

Исследование механических и технологических свойств листовых пористых сетчатых материалов из стали 12X18H10T

© А.Ф. Третьяков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Проведено исследование механических характеристик пористых сетчатых материалов (ПСМ) с применением структурного подхода, который предполагает определение механических свойств исходя из геометрических параметров (типоразмера) сеток, их количества, взаимного расположения, механизма пластической деформации и качества консолидации структурообразующих элементов. Показано, что максимальной межслойной прочностью при заданной конструкции и обжатии брикета сеток обладают ПСМ, изготовленные диффузионной сваркой после химической обработки сеток. Получены зависимости для определения прочности, пластичности и анизотропии ПСМ в плоскости листа при одноосном и двухосном растяжении. Установлено, что повышение штампуемости и свариваемости листовых заготовок достигается в результате уменьшения анизотропии прочности, пластичности и теплопроводности. Для снижения анизотропии следует применять сетки с квадратными ячейками, увеличивать их количество, уменьшать угол между ними и увеличивать обжатие в процессе их твердофазного соединения.

Ключевые слова: пористый сетчатый материал, анизотропия, прочность, пластичность, скорость деформации, сварка, листовая штамповка.

Введение. При изготовлении изделий из пористых материалов (ПМ) необходимо обеспечить получение не только заданной формы и размеров деталей, гидравлических характеристик и размеров пор пронизываемых элементов, но и требуемых механических свойств. Результаты исследования порошковых, волоконных и сетчатых ПМ показали, что эксплуатационным требованиям функционирования элементов систем охлаждения и ряда других изделий наиболее полно отвечают материалы, получаемые консолидацией металлических сеток с применением горячей деформации в контролируемой газовой среде [1].

Пористые материалы на основе металлических тканых проволочных сеток, получившие название «пористые сетчатые материалы» (ПСМ) благодаря организованной структуре и сварке проволок сеток между собой, обладают стабильными и воспроизводимыми характеристиками. При этом для ПСМ характерны более высокие механические и технологические свойства, чем для порошковых ПМ аналогичного химического состава.

Листовые ПСМ применяют для изготовления изделий высокой прочности с требуемыми гидравлическими, фильтрующими и теплофизическими свойствами.

Экспериментальные исследования штампуемости и свариваемости ПСМ из стали 12Х18Н10Т показали, что более технологичными являются заготовки с высокой межслойной прочностью, низкой анизотропией механических свойств в плоскости листа. При этом установлено, что формоизменение лимитируется не только опасностью разрушения в плоскости листа, но и возможностью расслоения заготовки.

Целью работы является изучение влияния конструкции брикета тканых сеток и технологических параметров сварки давлением проволок сеток на межслойную прочность и механические свойства заготовок в плоскости листа ПСМ, а также на штампуемость и свариваемость материалов из стали 12Х18Н10Т.

Межслойная прочность ПСМ. При исследовании механических характеристик применен структурный подход, который предполагает определение механических свойств исходя из геометрических параметров (типоразмера) сеток, их количества, взаимного расположения, механизма пластической деформации и качества консолидации структурообразующих элементов.

Пористые элементы на основе металлических сеток представляют собой сварные конструкции, свойства которых определяются структурой материала проволок, их размерами, взаимным расположением, обжатием заготовок и полнотой образования твердофазных соединений на площадях контакта. Количество и площадь перекрестий проволок зависят от конструкций брикета сеток и механизма пластической деформации структурообразующих элементов при обжатии.

Конструкция брикета определяется типоразмером сеток, их количеством и взаимным расположением. Геометрические параметры сеток зависят от типа переплетения проволок, диаметров основ d_{oc} , утков d_{yt} и расстояний между основами l_{oc} , используя которые, можно получить два безразмерных параметра: $n_d = d_{yt}/d_{oc}$; $n_l = l_{oc}/d_{oc}$ для определения основных характеристик сеток независимо от их типоразмера. По типу переплетения проволочные тканые сетки разделяются на сетки с квадратными ячейками

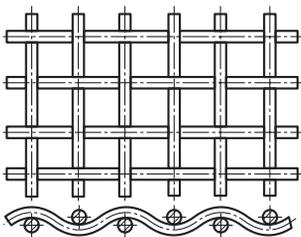


Рис. 1. Конструкция сетки с квадратными ячейками

ГOST 3826–82) (рис. 1) и фильтровые сетки, которые могут быть полотняного (ГОСТ 3187–76), саржевого двухстороннего и одно-стороннего переплетения (рис. 2).

Тканые сетки, выпускаемые отечественной промышленностью, маркируются номером, который для фильтровых сеток определяется номинальным числом основ m_{oc} на 1 дм их длины, а для сеток с квадратными

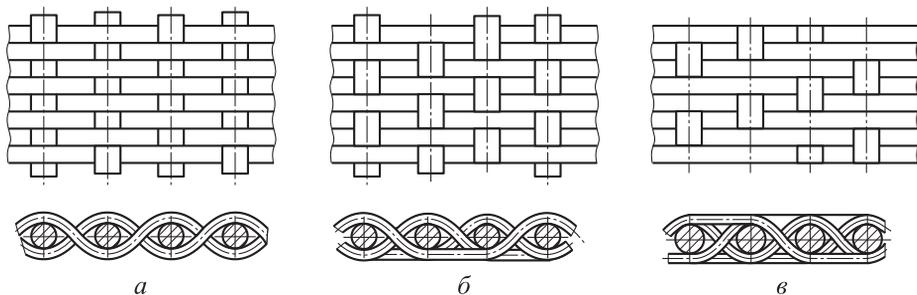


Рис. 2. Конструкция фильтровых сеток полотняного (а), саржевого двухстороннего (б) и саржевого одностороннего (в) переплетения

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 $l = a + d$, для фильтровых сеток между основами $l_{oc} = 100/m_{oc}$, между утками $l_{yt} = d_{yt}/K_c$, где коэффициент $K_c = 1; 1,5; 2$ — соответственно при полотняном, двухстороннем и одностороннем переплетении проволок.

