относительное обжатие, при котором начинается совместная пластическая деформация проволок в местах их контактов (ε_n), определяется типоразмером сеток, их количеством и, поскольку зависит от параметра Ψ , является случайной величиной [9].

Необходимым условием получения ПСМ является образование твердофазных соединений проволок сеток, поскольку их количество, взаимное расположение и площадь существенно влияют на механические свойства материала.

Общее количество перекрестий, образованных проволоками двух контактирующих сеток m , определяется их габаритами, типоразмерами, взаимным расположением и относительным обжатием. Количество m можно определить через количество контактов проволок $\bar{m}_{\text{уд}}$ на единице площади S , имеющих относительную степень деформации ε_n , т. е.

$$m = \bar{m}_{\text{уд}} S. \quad (1)$$

В интервале $\varepsilon_m \geq \varepsilon > \varepsilon_n$ количество $\bar{m}_{\text{уд}}$, образованных при относительном обжатии брикета сеток, вычисляют по формуле

$$\bar{m}_{\text{уд}} = \frac{m_{\text{уд}}(\varepsilon - \varepsilon_n)}{3\varepsilon}.$$

При $\varepsilon > \varepsilon_m$ общее количество перекрестий остается постоянным ($m_{\text{уд}} = m_{\text{уд max}}$), и количество $\bar{m}_{\text{уд}}$ определяют по выражению

$$\bar{m}_{\text{уд}} = \left[\frac{1}{3}(\varepsilon_m - \varepsilon_n) + (\varepsilon - \varepsilon_m) \right] \frac{m_{\text{уд max}}}{\varepsilon},$$

где $m_{\text{уд}}$ — количество контактов на единице площади S , претерпевших относительную степень деформации $\varepsilon_n > \varepsilon_k > 0$; $m_{\text{уд max}}$ — максимальное количество контактов на единице площади S .

Для брикета фильтровых сеток

$$m_{\text{уд max}} = \left(1 - \frac{1}{2n_l} \right)^2 m_{\text{уд}}^2 \sin \beta.$$

Расположение перекрестий проволок в ПСМ, зависящее от параметров брикета (n_l , n_d , β), может быть определено углом θ_n между осью Z и нормалью к поверхности еди-

ничного макроконтakta проволок. Поскольку на расположение перекрестий проволок оказывает влияние случайное смещение сеток друг относительно друга, то θ_{π} является случайной величиной, математическое ожидание которой в первом приближении можно определить как среднее арифметическое максимального и минимального значений:

$$\theta_{\pi} = \frac{\theta_{\pi \max} + \theta_{\pi \min}}{2}.$$

Учитывая методические сложности изучения процесса образования контактов проволок при горячей деформации брикета сеток, в работе использован метод моделирования на образцах, представляющих собой два свинцовых цилиндрических элемента, отношение диаметров d_1/d_2 , взаимное расположение (угол β) и относительная степень деформации ϵ_{π} которых соответствуют перекрестиям проволок в реальном пористом теле. В частности, для фильтровых сеток полотняного переплетения (ГОСТ 3187–76) при перпендикулярном их расположении в ПСМ предельные значения равны

$$\theta_{\pi \min} = 0; \quad \theta_{\pi \max} = \arctg\left(\operatorname{tg} \xi \sqrt{\operatorname{tg}^2 \xi + 2}\right).$$

Поверхность контакта без учета шероховатости, образовавшейся в процессе пластической деформации перекрещивающихся элементов, получила название площади макроконтakta F_r , значение которой равно площади горизонтальной проекции пятна контакта. Для определения зависимости $F_r/d_1^2 = f(d_1/d_2, \beta, \epsilon_{\pi})$ использован метод планирования эксперимента.

