

УДК 621.79.01

DOI 10.18698/0536-1044-2016-12-87-96

Влияние конструктивных, технологических параметров и схемы деформирования на анизотропию механических свойств листовых 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 Structural, Technological Parameters and Strain State on Anisotropy of Mechanical Properties of Sheet Porous Net Materials

A.F. TretyakovBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: tretyakov@bmstu.ru

i Пористые сетчатые материалы анизотропны в плоскости листа, поэтому их механические свойства определяются не только конструктивными и технологическими параметрами процесса их изготовления, но и схемой деформированного состояния при нагружении. На основе предложенной модели, обладающей геометрическим подобием с сетками исследуемых типоразмеров, получены аналитические зависимости для определения прочности, пластичности и анизотропии сеток и пористых сетчатых материалов при одноосном и двухосном растяжении. Показано, что наиболее высокой анизотропией обладают пористые сетчатые материалы на основе фильтровых сеток при параллельном расположении в них. Применение сеток с квадратными ячейками, расположенными в брикете под углом 45° , позволило значительно снизить анизотропию. При переходе от одноосного растяжения к двухосному снижается прочность и пластичность материала, которые достигают минимальных значений при симметричном двухосном растяжении.

Ключевые слова: пористые сетчатые материалы, анизотропия механических свойств, тканые проволоочные сетки, относительное обжатие брикета сеток, двухосное растяжение, осредненные макроскопические напряжения разрушения, относительное удлинение сетки, гидростатическое выпучивание.

i Porous net materials are anisotropic in the sheet plane. Their mechanical properties are defined not only by the design and technological parameters of the manufacturing process, but also by the strain state type of loading. Analytic relationships defining strength, plasticity, and anisotropy of the nets and porous net materials at uniaxial and biaxial tension are obtained on the basis of the proposed model, being geometrically similar to the nets of the size under investigation. It is shown that the porous net materials made of filtering nets arranged in parallel are characterized by the highest anisotropy. The use of the nets with square meshes arranged in a briquette at a 45° angle, resulted in a considerable reduction of anisotropy. When transitioning from uniaxial to biaxial

tension, the material strength and plasticity decrease and reach minimal values at symmetric biaxial tension.

Keywords: porous net materials, anisotropy of mechanical properties, woven wire mesh, reduction rate of mesh briquette, biaxial tension, averaged macroscopic failure stress, relative mesh lengthening, hydrostatic bulging.

Одним из перспективных направлений в машиностроении является создание изделий из металлических пористых материалов (ПМ). Проблема создания прецизионных конструкций из ПМ не ограничивается только точностными характеристиками формы и размеров. Необходимо обеспечить требуемые значения проницаемости, пористости, размера пор ПМ, а также механические и технологические свойства, позволяющие изготовить работоспособные изделия листовой штамповкой.

Анализ конструкций, технологий изготовления и условий эксплуатации фильтроэлементов для очистки жидкостей и газов [1, 2], систем теплозащиты ракетных двигателей [3], оболочек турбинных лопаток парогазовых установок и газотурбинных двигателей [4, 5], капиллярных заборных устройств [6] и другого оборудования показал, что для их изготовления оптимальными свойствами обладают пористые сетчатые материалы (ПСМ), получаемые сваркой давлением тканых проволочных сеток [7, 8]. Эти материалы имеют более высокие механические и технологические свойства по сравнению с порошковыми, волокновыми и другими металлическими ПМ при заданных структурных, гидравлических и теплофизических свойствах.

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], поэтому получаемые на их основе изделия обладают конструктивной анизотропией в плоскости листа. По структурному признаку анизотропия механических свойств ПСМ является гетерогенной, так как она обусловлена дискретным строением сеток. При исследовании механических характеристик анизотропных материалов применяют два подхода.

При первом подходе — структурном — свойства материала определяют в зависимости от его структуры. При этом за основу принимают характеристики структурообразующих

элементов, их количество, взаимное расположение и качество сварных соединений между ними.