Взаимное расположение сеток в брикете описывают два параметра: угол β , под которым проволоки соседних сеток перекрещиваются, и коэффициент плотности упаковки слоев ψ :

$$\psi = \frac{2t_c}{(h_{c1} + h_{c2})},$$

где t_c — расстояние между осями симметрии сеток толщиной h_{c1} и h_{c2} (рис. 3).

Толщина сетки зависит от диаметра проволок, типа их переплетения и определяется для фильтровых сеток как

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

а для сеток с квадратными ячейками, изготовленных из проволок диаметром d ,

$$h_c = 2d.$$

Значение 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

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

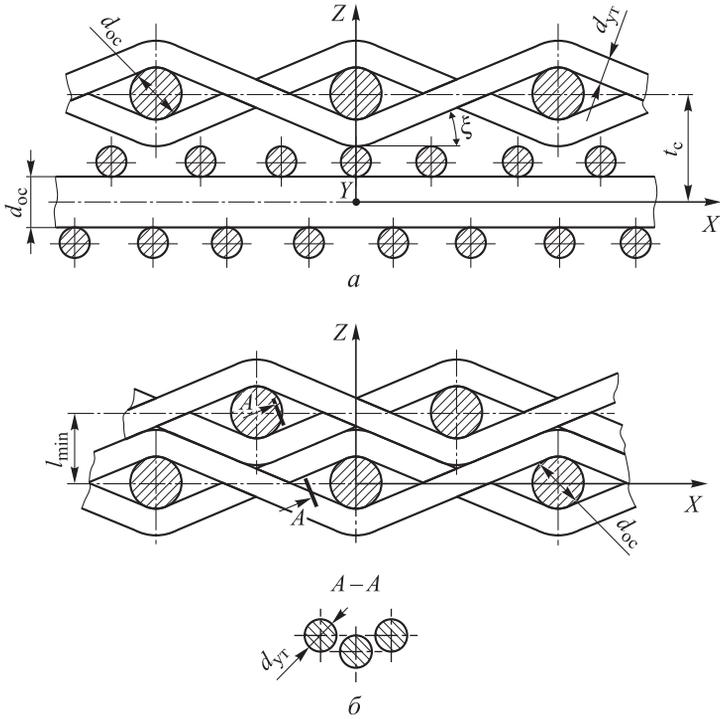


Рис. 3. Расположение фильтровых сеток в брикете:
 а — перпендикулярное; б — параллельное

С учетом допущения о том, что изменение значения ψ от смещения описывается линейной зависимостью, в работе [2] получено выражение для оценки математического ожидания величины ψ :

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

где ψ_{\min} — минимальное значение коэффициента плотности упаковки сеток в брикете.

Значение ψ_{\min} при заданном взаимном расположении структурообразующих элементов определяется геометрическими параметрами сеток. Так, для фильтровых сеток минимальное значение коэффициента ψ достигается при параллельном расположении сеток ($\beta = 0$) плотняного переплетения [2]:

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

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

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

Проведенный анализ позволил установить, что ψ_{\min} при параллельном расположении сеток уменьшается с увеличением 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 значение коэффициента плотности упаковки позволили получить следующее выражение для определения толщины брикета, состоящего из n слоев:

$$h_{\text{бр}} = \frac{h_{c1} + h_{cn}}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \bar{\psi}_i \frac{h_{ci} + h_{ci+1}}{2},$$

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

Относительное обжатие брикета сеток при изготовлении ПСМ определяется из выражения

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

где Δh — абсолютная величина уменьшения высоты брикета при изготовлении листовой заготовки.

Толщина ПСМ, получаемого путем пластической деформации брикета сеток и сварки проволок, может быть определена как:

$$h_{\text{п}} = \left[\frac{h_{c1} + h_{cn}}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \bar{\psi} \frac{h_{ci} + h_{ci+1}}{2} \right] (1 - \varepsilon).$$

Изучение закономерностей пластической деформации проволок при обжатии брикетов сеток как в процессе прокатки, так и осадки, показало, что при малых значениях ε происходит заполнение пустот путем изгиба проволок. Начиная с некоторого $\varepsilon_{\text{н}}$, образуются перекрестия проволок сеток в местах совместной деформации. При $\varepsilon > \varepsilon_{\text{н}}$ увеличивается количество перекрестий проволок сеток в ПСМ, которое достигает максимума при $\varepsilon = \varepsilon_{\text{м}}$.

Относительное обжатие брикета сеток ε_n , при котором происходит совместная пластическая деформация проволок в местах их контактов, определяется типоразмером сеток, их количеством и, поскольку зависит от $\bar{\psi}$, является случайной величиной. Значение ε_n определяется по данным работы [2]. Значение ε_m вычисляется 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 (см. рис. 3).

Экспериментальные исследования процесса пластической деформации проволок позволили установить, что относительная степень деформации перекрестий проволок при обжатии брикета сеток может быть описана линейным уравнением вида

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

Общее количество перекрестий m , образованных проволоками двух контактирующих сеток, определяется их габаритами, типоразмерами, взаимным расположением и относительным обжатием брикета. Значение m может быть определено через число контактов проволок $\bar{m}_{уд}$ на единице площади S , имеющих относительную степень деформации ε_n :

$$m = \bar{m}_{уд} S. \quad (1)$$

Количество контактов проволок $\bar{m}_{уд}$, образованных при относительном обжатии брикета сеток в интервале $\varepsilon_m \geq \varepsilon > \varepsilon_n$, может быть определено следующим образом:

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

При $\varepsilon > \varepsilon_m$ общее количество перекрестий остается постоянным ($m_{уд} = m_{уд\max}$), а $\bar{m}_{уд}$ определяется по формуле

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

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

Значение $m_{\text{уд max}}$ для брикета фильтровых сеток определяется как

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

Форма и размеры площади контактов в перекрестиях проволок сеток определяются взаимным расположением проволок, их диаметром и обжатием брикета, конкретные значения этих параметров могут изменяться в широких пределах. Поскольку изучение процесса образования контактов проволок при горячей деформации брикета сеток связано с методическими трудностями, был использован метод физического моделирования. Наиболее близкая модель, обладающая геометрическим подобием, представляет собой два цилиндрических элемента, соотношение диаметров, взаимное расположение, относительная степень деформации которых соответствуют перекрестиям, образовавшимся в реальном ПСМ.