Для получения математической модели в виде полинома второй степени реализован некомпозиционный план второго порядка (выборка из плана типа 3^3). Обработка опытных данных проведена по формулам, известным в области математического планирования эксперимента. Оценка дисперсии воспроизводимости по критерию Кохрена при 5%-ном уровне значимости показала, что она однородна. Проверка модели по критерию Фишера при 5%-ном уровне значимости установила ее адекватность. Сопоставление коэффициентов уравнения регрессии с их доверительными интервалами позволило определить значимость всех коэффициентов. Переходя от кодированных значений факторов к натуральным, получаем зависимость

$$\begin{aligned} \frac{F_r}{d_1^2} = & -0,4 + 0,24 \frac{d_1}{d_2} + 0,99\beta + 12\epsilon_{\pi} + 6,6 \frac{d_1}{d_2} \epsilon_{\pi} - \\ & - 0,5\beta\epsilon_{\pi} - 0,6\beta^2 - 3\epsilon_{\pi}^2. \end{aligned}$$

Анализ уравнения регрессии позволил установить, что с уменьшением угла β и увеличением относительного обжатия перекрестий возрастает площадь макроконтakta, максимальное значение которой достигается при $d_1 = d_2$.

Отличительная особенность процесса образования твердофазных соединений проволок сеток при получении ПСМ состоит в неравномерной пластической деформации в зоне контакта, которая изменяется от максимального значения в центральной зоне до нуля на границе. В этих условиях существенное влияние на формирование твердофазного соединения оказывает фактическая площадь контакта (ФПК), которая образуется в результате пластической деформации микронеровностей на площади F_r . ФПК перекрестия F_{ϕ} является той максимальной поверхностью, на которой возможно образование металлических связей [10].

Выполненные фрактографические исследования поверхностей контактов перекрестий проволок из стали 12Х18Н10Т, образовавшихся в процессе горячей прокатки со скоростью $v = 0,05 \dots 0,1$ м/с, позволили установить, что смятия микронеровностей не происходит на всей площади макроконтakta. Полученные результаты, очевидно, можно объяснить тем, что при исследуемых скоростях деформации увеличивается сопротивление деформированию контактных поверхностей вследствие взаимного влияния микронеровностей. При этом происходит переход от сдвиговых деформаций к всестороннему сжатию.

Увеличение относительной ФПК $f_{\phi} = F_{\phi}/F_r$ при прочих равных условиях может быть достигнуто путем выбора рациональной скорости деформации при получении ПСМ, значение которой определяли как $\dot{\epsilon}_{\pi} = \epsilon_{\pi}/t$ (t — время деформации).

Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния скорости горячей деформации на относительную ФПК f_{ϕ} крестообразных соединений проволок, выполненные автором, приведены в работе [11]. Анализ зависимостей, представленных на рис. 2, позволил установить, что в процессе горячей прокатки при скоростях деформации $\dot{\epsilon}_{\pi} = 0,5 \cdot 10^{-2} \dots 0,5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ относительная ФПК f_{ϕ} достигает минимальных значений. Повы-

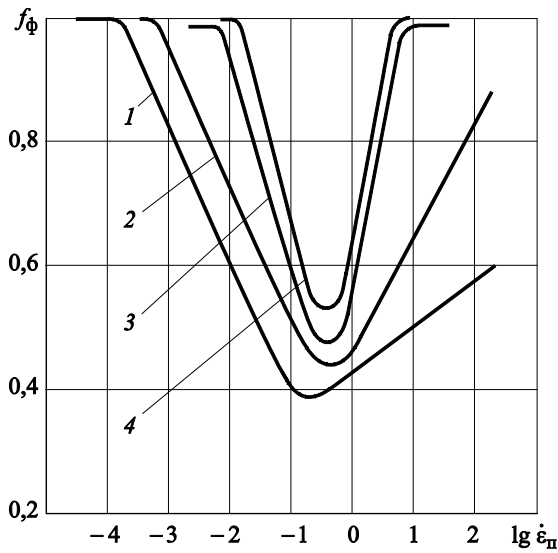


Рис. 2. Зависимость относительной фактической площади контакта, образованной перекрестиями проволок при горячей деформации, от скорости деформации:

1 — $\varepsilon_p = 0,1$; 2 — $\varepsilon_p = 0,2$; 3 — $\varepsilon_p = 0,3$; 4 — $\varepsilon_p = 0,4$

шение ФПК при $\dot{\varepsilon}_p < 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ происходит в результате контактной ползучести тем интенсивнее, чем выше температура деформации и ε_p . При высоких скоростях деформации ($\dot{\varepsilon}_p > 0,5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$) относительная ФПК f_ϕ возрастает за счет повышения температуры поверхностей контакта и снижения сопротивления деформирования микронеровностей.