При втором подходе — макромеханическом — реальный материал рассматривают как некоторую идеализированную сплошную однородную среду. При этом предполагают, что габариты изделия значительно больше размеров отдельных элементов в структуре самого материала. Свойства при таком подходе описывают тензорными величинами, а необходимые константы определяют экспериментально путем испытания ПМ в различных направлениях.

Обладая рядом преимуществ при исследовании гомогенных или близких к ним материалов, макромеханический подход в описании механических свойств анизотропных ПМ имеет следующие существенные недостатки:

- необходимо проведение большого количества экспериментальных исследований, поскольку для каждой марки материала следует определять константы в нескольких направлениях;
- при испытании пористых образцов на одноосное растяжение под углом к структурообразующим элементам (проволокам) все или часть из них не передают силу непосредственно от одного захвата испытательной машины к другому. Это приводит к появлению корреляции между механическими свойствами и шириной испытываемого образца.

Кроме того, результаты экспериментальных исследований механических свойств образцов из стали 12Х18Н10Т позволили установить, что предел прочности при двухосном растяжении значительно ниже, чем при одноосном [9]. Поэтому для более корректной оценки прочности анизотропных ПСМ необходимо проведение исследований в условиях двухосного растяжения.

Указанные недостатки позволяют предположить, что более рациональным при изучении механических свойств ПСМ является структурный подход. При этом свойства материала рассматривают исходя из геометрических параметров (типоразмер) сеток, их коли-

чества, взаимного расположения, величины относительного обжатия брикета сеток в процессе горячей деформации и качества сварных соединений проволок. Кроме того, ПСМ являются анизотропными, поэтому на их свойства оказывает влияние схема деформированного состояния в процессе нагружения.

Цель работы — изучение влияния механических свойств проволок, конструктивных параметров тканых сеток, их количества, взаимного расположения, а также значения относительного обжатия в процессе изготовления ПСМ из стали 12Х18Н10Т на их прочность и пластичность при различных схемах растяжения.

Для проектирования технологических процессов изготовления ПСМ с заданными механическими характеристиками в плоскости листа при двухосном растяжении принимали допущение о том, что силу в процессе растяжения воспринимают слои сеток пропорционально их площади 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 равенство послойной деформации сеток, а также пренебрегали вытяжкой и уширением в процессе сварки проволок. Схема деформирования модели при двухосном растяжении приведена на рис. 1.

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 (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 являются анизотропными, то такие характеристики, как прочность и пластичность, теряют смысл, если они указаны в отрыве от направления растяжения. Поэтому использованы взаимно перпендикулярные 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 .

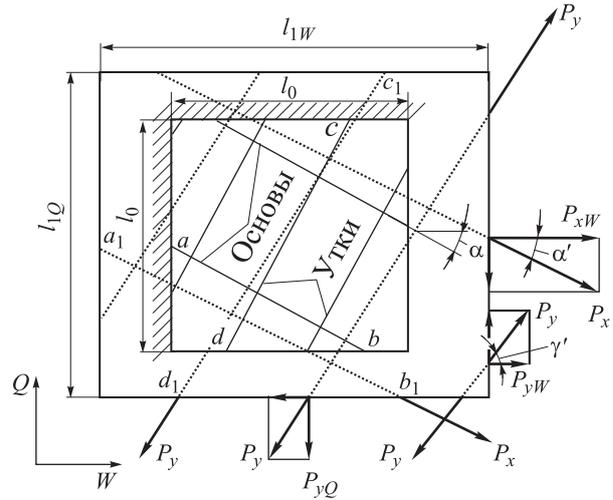


Рис. 1. Схема деформирования модели одного слоя сетки при двухосном растяжении: l_0 и l_{1W}, l_{1Q} — размеры сетки до и после растяжения в направлении осей W, Q ; α, α' — угол между основными направлениями сетки и осью W соответственно до и после растяжения; γ' — угол между утками сетки и осью W после растяжения

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, осредненные макроскопические напряжения растяжения в направлении осей W, Q определяли из выражения

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

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

Толщина ПСМ, получаемая путем пластической деформации брикета сеток и сварки проволок, имеет вид

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

где $h_{c1}, h_{ci}, h_{ci+1}, h_{cn}$ — толщина сетки соответственно 1, $i, (i + 1)$ -го и последнего слоя; n — количество слоев сеток в брикете; $\bar{\psi}$ — математическое ожидание коэффициента плотности упаковки сеток; ε — относительное обжатие брикета сеток.