Поверхность контакта без учета шероховатости, образовавшейся в процессе пластической деформации перекрещивающихся элементов, получила название площади макроконтакта F_r , которая равна площади горизонтальной проекции пятна контакта. Для определения зависимости $F_r/d_1^2 = f(d_1/d_2, \beta, \varepsilon_n)$ использован метод планирования эксперимента. Исследования, выполненные на свинцовых цилиндрических элементах диаметрами d_1 и d_2 ($d_2 \geq d_1$), позволили получить регрессионную зависимость [3], анализ которой показал, что с уменьшением угла β , под которым они перекрещиваются, и увеличением ε_n возрастает площадь макроконтакта F_r . При этом максимальное значение F_r/d_1^2 при постоянных значениях ε_n и β достигается в том случае, когда $d_1 = d_2$.

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 сварного соединения.

Теоретические и экспериментальные исследования процесса пластической деформации микронеровностей на площади F_r показали [4], что на ФПК существенное влияние оказывает скорость деформации

$$\dot{\varepsilon}_{\Pi} = \varepsilon_{\Pi}/t,$$

где t — время деформации перекрестия.

Увеличение ФПК при $\dot{\varepsilon}_{\Pi} < 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ протекает тем интенсивнее, чем выше реологическая константа материала, температура и длительность процесса деформирования, а в условиях высокоскоростного нагружения ($\dot{\varepsilon}_{\Pi} > 0,5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$) площадь увеличивается с ростом градиента плотности дислокаций в зоне контакта.

Необходимым условием получения ПСМ является образование твердофазных соединений проволок сеток, поскольку их количество, взаимное расположение и площадь существенно влияют на механические и технологические свойства материала. Определение оптимального режима сварки для конкретного технологического процесса получения ПСМ осуществляли на физических моделях, представляющих собой перекрестия проволок из стали 12Х18Н10Т диаметром 1, 4 и 5 мм. Качество сварных соединений оценивали по относительной прочности $\sigma_{\text{отр}}/\sigma_{\text{в}}$ при испытании на отрыв. Прочность сварных соединений перекрестий проволок на отрыв определяли как

$$\sigma_{\text{отр}} = \frac{P_{\text{отр}}}{F_{\Gamma}},$$

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

Если $P_{\text{отр}}$ представить как $P_{\text{отр}} = \sigma_{\text{в}} F_{\text{св}}$ (где $\sigma_{\text{в}}$ — предел прочности проволок после термомеханической обработки по режиму сварки давлением; $F_{\text{св}}$ — площадь макроконтakta, на которой произошло образование равнопрочного соединения), то отношение $\sigma_{\text{отр}}/\sigma_{\text{в}}$ будет равно относительной площади контакта проволок, на которой произошло образование равнопрочного соединения:

$$\varphi = \frac{F_{\text{св}}}{F_{\Gamma}} = \frac{\sigma_{\text{отр}}}{\sigma_{\text{в}}}. \quad (2)$$

Результаты экспериментальных исследований влияния температуры, относительной степени деформации и скорости деформации в процессе диффузионной сарки, сварки прокаткой и ударной сварки в вакууме на относительную прочность соединений проволок на отрыв приведены на рис. 4–7.

Анализ полученных зависимостей позволил установить, что при диффузионной сварке и сварке прокаткой минимальная относительная степень деформации, при которой образуется сварное соединение

проволок, возрастает с уменьшением температуры процесса и времени деформирования (см. рис. 4). Изучение влияния ϵ_{II} на относительную прочность сварных соединений, полученных диффузионной сваркой (см. рис. 5) и сваркой прокаткой (см. рис. 6), позволило выявить наличие максимума при $\epsilon_{II} = 0,1 \dots 0,2$, который возрастает с увеличением температуры, глубины вакуума и времени процесса сварки.

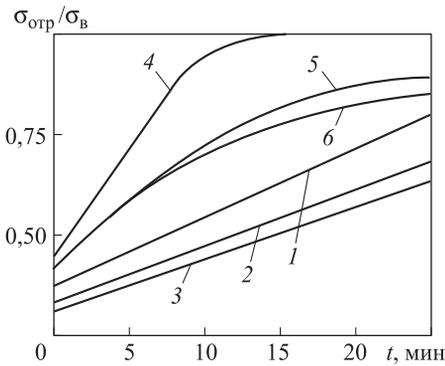


Рис. 4. Влияние времени диффузионной сварки на относительную прочность на отрыв крестообразных соединений проволоки, полученных при температурах 1373 К (1–3), 1473 К (4–6) и относительных степенях деформации ϵ_{II} :
1, 4 — 0,1; 2, 5 — 0,3; 3, 6 — 0,5

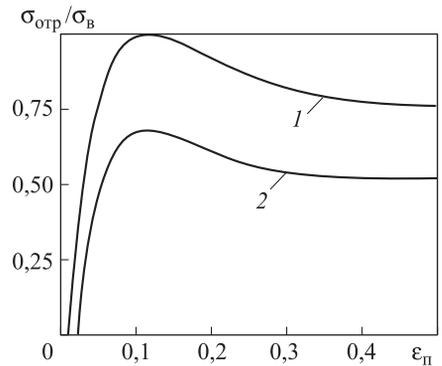


Рис. 5. Влияние относительной степени деформации на относительную прочность на отрыв крестообразных соединений проволоки, полученных диффузионной сваркой при $t = 15$ мин и температурах, К:
1 — 1373; 2 — 1473