ФПК в значительной степени приближается к площади, на которой возможно образование твердофазного сварного соединения. Однако в ряде случаев не равна ей, так как поверхность имеет неоднородности, обусловленные дефектами структуры поверхностного слоя и наличием оксидных пленок и органических загрязнений. Для качественной сварки структурообразующих элементов ПСМ помимо образования ФПК необходимо обеспечить активацию атомов и объемное взаимодействие в зоне соединения, в результате которых между атомами соединяемых поверхностей образуются химические связи и осуществляются процессы релаксации напряжений, рекристаллизации и диффузии.

Наиболее эффективным каналом активации является термический, поскольку с увеличением температуры от 1 373 до 1 473 К в условиях сварки прокаткой площадь, на которой произошло образование твердофазного соединения, возросла примерно в 2 раза, а при температуре $T < 1 273 \text{ К}$ сварка не происходит во всем

диапазоне исследуемых относительных обжа- тий.

Определение оптимального режима сварки для конкретного технологического процесса осуществляли экспериментально на проволоках из стали 12Х18Н10Т диаметром 1, 4 и 5 мм. Интервалы варьирования параметров назначали с учетом полученных закономерностей формирования ФПК и физико-химических процессов, протекающих при нагреве и деформации крестообразных соединений проволок. Качество сварных соединений оценивали по относительной прочности $\sigma_{отр}/\sigma_B$ при испытании на отрыв. Прочность сварных соединений перекрестий проволок на отрыв определяли как

$$\sigma_{отр} = \frac{P_{отр}}{F_T},$$

где $P_{отр}$ — сила, при которой происходит разрушение соединения.

Если силу $P_{отр}$ представить как $P_{отр} = \sigma_B F_{св}$ (σ_B — предел прочности проволок после термомеханической обработки по режиму сварки давлением; $F_{св}$ — площадь макроконтакта, на которой произошло образование равнопрочного соединения), то $\sigma_{отр}/\sigma_B$ равно относительной площади контакта проволок, на которой произошло образование равнопрочного соединения, т. е.

$$\phi = \frac{F_{св}}{F_T} = \frac{\sigma_{отр}}{\sigma_B}. \quad (2)$$

Сварку прокаткой перекрестий выполняли в вакуумированных конвертах при температуре $T = 1 373$ и $1 473 \text{ К}$ на двухвалковом стане ДУО-160 и в среде аргона на установке «Атмосфера-1», снабженной прокатным станом ДУО-90, со скоростью 0,1...0,5 м/с. Диффузионную сварку осуществляли на установке СДВУ-2. Исследование влияния интенсивного динамического нагружения на относительную прочность соединения проволок проводили в вакууме $1 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$ при $T = 1 273$, $1 373$ и $1 473 \text{ К}$. Деформацию перекрестий выполняли бойком со скоростью $v = 2,5 \text{ м/с}$.

Исследование относительной степени деформации в условиях ударной сварки в вакууме позволило установить, что с увеличением ε_p и температуры происходит повышение относительной прочности. Полученные результаты можно объяснить тем, что в условиях интенсивного динамического нагружения не только возрастает ФПК, но и более интенсивно проте-

кает объемное взаимодействие в зоне соединения путем аномального массопереноса по межзельному механизму [12]. Этим, очевидно, можно объяснить образование связей и на периферии макроконтakta, где значения деформации и контактных напряжений значительно меньше, чем в центральной зоне.

Исследование сварных соединений проволок, полученных диффузионной сваркой, после испытания на отрыв показало, что в центральной зоне контакта возникла область со следами разрушения образовавшихся связей, относительная величина которой возрастает с увеличением температуры, глубины вакуума и времени процесса сварки.