Таким образом, для расчета $\sigma_{W,Q}$ необходимо определить напряжения в каждом слое сетки в направлении деформирования с учетом расположения проволок по отношению к растягивающим силам. В основу вычисления этих

напряжений положены диаграммы растяжения отдельных сеток вдоль проволок, т. е. в направлении осей x_i, y_i . Диаграммы растяжения определяли экспериментально путем одноосного растяжения прямоугольных образцов длиной 200 мм и шириной 15 мм, вырезанных вдоль проволок сетки из стали 12X18H10T после сварки прокаткой в вакуумированных конвертах [10]. Осредненные макроскопические напряжения вычисляли по формуле

$$\sigma_{x,y} = \frac{P_{x,y}}{bh},$$

где $P_{x,y}$ — сила, воспринимаемая сеткой при растяжении вдоль основ (x), утков (y); b и h — соответственно ширина и толщина образца.

Анализ диаграмм растяжения, приведенных на рис. 2 и 3, позволил установить, что более высокой анизотропией обладают фильтровые сетки, а увеличение относительного обжатия ϵ_n в процессе сварки сеток приводит к снижению их пластичности в результате образования концентраторов напряжений в местах сварки проволок. На максимальные осредненные макроскопические напряжения $\sigma_{в x,y}$ существенное

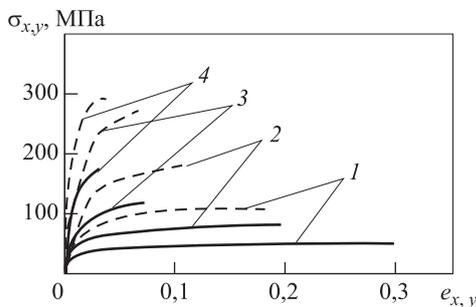


Рис. 2. Диаграммы одноосного растяжения вдоль основ (—) и утков (---) фильтровой сетки П90 после сварки прокаткой: 1 — $\epsilon_n = 0$; 2 — $\epsilon_n = 0,27$; 3 — $\epsilon_n = 0,45$; 4 — $\epsilon_n = 0,53$

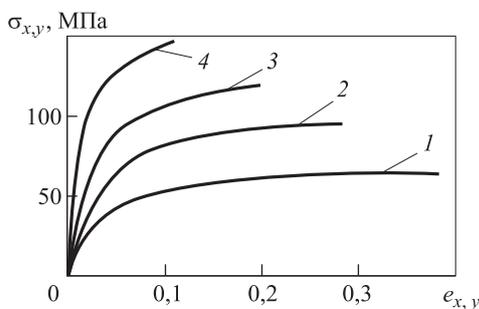


Рис. 3. Диаграммы одноосного растяжения вдоль проволок сетки с квадратными ячейками № 1 после сварки прокаткой: 1 — $\epsilon_n = 0$; 2 — $\epsilon_n = 0,26$; 3 — $\epsilon_n = 0,36$; 4 — $\epsilon_n = 0,48$

влияние оказывает конструкция сеток, а увеличение значений $\sigma_{в x,y}$ с ростом относительного обжатия ϵ_n происходит в результате уменьшения h , что сопровождается снижением пористости образцов.

При двухосном растяжении сетки осредненные макроскопические напряжения, возникающие в направлении осей W, Q , определяем по выражению

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

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

Разложив силу, воспринимаемую i -м слоем сетки, в направлениях W, Q по осям x_i, y_i , получим

$$\begin{aligned} P_{iW} &= P_{xW} K_{oc} + P_{yW} K_{yt}; \\ P_{iQ} &= P_{xQ} K_{oc} + P_{yQ} K_{yt}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $P_{xW}, P_{yW}, P_{xQ}, P_{yQ}$ — силы, воспринимаемые основами и утками в направлении осей W, Q ; K_{oc}, K_{yt} — количество основ, утков в сечении, перпендикулярном осям W, Q .