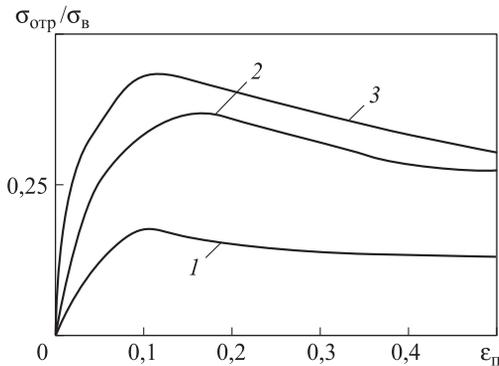


Рис. 6. Влияние относительной степени деформации на относительную прочность на отрыв крестообразных соединений проволоки, полученных сваркой прокаткой в вакуумированных конвертах при температурах, К:
1 — 1373; 2 — 1473; 3 — 1573

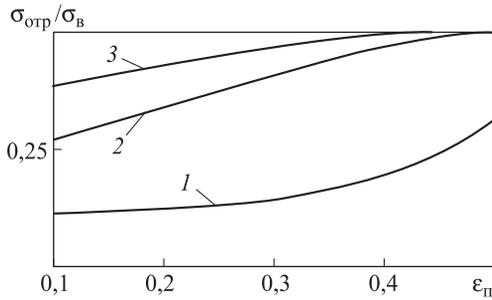


Рис. 7. Влияние относительной степени деформации на относительную прочность на отрыв крестообразных соединений проволок, полученных ударной сваркой в вакууме при температурах, К:
1 — 1273; 2 — 1373; 3 — 1473

Проведенные эксперименты показали, что в результате непровара сварного соединения проволок, полученных при сварке прокаткой в вакуумированных конвертах, образуются механические концентраторы напряжений, влияние которых на снижение механических свойств возрастает с уменьшением относительной площади $F_{св}/F_{г}$. Следовательно, можно предположить, что с ростом относительного обжатия брикета сеток, снижением температуры и времени процесса сварки произойдет снижение пластичности получаемых ПСМ.

В результате исследования процесса образования сварных соединений проволок в условиях ударной сварки в вакууме установлено, что с увеличением ϵ_{II} и температуры процесса происходит повышение относительной прочности сварного соединения (см. рис. 7). Это обусловлено тем, что в условиях оптимального динамического нагружения не только возрастает ФПК, но и более интенсивно протекает объемное взаимодействие в зоне соединения путем аномального массопереноса по межузельному механизму [3]. Этим же можно объяснить то обстоятельство, что образование связей происходит и на периферии контакта, где деформация и контактные напряжения значительно ниже, чем в центральной зоне.

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 по режимам, приведенным в работе [5], 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 сопроти-

вляться расслаиванию под действием сил, направленных перпендикулярно плоскости листа. Значение σ_Z определяется количеством, размером, расположением и качеством сварных соединений проволок различных слоев сеток. Поэтому за критерий межслойной прочности принято предельное значение осредненных макроскопических напряжений, действующих в направлении оси Z (см. рис. 3):

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

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 произойти как в результате отрыва проволок, так и их среза. Характер разрушения определяется расположением поверхности макроконтakta, на которой произошло образование сварного соединения. Поэтому сила P_{jZ} может быть определена 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; θ_{Π} — угол между осью Z (см. рис. 3) и перпендикуляром к площади F_{Γ} .

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

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

Значение $P_{j\text{отр}}$ может быть определено как

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

Подставляя в выражение (3) уравнения (1), (2), (4) и (5), получим формулу для расчета относительной межслойной прочности ПСМ:

$$\frac{\sigma_Z}{\sigma_B} = \min \left\{ \left(\frac{\varphi F_r \bar{m}_{уд}}{\cos \theta_{п}} \right)_{i,i+1} \right\}_{i=1 \dots n} \quad (6)$$

При этом было принято допущение о равенстве относительной прочности на отрыв физических моделей $\sigma_{отр}/\sigma_B$ и относительной площади контакта φ единичного сварного соединения проволок соседних сеток в ПСМ при одинаковых значениях $\varepsilon_{п}$. Подставив в выражение (6) значения $\sigma_{отр}/\sigma_B$, приведенных на рис. 4, 6, 7, получим зависимости (рис. 8) для расчета σ_Z/σ_B ПСМ на основе фильтровых сеток П60 (ГОСТ3187–76).

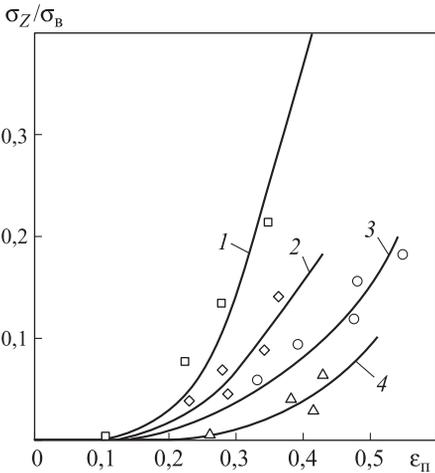


Рис. 8. Влияние относительного обжатия брикета сеток при сварке давлением на относительную прочность ПСМ на основе фильтровых сеток П60 (ГОСТ 3187–76) из стали 12Х18Н10Т, полученных:

1 — диффузионной сваркой после травления; 2 — то же без травления; 3 — сваркой прокаткой в вакуумированных конвертах брикета сеток после травления; 4 — сваркой прокаткой в аргоне без травления; — — расчетные данные; □; ◇; ○; △ — экспериментальные данные

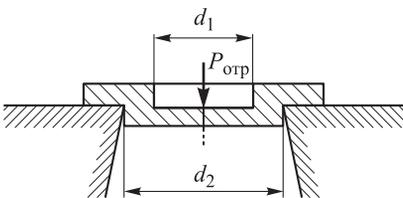


Рис. 9. Конструкция экспериментального образца

приведена на рис. 9, измеряли силу $P_{отр}$, при которой происходит их разрушение по кольцу с внутренним диаметром d_1 и наружным d_2 . Прочность на отрыв вычисляли по формуле

них сеток в ПСМ при одинаковых значениях $\varepsilon_{п}$. Подставив в выражение (6) значения $\sigma_{отр}/\sigma_B$, приведенных на рис. 4, 6, 7, получим зависимости (рис. 8) для расчета σ_Z/σ_B ПСМ на основе фильтровых сеток П60 (ГОСТ3187–76). Анализ результатов показал, что при $\varepsilon > 0,2$ с ростом относительного обжатия брикета сеток σ_Z/σ_B возрастает в результате увеличения как площади единичного сварного соединения, так и количества соединений. Более высокое качество сварных соединений проволок (оценивается величиной φ), полученных диффузионной сваркой с предварительным химическим травлением сеток, обеспечивает получение ПСМ с наиболее высокой межслойной прочностью при заданной конструкции брикета сеток и относительном обжатии.