Результаты изучения влияния скорости деформации на относительную прочность на отрыв сварных соединений проволок приведены в работе [12]. Анализ расчетных и экспериментальных данных позволил установить, что минимальной прочностью обладают сварные соединения, образованные при $\dot{\epsilon}_n = 5 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-1} \text{ c}^{-1}$ (рис. 3). При низких скоростях деформации ($\dot{\epsilon}_n < 1 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$) и в условиях интенсивного динамического нагружения ($\dot{\epsilon}_n > 1 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$) возможно образование твердофазного соединения на всей поверхности макроконтakta.

Экспериментально установлено, что при ударной сварке в вакууме влияние температуры в исследуемом интервале на качество сварных соединений значительно меньше, чем для процессов с более низкими скоростями нагружения.

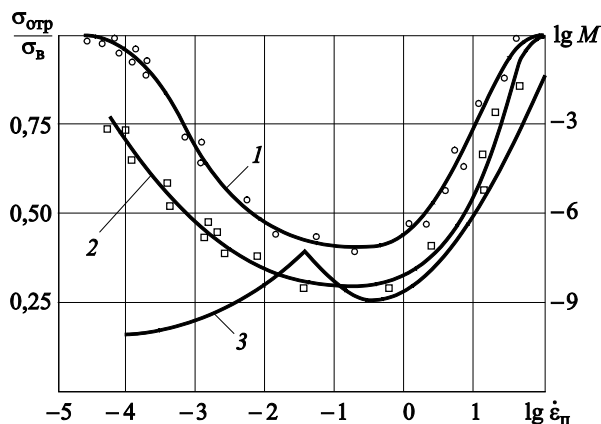


Рис. 3. Влияние скорости деформации на относительную прочность на отрыв сварных крестообразных соединений проволок $\sigma_{отр}/\sigma_v$, полученных при $T = 1473$ (1) и 1373 К (2), и на скорость массопереноса $\lg M$ (3) в зоне соединения:
 — — расчетные данные;
 □, ○, — экспериментальные данные

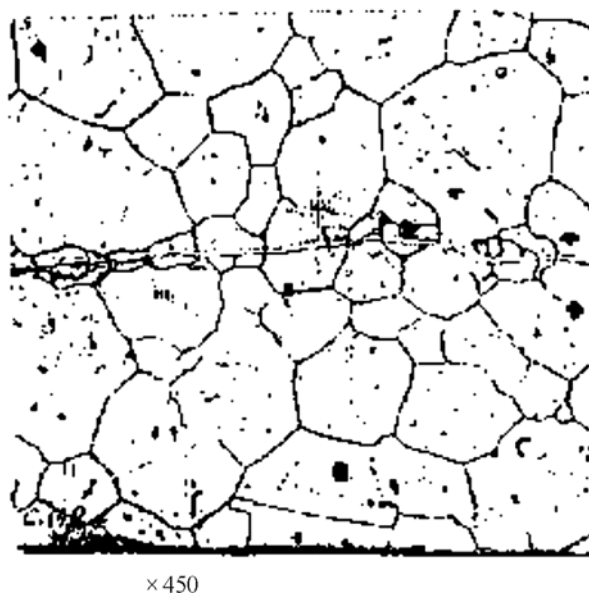


Рис. 4. Микроструктура крестообразного соединения проволоки из стали 12Х18Н10Т, полученных ударной сваркой в вакууме (остаточное давление $p = 1 \cdot 10^{-1}$ Па) при $T = 1473$ К и $\dot{\epsilon}_n = 20 \text{ c}^{-1}$

Высокое значение скорости массопереноса M при ударной сварке (см. рис. 3), очевидно, является основной причиной, снижающей влияние температуры на процесс объемного взаимодействия при формировании твердофазного соединения. Металлографические исследования образцов, полученных ударной сваркой в вакууме при $T = 1473$ К, показали возможность образования общих зерен в зоне контакта (рис. 4).

Химическое состояние поверхности проволок, используемых для получения сеток, не контролируется заводом-изготовителем, поэтому свойства получаемых на их основе ПСМ при заданных режимах сварки зависят от состава поверхностных слоев. Экспериментальные исследования процесса химического травления проволок из стали 12Х18Н10Т выполненные в работе [13], показали, что максимальное удаление поверхностного слоя происходит при обработке травителем, состоящим из HNO_3 , H_2SO_4 и KF .