Экспериментальную проверку результатов расчета относительной межслойной прочности проводили на образцах из ПСМ, полученных диффузионной сваркой и сваркой прокаткой в вакуумированных конвертах и в среде аргона на установке «Атмосфера-1».

В процессе эксперимента на образцах, конструкция которых

$$\sigma_Z = \frac{P_{\text{отр}}}{S_k},$$

где S_k — площадь поперечного сечения образца, по которой произошло разрушение образца, определяемая как площадь кольца.

Проверка расчетной модели по критерию Фишера при 5%-ном уровне значимости показала, что она адекватна. Расчетные и экспериментальные зависимости, приведенные на рис. 8, 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.

Исследование механических свойств ПСМ в плоскости листа.

Экспериментальные исследования показали, что ПСМ обладают сложной совокупностью механических характеристик в плоскости листа. Металлические сетки (фильтровые и с квадратными ячейками), применяемые для изготовления ПСМ, обладают явно выраженной анизотропией механических свойств [1].

Для проектирования технологических процессов изготовления ПСМ с заданными механическими характеристиками в плоскости листа принимали допущение о том, что силу в процессе растяжения слои сеток воспринимают пропорционально площади их поперечного сечения и прочности проволок, которые работают на одноосное растяжение. Предельное состояние разрушения ПСМ определяли по минимальному относительному удлинению при разрыве i -го слоя сетки.

В качестве модели принята система перекрещивающихся цилиндрических элементов, обладающих геометрическим подобием с сетками исследуемых типоразмеров. Кроме того, на основе результатов исследования процесса обжатия брикета при изготовлении ПСМ в расчетах принимали равной послойную деформацию сеток, а также пренебрегали вытяжкой и уширением проволок в процессе сварки.

Для определения взаимного расположения сеток в ПСМ и направления деформирования введены три системы координат в плоскости листа. Одна система координат $(X; Y)$ связана с листом ПСМ (ось X расположена в направлении основ 1-го слоя сетки), а другая система $(x_i; y_i)$ определяет взаимное расположение сеток в материале (ось x_i совпадает с направлением основ в i -м слое). Поскольку ПСМ в общем случае является анизотропными, то такие характеристики, как прочность, пластичность и др., теряют смысл, если они указаны в отрыве от направления растяжения. Поэтому использованы взаимно перпенди-

кулярные оси W и Q , показывающие направления деформирования пластин при растяжении. В общем случае ось W составляет угол w_{oc} с осью X и угол α_i с осью x_i .

С учетом принятых допущений и на основе принципа равенства сил, передаваемых совокупностью сварных структурообразующих элементов (проволок сеток) и фиктивным компактным телом, имеющим те же геометрические размеры, что и ПСМ, макроскопические осредненные напряжения растяжения в направлении осей W , Q определяли из следующего выражения:

$$\sigma_{W,Q} = \sum_{i=1}^n \sigma_{iW,Q} \frac{h_i}{h_n},$$

где $\sigma_{iW,Q}$ — макроскопические осредненные напряжения растяжения в i -м слое сетки толщиной h_i в направлениях W , Q ; h_n — толщина ПСМ.

Анализ диаграмм растяжения образцов позволил установить, что более высокой анизотропией обладают фильтровые сетки, а увеличение относительной степени деформации ε_n в процессе сварки сеток приводит к снижению их пластичности в результате образования концентраторов напряжений в местах сварки проволок.

При двухосном растяжении i -го слоя сетки осредненные макроскопические напряжения, возникающие в направлениях W , Q , определяем как:

$$\sigma_{iW,Q} = \frac{P_{iW,Q}}{h_i b(1 + e_{Q,W})},$$

где $P_{iW,Q}$ — силы, воспринимаемые i -м слоем сетки в направлениях W , Q ; $e_{Q,W}$ — относительное удлинение образца в направлениях Q , W ; b — ширина образца.

Наибольшее значение относительного удлинения сетки δ_W в направлении деформирования W к моменту разрушения достигается при расположении сетки под углом $\alpha = \alpha_{кр}$, когда разрыв происходит одновременно по основам и уткам. Исследование влияния значения ε_n в процессе сварки на пластичность фильтровых сеток позволило установить, что при $\varepsilon_n < 0,5$ в условиях одноосного растяжения относительное удлинение фильтровых сеток в направлении основ выше, чем в направлении утков, т. е. $\delta_x > \delta_y$, а угол $\alpha_{кр}$ находится в интервале $45^\circ \geq \alpha_{кр} \geq 0$. В условиях, близких к симметричному двухосному растяжению, сетки разрушаются по проволокам, имеющим меньшую пластичность.

тичность. Для сеток с квадратными ячейками, независимо от $\varepsilon_{\text{п}}$, при сварке соблюдаются равенства $\sigma_{\text{вх}} = \sigma_{\text{вy}}$; $\delta_x = \delta_y$, а угол $\alpha_{\text{кр}} = 45^\circ$.

ПСМ являются сварными конструкциями, состоящими, как правило, из нескольких слоев сеток, поэтому в процессе растяжения они претерпевают равную деформацию. Предельное состояние разрушения определяют как:

$$\delta_W = \min \{ \delta_{iW} \}_{i=1 \dots n},$$

где δ_W , δ_{iW} — относительное удлинение соответственно ПСМ и i -го слоя сетки в направлении W к моменту разрушения.

Прочность ПСМ на основе сеток одного типоразмера при двухосном растяжении в направлении взаимно перпендикулярных осей W , Q может быть определена из следующих выражений:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{в}W} &= \frac{(1 - \varepsilon + \varepsilon_{\text{п}})(1 + \delta_W)}{[\bar{\psi}(n-1) + 1](1 - \varepsilon)(1 + K\delta_W)} \left[\sum_{i=1}^{n_1} \sigma_{i\text{в}W} + \sum_{i=n_1+1}^n \sigma_{iW}(\delta_W) \right]; \\ \sigma_{\text{в}Q} &= \frac{(1 - \varepsilon + \varepsilon_{\text{п}})(1 + K\delta_W)}{[\bar{\psi}(n-1) + 1](1 - \varepsilon)(1 + \delta_W)} \left[\sum_{i=1}^{n_1} \sigma_{i\text{в}Q} + \sum_{i=n_1+1}^n \sigma_{iQ}(\delta_W) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где $\sigma_{i\text{в}W}$, $\sigma_{i\text{в}Q}$ — максимальные макроскопические осредненные напряжения, возникшие в разрушившемся i -м слое сетки в направлении осей W , Q соответственно; $\sigma_{iW}(\delta_W)$, $\sigma_{iQ}(\delta_W)$ — напряжения в неразрушившихся слоях к моменту разрушения ПСМ в направлениях W , Q ; n_1 — количество слоев сеток в ПСМ, разрушившихся при относительном удлинении δ_W ; K — коэффициент, описывающий деформированное состояние при растяжении: $K = 0$ — одноосное растяжение, $K = 1$ — симметричное двухосное растяжение.

Расчеты, выполненные на основе уравнений (7), позволили получить контуры прочности и пластичности ПСМ, которые в полярных координатах представлены на рис. 10 и 11. Анализ полученных результатов показал, что наиболее высокой анизотропией свойств обладают ПСМ на основе фильтровых сеток при их параллельном расположении (см. рис. 10). Применение сеток с квадратными ячейками, расположенными под углом 45° , значительно уменьшает анизотропию прочности и пластичности ПСМ в плоскости листа (см. рис. 11). Кроме того, установлено, что для ПСМ с увеличением относительного обжатия брикета сеток в процессе сварки давлением происходит

повышение прочности в результате уменьшения пористости, а наблюдающееся при этом снижение пластичности тем больше, чем ниже качество сварных соединений проволок сеток.

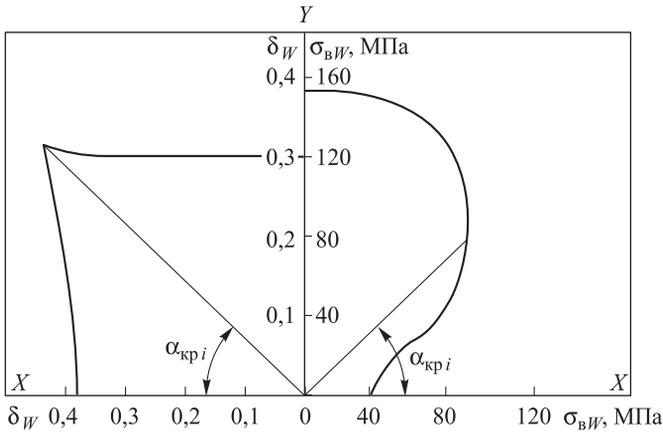


Рис. 10. Контуры прочности $\sigma_{вш}$ и пластичности $\delta_{ш}$ ПСМ, полученного сваркой прокаткой брикета фильтровых сеток П24 с параллельной укладкой слоев при $\epsilon_n = 0,26$, в условиях двухосного растяжения ($K = 0,2$)

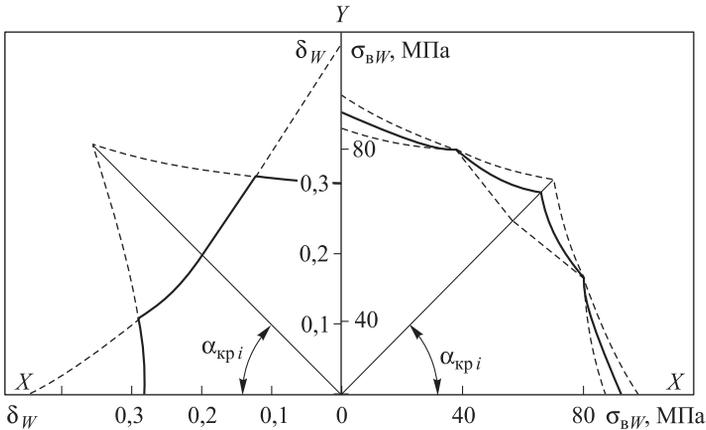


Рис. 11. Контуры прочности $\sigma_{вш}$ и пластичности $\delta_{ш}$ ПСМ, полученных сваркой прокаткой брикета сеток с квадратными ячейками № 1 с укладкой под углом 45° при $\epsilon_n = 0,26$, в условиях двухосного растяжения ($K = 0,2$)

В целях проверки расчетных зависимостей, представленных на рис. 10 и 11, выполнены экспериментальные исследования в условиях двухосного растяжения в процессе гидростатического выпучивания [6]. При деформации через круглую матрицу реализована схема симметричного двухосного растяжения ($K = 1$) в вершине выпучины,

а использование эллиптической матрицы с соотношением осей 1 : 2 обеспечило нагружение, при котором $1 > K > 0$.

В процессе испытания измеряли давление масла P под образцом, радиусы кривизны R_W , R_Q и удлинение материала в направлении главных осей эллипса в области вершины выпучины. Проверку адекватности зависимостей (7) проводили путем сопоставления расчетных и экспериментальных значений давления. Расчетные значения P_p определяли по известной формуле Лапласа, полученной из условия равновесия элемента образца и, следовательно, справедливой для любых материалов, в том числе и пористых

$$P_p = \left(\frac{\sigma_W}{R_W} + \frac{\sigma_Q}{R_Q} \right) h_n.$$

В результате сопоставления расчетных и экспериментальных данных установлено, что относительная ошибка результатов расчета давлений и деформаций не превышает 20 %.