Важной характеристикой ПСМ является межслойная прочность σ_z , которая оценивает способность пористых элементов сопротивляться расслаиванию под действием сил, направленных перпендикулярно плоскости листа. Прочность σ_z определяется количеством, площадью макроконтakta, расположением и качеством сварных соединений проволок различных слоев сеток. Поэтому за критерий меж-

слоистой прочности принято условие достижения предельного значения осредненных макроскопических напряжений, действующих в направлении оси Z (см. рис. 1):

$$\sigma_Z = \frac{\min \left[\sum_{j=1}^m P_{jZ} \right]}{S}, \quad (3)$$

где P_{jZ} — максимальная сила в направлении оси Z , воспринимаемая j -м сварным соединением проволок между i -м и $(i+1)$ -м слоями сеток на площади S .

В процессе приложения к образцу силы, действующей вдоль оси Z , разрушение отдельных сварных соединений может быть вызвано как отрывом проволок, так и их срезом. Характер разрушения определяется расположением поверхности макроконтакта, на которой произошло образование твердофазного соединения. Поэтому силу P_{jZ} можно определить из условия

$$P_{jZ} = \min \left[\frac{P_{j\text{отр}}}{\cos \theta_{\Pi}}; \frac{P_{j\text{ср}}}{\sin \theta_{\Pi}} \right],$$

где $P_{j\text{отр}}$ — сила отрыва, направленная перпендикулярно к поверхности j -го соединения; $P_{j\text{ср}}$ — сила среза j -го соединения.

Экспериментальные исследования расположения поверхности контакта сварных соединений проволок в ПСМ на основе фильтровых сеток плотняного переплетения позволили установить, что среднее значение угла $\theta_{\Pi} < 30^\circ$, поэтому разрушение образцов при испытании на межслойную прочность происходит путем отрыва проволок в сварных соединениях, т. е.

$$P_{jZ} = \frac{P_{j\text{отр}}}{\cos \theta_{\Pi}}. \quad (4)$$

Силу отрыва можно определить как

$$P_{j\text{отр}} = \varphi \sigma_{\text{в}} F_{\Gamma}. \quad (5)$$

Принимая допущение о равенстве послойной деформации при сварке давлением сеток одного типоразмера и подставляя уравнения (1), (2), (4), (5) в формулу (3), получаем выражение для определения относительной межслойной прочности ПСМ:

$$\frac{\sigma_Z}{\sigma_{\text{в}}} = \min \left\{ \left(\frac{\varphi F_{\Gamma} \bar{m}_{\text{уд}}}{\cos \theta_{\Pi}} \right)_{i,i+1} \right\}_{i=1 \dots n}.$$

Анализ полученного уравнения показал, что относительная межслойная прочность ПСМ возрастает не только с увеличением количества

перекрестий проволок сеток, площади единичного макроконтакта и с уменьшением угла θ_{Π} , но и с повышением качества образовавшихся сварных соединений.

Результаты расчета относительной межслойной прочности ПСМ на основе фильтровых сеток П60 (ГОСТ 3187-76) из стали 12Х18Н10Т с перпендикулярным расположением приведены на рис. 5 в координатах $\sigma_Z/\sigma_{\text{в}}$, ε , где

$$\varepsilon = 1 - \frac{h_{\Pi}}{h_c [\bar{\Psi}(n-1)+1]}$$

(h_{Π} — толщина ПСМ).