Исследование штампуемости и свариваемости ПСМ. Штампуемость листовых ПСМ, в отличие от традиционных сплавов, лимитируется не только их разрушением, но и недопустимым изменением структурных характеристик, таких как форма, размеры пор и др. [7]. Для оценки штампуемости пористых заготовок проводят технологические пробы, отражающие их поведение при реальной операции листовой штамповки.

Теоретические и экспериментальные исследования штампуемости ПСМ показали, что более технологичными являются заготовки с высокой межслойной прочностью и пластичностью при растяжении, с низкой анизотропией свойств в плоскости листа. В условиях двухосного растяжения, которое имеет место при вытяжке, формовке и отбортовке, происходит увеличение размера пор тем интенсивнее, чем выше исходная пористость заготовки и коэффициенты формоизменения.

При растяжении ПСМ в направлении толщины между отдельными проволоками действуют силы, направленные на отрыв слоев сеток друг относительно друга. Резкое уменьшение или отсутствие изменения толщины материала при его растяжении свидетельствует о разрушении связи между сетками. Для ПСМ с пористостью более 0,3, обладающих низкой прочностью на отрыв, утонение образцов прекращается раньше, чем происходит разрушение заготовок в плоскости листа.

Результаты технологических испытаний показали, что предельный коэффициент вытяжки возрастает с увеличением пористости заготовки. Однако для ПСМ с пористостью 0,35...0,4 при коэффициен-

тах вытяжки, близких к критическим, происходит расслоение изделия. На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что ПСМ из стали 12Х18Н10Т обладают штампуемостью, позволяющей изготавливать осесимметричные проникаемые оболочки с предельной степенью вытяжки 1,7...1,75.

При разработке технологического процесса гибки оболочек из ПСМ в качестве критерия предельных деформаций принят минимально возможный относительный радиус гибки $(r/h_{\text{п}})_{\text{min}}$, который определяется пластичностью заготовки:

$$(r/h_{\text{п}})_{\text{min}} = 1 / [\delta(2 + \delta)],$$

где δ — максимальное относительное удлинение ПСМ при растяжении в направлении, перпендикулярном линии гибки.

Исследования изменения структуры ПСМ, выполненные при $r/h_{\text{п}} = 1,5...2,5$, позволили установить, что на сжатом слое происходит уменьшение размера пор, что в свою очередь приводит к снижению проницаемости в зоне гибки примерно на 30 %. Проницаемость оценивали по изменению скорости истечения газа через изогнутую оболочку при помощи тензометра. Эксперименты показали, что для листового ПСМ толщиной 1 мм с радиусом гибки 1,5 мм уменьшение проницаемости составляет не более 25 % [8].

Пористые материалы, применяемые для изготовления сварных конструкций, помимо таких свойств, как пористость, проницаемость, размер пор, тонкость фильтрования, прочность, пластичность, должны обладать удовлетворительной свариваемостью. При этом необходимо обеспечить минимальную ширину шва, максимальную относительную прочность при отсутствии трещин и других сквозных дефектов, а также минимальное окисление наружной и внутренней поверхностей пор.

Результаты исследования свариваемости показали, что, кроме пористости, на качество соединений, полученных сваркой плавлением, существенное влияние оказывает соотношение коэффициентов эффективной теплопроводности по толщине (λ_z) и в направлении, перпендикулярном движению источника сварки ($\lambda_{\text{ш}}$). Следует отметить, что при сварке высокопористых материалов, для которых характерна низкая теплопроводность по толщине, в зависимости от значения $\lambda_{\text{ш}}$ возможно образование дефектов различного вида. Так, для заготовок с высоким $\lambda_{\text{ш}}$ 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 значение $\lambda_{\text{ш}}$, происходит несплавление отдельных проволок с металлом шва [9].

На основе выполненных экспериментов по аргонодуговой сварке пористых заготовок из стали 12Х18Н10Т установлено, что более качественные сварные соединения достигаются на минимально возможном токе, при котором происходит проплавление корня шва. Для автоматической сварки со скоростью $V_{\text{св}} > 30$ м/ч необходимо увеличение силы тока, что для заготовок с пористостью $\Pi > 0,3$ приводит к образованию подрезов в зоне сплавления, а при сварке со скоростью $V_{\text{св}} < 10$ м/ч возрастает ширина шва. Поэтому скорость сварки следует устанавливать в интервале 10...30 м/ч, причем с увеличением пористости заготовок $V_{\text{св}}$ следует уменьшать. Сварку изделий с пористостью $\Pi > 0,15$ для уменьшения вероятности образования подрезов целесообразно осуществлять с присадочным материалом.

Выполненные исследования сваряемости ПСМ показали, что ширина шва возрастает с увеличением пористости и уменьшением теплопроводности по толщине.

Изучение механических свойств стыковых сварных соединений на разрыв в условиях одноосного и двухосного растяжения позволило установить, что с увеличением пористости материала заготовок происходит снижение относительной прочности, которая при $\Pi > 0,2$ может быть описана следующей эмпирической зависимостью:

$$\sigma_{\text{св}}/\sigma_{\text{в}} = 1,3 - 1,5 \Pi,$$

где $\sigma_{\text{св}}$ — прочность сварного стыкового соединения на разрыв.

Исследование влияния термического цикла аргонодуговой сварки на изменение свойств сварных соединений пористых заготовок позволило установить, что снижение проницаемости сварных изделий пропорционально площади шва, а увеличения размера пор в зонах сплавления и термического влияния не происходит.

Выводы

1. Исследование процесса образования соединений проволок в условиях ударной сварки в вакууме позволило установить, что с увеличением $\varepsilon_{\text{п}}$ и температуры процесса происходит повышение относительной прочности сварных соединений на отрыв. Полученные результаты можно объяснить тем обстоятельством, что в условиях оптимальной скорости деформации не только возрастает ФПК, но и более интенсивно протекает объемное взаимодействие в зоне соединения путем аномального массопереноса по межузельному механизму.