Анализ графических зависимостей позволил установить, что при $\varepsilon > 0,2$ относительная межслойная прочность ПСМ $\sigma_Z/\sigma_{\text{в}}$ возрастает в результате увеличения как площади единичных сварных соединений проволок, так и их количества. Более высокое качество соединений проволок, выполненных диффузионной сваркой брикета сеток после химического травления, позволяет значительно повысить

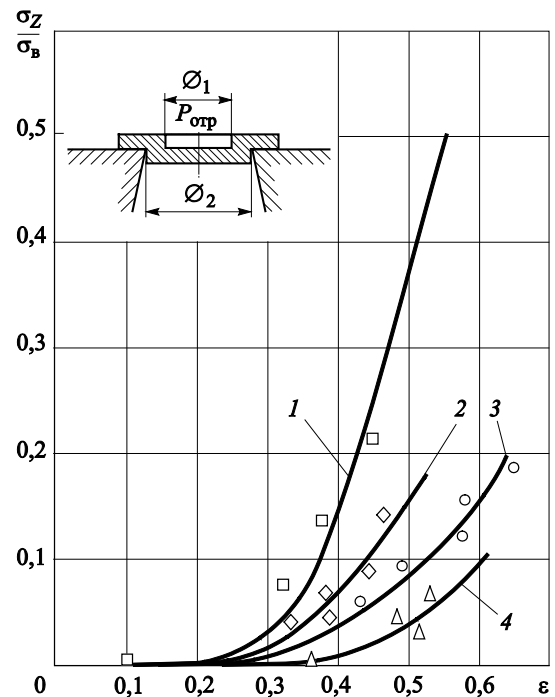


Рис. 5. Влияние относительного обжатия брикета сеток при сварке давлением на относительную межслойную прочность ПСМ на основе фильтровых сеток П60, полученных диффузионной сваркой после травления (1) и без травления (2), сваркой прокаткой в вакуумированных конвертах брикета сеток после травления (3) и сваркой прокаткой в аргоне без травления (4):
— — расчетные данные;
□, ◇, ○, △ — экспериментальные данные

межслойную прочность ПСМ при заданных конструкции и значениях относительного обжатия брикета сеток.

Экспериментальную проверку расчетных зависимостей проводили на образцах, полученных диффузионной сваркой и сваркой прокаткой в вакуумированных конвертах и в среде аргона на установке «Атмосфера-1». В процессе эксперимента измеряли силу, при которой происходит разрушение образца на отрыв $P_{отр}$, а прочность на отрыв вычисляли по формуле

$$\sigma_z = \frac{P_{отр}}{S_k},$$

где S_k — площадь поперечного сечения образца, по которой произошло разрушение образца, определяемая как площадь кольца (см. рис. 5).

Проверка расчетной модели по критерию Фишера при 5%-ном уровне значимости показала, что она адекватна. Полученные расчетные и экспериментальные зависимости, приведенные на рис. 5, позволяют определить технологические параметры процесса изготовления листовых ПСМ с заданными значениями межслойной прочности. Кроме того, полученные зависимости для оценки σ_z/σ_b могут быть использованы для определения предельных значений коэффициентов вытяжки при изготовлении изделий из ПСМ листовой штамповкой.

Выводы

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований формирования брикета сеток, закономерностей совместной деформации проволок и образования сварных соединений получены функциональные зависимости, анализ которых позволяет определить конструктивные и технологические параметры, обеспечивающие максимальную межслойную прочность ПСМ при заданных значениях относительного обжатия брикета сеток.

2. Показано, что низкое качество сварных соединений проволок, образованных в процессе сварки при скоростях деформации $\dot{\epsilon}_n = 0,5 \cdot 10^{-2} \dots 0,5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$, объясняется высоким сопротивлением деформированию микронеровностей и низкой скоростью массопереноса в зоне контакта.

3. Повышение межслойной прочности ПСМ при низких скоростях деформации ($\dot{\epsilon}_n < 1 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) достигается в результате контактной ползучести и увеличения скорости диффузионного массопереноса, а при интенсивном динамическом нагружении ($\dot{\epsilon}_n > 1 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$) — путем локального нагрева контактных поверхностей, снижения сопротивления деформированию микронеровностей и повышения скорости массопереноса.