2. Установлено, что, варьируя типом плетения сеток и относительным обжатием брикета сеток в процессе горячей деформации в вакууме, можно активно влиять на межслойную прочность ПСМ

и механические свойства в плоскости листа. Наиболее высокой анизотропией свойств обладают материалы на основе фильтровых сеток при параллельном расположении. Повышение прочности ПСМ с увеличением относительного обжатия брикета сеток возникает в результате уменьшения объема пор, а происходящее при этом снижение пластичности тем больше, чем ниже качество твердообразных соединений структурообразующих элементов.

3. Повышение штампуемости и свариваемости заготовок из ПСМ достигается путем уменьшения анизотропии прочности, повышения пластичности в плоскости листа и межслойной прочности. Такие ПСМ могут быть получены путем диффузионной сварки брикета сеток с квадратными ячейками, увеличения их количества и уменьшения угла, под которым перекрещиваются проволоки соседних слоев сеток.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зейгарник Ю.А., Поляков А.Ф., Стратьев В.К. и др. Испытание пористого сетчатого материала в качестве облопочек лопаток высокотемпературных газовых турбин. *Препринт ОИВТ РАН*, 2010, № 2-502, 64 с.
- [2] 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.
- [3] 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 ПСМ. *Производство проката*. 2013, № 6, с. 29–34.
- [4] Третьяков А.Ф. Консолидация структурообразующих элементов в процессе горячей прокатки металлических сеток. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*, 2016, № 1, с. 5–10.
- [5] Третьяков А.Ф., Сабельникова Т.М., Харитоновна Л.К. Очистка поверхности металлов в процессе изготовления и восстановления деталей машин. *Технология металлов*, 2001, № 5, с. 35–38.
- [6] Куркин С.А. *Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением*. Москва, Машиностроение, 1976, 184 с.
- [7] Третьяков А.Ф. Изменение свойств пористых сетчатых материалов в процессе обработки давлением и сварки давлением. *Производство проката*, 2015, № 2, с. 24–29.
- [8] Третьяков А.Ф. Модернизация системы охлаждения турбинных лопаток энергетических установок. Часть 1. Исследование механических, гидравлических и технологических свойств пористых сетчатых материалов. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2015, № 1, с. 22–26.
- [9] Третьяков А.Ф. Теплофизические свойства проницаемых элементов на основе пористых сетчатых материалов. *Наука и образование. Электронное научное издание*, 2012, № 5. DOI 10.7463/0512.0400624 (дата обращения 31.05.2016).

Статья поступила в редакцию 05.05.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Третьяков А.Ф. Исследование механических и технологических свойств листовых пористых сетчатых материалов из стали 12Х18Н10Т. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 6.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-06-1498>

Третьяков Анатолий Федорович родился в 1945 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1969 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 публикаций. Область научных интересов: создание изделий на основе проектируемых материалов с заданным комплексом свойств. e-mail: tretyakov@bmstu.ru

Investigation of mechanical and technological properties of porous meshed material sheets of steel 12X18H10T

© A.F. Tretyakov

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Russia

The article describes the study of porous meshed material mechanical characteristics using a structural approach, which involves determining the mechanical properties on the basis of the mesh geometric parameters (standard size), mesh quantity, mutual arrangement, mechanism of plastic deformation and quality of structure-forming element consolidation. It is shown that porous meshed materials made by diffusion welding after mesh chemical treatment has the maximum interlaminar strength for a given mesh briquette design and compression. The dependences for determining strength, plasticity and anisotropy of the porous meshed material in the plane of the sheet under uniaxial and biaxial tension are obtained. It is found that increasing the formability and weldability of sheet blanks is achieved by reducing the strength anisotropy, plasticity and thermal conductivity. To reduce the anisotropy meshes with square cells should be used, their number should be increased, the angle between them should be reduced, and compression in the process of their solid-phase coupling should be increased.

Keywords: porous meshed material, anisotropy, strength, plasticity, deformation rate, welding, sheet-metal forming.

REFERENCES

- [1] Zeygarnik Yu.A., Polyakov A.F., Stratyev V.K., et al. Ispytanie poristogo setchatogo materiala v kachestve obolochek lopatok vysokotemperaturnykh gazovykh turbin [Testing porous meshed material as the shell of high-temperature gas turbine blades]. *Preprint of Joint Institute for High Temperatures of the RAS*, 2010, no. 2–502, 64 p.
- [2] Tretyakov A.F. *Proizvodstvo prokata — Rolled Products Manufacturing*, 2013, no. 5, pp. 32–42.
- [3] Tretyakov A.F. *Proizvodstvo prokata — Rolled Products Manufacturing*, 2013, no. 6, pp. 29–34.
- [4] Tretyakov A.F. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedenie — Problems of ferrous metallurgy and material science*, 2016, no. 1, pp. 5–10.
- [5] Tretyakov A.F., Sabelnikova T.M., Kharitonova L.K. *Tekhnologiya metallov — Metal Technology*, 2001, no. 5, pp. 35–38.
- [6] Kurkin S.A. *Prochnost svarnykh tonkostennykh sosudov, rabotaushchikh pod davleniem* [The strength of welded thin-walled vessels, working under pressure]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 184 p.
- [7] Tretyakov A.F. *Proizvodstvo prokata — Rolled Products Manufacturing*, 2015, no. 2, pp. 24–29.
- [8] Tretyakov A.F. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya — Repair, Reconditioning, Modernization*, 2015, no. 1, pp. 22–26.
- [9] Tretyakov A.F. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchnoe izdanie — Science and Education: Electronic Scientific Journal*, 2012, no 5. DOI 10.7463/0512.0400624 (accessed May 31, 2016).

Tretyakov A.F. (b.1945), Dr. Sci. (Eng.), graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. Professor, Department of Materials Processing Technology, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 150 research publications. Research interests: creating products based on the designed materials with given set of properties. e-mail: tretyakov@bmstu.ru