Литература

- [1] Пелевин Ф.В. Технология изготовления пористых материалов. *Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса*, 2007, № 3, с. 46–51.
- [2] Белов С.В., ред. *Пористые проницаемые материалы: справочник*. Москва, Металлургия, 1987. 338 с.
- [3] Sparks T., Chase G. *Filters and Filtration. Handbook*. Elsevier, 2013. 444 p.
- [4] Пелевин Ф.В., Аврамов Н.И., Орлин С.А., Синцов А.Л. Эффективность теплообмена в пористых элементах конструкций жидкостных ракетных двигателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/698.html> (дата обращения 20 марта 2016).
- [5] Xu G., Liu Y., Luo X., Ma J., Li H. Experimental investigation of transpiration cooling for sintered woven wire mesh structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 91, pp. 898–907.
- [6] Зейгарник Ю.А., Поляков А.Ф., Стратьев В.К., Третьяков А.Ф., Шехтер Ю.Л. *Испытания пористого сетчатого материала в качестве оболочки лопаток высокотемпературных газовых турбин*. Москва, Препринт, ОИВТ РАН, 2010, № 2-502, 64 с.
- [7] Bunker R.S. Gas turbine cooling. Moving from macro to micro cooling. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2013, 3 p.
- [8] Новиков Ю.М., Большаков В.А. Инженерная школа МГТУ им. Н.Э. Баумана: комбинированные пористые сетчатые материалы. Эффективные, безопасные и экологичные изделия на их основе. *Безопасность жизнедеятельности*, 2005, № 11, с. 53–56.

- [9] Третьяков А.Ф. Технологическая наследственность в процессе изготовления изделий из пористых сетчатых материалов с заданными свойствами. Сообщение 1. Влияние конструкции брикета сеток и относительного обжатия структурообразующих элементов на пористость листовых заготовок. *Производство проката*, 2013, № 5, с. 32–42.
- [10] Кочешков И.В. Анализ образования физического контакта между компонентами композита при уплотнении заготовки, состоящей из слоев алюминиевой фольги и волокон бора. *Производство проката*, 2013, № 12, с. 15–19.
- [11] Третьяков А.Ф. Консолидация структурообразующих элементов в процессе горячей прокатки металлических сеток. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*, 2016, № 1, с. 5–10.
- [12] Третьяков А.Ф. Технологическая наследственность в процессе изготовления изделий из пористых сетчатых материалов с заданными свойствами. Сообщение 2. Закономерности влияния пластической деформации и консолидации проволок сеток на технологические и теплофизические свойства пористых сетчатых материалов. *Производство проката*, 2013, № 6, с. 29–34.
- [13] Третьяков А.Ф., Сабельникова Т.М., Харитонов Л.К. Очистка поверхности металлов в процессе изготовления и восстановления деталей машин. *Технология металлов*, 2001, № 5, с. 35–38.

References

- [1] Pelevin F.V. Tekhnologiya izgotovleniya poristykh materialov [Manufacturing technology of porous materials]. *Vestnik assotsiatsii VUZov turizma i servisa* [Universities for Tourism and Service Association Bulletin]. 2007, no. 3, pp. 46–51.
- [2] *Poristye pronitsaemye materialy: Spravochnik* [Porous permeable materials: Handbook]. Ed. Belov S.V. Moscow, Metallurgiya publ., 1987. 338 p.
- [3] Sparks T., Chase G. *Filters and Filtration. Handbook*. Elsevier, 2013. 444 p.
- [4] Pelevin F.V., Avramov N.I., Orlin S.A., Sintsov A.L. Effektivnost' teploobmena v poristykh elementakh konstruktssii zhidkostnykh raketnykh dvigatelei [Heat exchange efficiency in porous structural elements of liquid-propellant rocket engines]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation]. 2013, is. 4. Available at: <http://Enjournal.ru/catalog/machin/roset/689.html> (accessed 20 March 2016).
- [5] Xu G., Liu Y., Luo X., Ma J., Li H. Experimental investigation of transpiration cooling for sintered woven wire mesh structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 91, pp. 898–907.
- [6] Zeigarnik Iu.A., Poliakov A.F., Strat'ev V.K., Tret'iakov A.F., Shekhter Iu.L. *Ispytaniia poristogo setchatogo materiala v kachestve obolochki lopatok vysokotemperaturnykh gazovykh turbin*. Moscow, Preprint, OIVT RAN, 2010, no. 2-502, 64 p.
- [7] Bunker R.S. Gas turbine cooling. Moving from macro to micro cooling. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2013, 3 p.
- [8] Novikov Iu.M., Bol'shakov V.A. Inzhenernaia shkola MGTU im. N.E. Baumana: kombinirovannye poristye setchatye materialy. Effektivnye, bezopasnye i ekologichnye izdeliia na ikh osnove [School of engineering Bauman Moscow State Technical University: combined porous mesh materials. Efficient, safe and environmentally friendly products on their basis]. *Bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti* [Life safety]. 2015, no. 11, pp. 53–56.
- [9] Tret'iakov A.F. Tekhnologicheskaiia nasledstvennost' v protsesse izgotovleniia izdelii iz poristykh setchatykh materialov s zadannymi svoistvami. Soobshchenie 1. Vliianie konstruktssii briketa setok i otnositel'nogo obzhatiiia strukturoobrazuiushchikh elementov na poristost' listovykh zagotovok [Technological heredity in the process of manufacture of porous mesh materials with desired properties. Message 1. The effect of the structure of the briquette grids and the relative compression-forming elements on the porosity of sheet materials]. *Proizvodstva prokata* [Rolled Products Manufacturing]. 2013, no. 5, pp. 32–42.
- [10] Kocheshkov I.V. Analiz obrazovaniia fizicheskogo kontakta mezhdu komponentami kompozita pri uplotnenii zagotovki, sostoiaishchei iz sloev aliuminievoi fol'gi i volokon bora [Analysis of the formation of physical contact between the components of the composite

- during compaction workpiece consisting of layers of aluminum foil and fibers of boron]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing]. 2013, no. 12, pp. 15–19.
- [11] Tret'iakov A.F. Konsolidatsiia strukturoobrazuiushchikh elementov v protsesse goriachei prokatki metallicheskih setok [Consolidation of structure-forming elements in the course of hot deformation of metal gauze]. *Problemy cherno metallurgii i materialovedeniia* [Problems of ferrous metallurgy and materials science]. 2016, no. 1, pp. 5–10.
- [12] Tret'iakov A.F. Tekhnologicheskaiia nasledstvennost' v protsesse izgotovleniia izdelii iz poristykh setchatykh materialov s zadannymi svoistvami. Soobshchenie 2. Zakonomernosti vliianiia plasticheskoi deformatsii i konsolidatsii provolok setok na tekhnologicheskie i teplofizicheskie svoistva poristykh setchatykh materialov [Technological heredity in the process of manufacture of porous mesh materials with desired properties. Message 2. Regularities of the influence of plastic deformation and the consolidation of the wires of the grids on the technological and thermophysical properties of porous mesh materials]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing]. 2013, no. 6, pp. 29–34.
- [13] Tret'iakov A.F., Sabel'nikova T.M., Kharitonova L.K. Ochistka poverkhnosti metallov v protsesse izgotovleniia i vosstanovleniia detalei mashin [Surface cleaning of metals in the process of manufacture and recovery of machine parts]. *Tekhnologiya metallov* [Technology of Metals]. 2001, no. 5, pp. 35–38.

Статья поступила в редакцию 08.06.2016

Информация об авторе

ТРЕТЬЯКОВ Анатолий Федорович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки материалов». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: tret'yakov@bmstu.ru).

Information about the author

TRETYAKOV Anatoliy Fyodorovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technologies of Material Processing. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: tret'yakov@bmstu.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 16-е издание учебника
В.И. Феодосьева

«Сопротивление материалов»

Книга соответствует традиционной программе технических вузов. Излагаются следующие разделы курса сопротивления материалов: растяжение, кручение, изгиб, статически неопределимые системы, теория напряженного состояния, теория прочности, толстостенные трубы и тонкостенные оболочки, прочность при переменных напряжениях, расчеты при пластических деформациях, устойчивость и методы испытаний. По сравнению с предыдущими изданиями она сокращена за счет разделов, которые на лекциях обычно не читаются, и дополнена некоторыми элементарными сведениями по композиционным материалам.

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