Количество проволок находим из выражений

$$\begin{aligned} K_{oc} &= b m_{oc} \frac{\cos \alpha}{100}; \\ K_{yt} &= b m_{yt} \frac{\sin \alpha}{100}, \end{aligned} \quad (3)$$

где m_{oc} и m_{yt} — количество основ и утков на 100 мм сетки.

Силы P_{xW} и P_{yW} (см. рис. 1) определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{xW} &= 100 \sigma_x h_i \frac{\cos \alpha'}{m_{oc}}; \\ P_{yW} &= 100 \sigma_y h_i \frac{\cos \alpha'}{m_{yt}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Относительные удлинения основ и утков сетки в процессе растяжения соответственно равны

$$\begin{aligned} e_x &= \sqrt{(1 + e_Q)^2 \sin^2 \alpha + (1 + e_W)^2 \cos^2 \alpha} - 1; \\ e_y &= \sqrt{(1 + e_Q)^2 \cos^2 \alpha + (1 + e_W)^2 \sin^2 \alpha} - 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Исходя из геометрических параметров модели сетки (см. рис. 1) и учитывая зависимость (5), получим выражения

$$\begin{aligned} \cos \alpha' &= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1+e_Q}{1+e_W}\right)^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}}; \\ \cos \gamma' &= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1+e_Q}{1+e_W}\right)^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha}}. \end{aligned} \quad (6)$$

После подстановки в уравнение (1) выражений (2)–(4) и (6) имеем

$$\begin{aligned} \sigma_{iW} &= \frac{1+e_W}{1+Ke_W} (A_W \sigma_x + B_W \sigma_y); \\ \sigma_{iQ} &= \frac{1+Ke_W}{1+e_W} (B_W \sigma_x + A_W \sigma_y), \end{aligned} \quad (7)$$

где $K = e_Q/e_W$;

$$\begin{aligned} A_W &= \frac{\cos \alpha}{\sqrt{(1+e_W)^2 + (1+Ke_W)^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}}; \\ B_W &= \frac{\sin \alpha}{\sqrt{(1+e_W)^2 + (1+Ke_W)^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha}}. \end{aligned}$$

Примем для определенности, что $e_W > e_Q$, т. е. $1 \geq K \geq 0$.

Разрушение фильтровой сетки в процессе растяжения возможно как по основам (δ_{1W}), так и по уткам (δ_{2W}), в зависимости от того в каких проволоках относительное удлинение раньше достигает предельного значения. Решив систему уравнений (5), определим условие разрушения фильтровой сетки в следующем виде:

$$\delta_W = \min\{\delta_{1W}; \delta_{2W}\}. \quad (8)$$

Здесь δ_W — относительное удлинение сетки в направлении деформирования W к моменту разрушения;

$$\begin{aligned} \delta_{1W} &= -\frac{1+K\operatorname{ctg}^2 \alpha}{1+K^2\operatorname{ctg}^2 \alpha} + \\ &+ \sqrt{\left(\frac{1+K\operatorname{ctg}^2 \alpha}{1+K^2\operatorname{ctg}^2 \alpha}\right)^2 + \frac{2\delta_y + \delta_y^2}{K^2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}}; \\ \delta_{2W} &= -\frac{1+K\operatorname{tg}^2 \alpha}{1+K^2\operatorname{tg}^2 \alpha} + \\ &+ \sqrt{\left(\frac{1+K\operatorname{tg}^2 \alpha}{1+K^2\operatorname{tg}^2 \alpha}\right)^2 + \frac{2\delta_x + \delta_x^2}{\cos^2 \alpha + K^2 \sin^2 \alpha}}, \end{aligned}$$

где δ_x и δ_y — относительное удлинение проволок сетки в направлении основ (x_i) и утков (y_i) к моменту разрушения.

В данном случае запись критерия прочности через максимальное относительное удлинение более удобна, так как до разрушения все сетки в ПСМ при растяжении претерпевают одинаковую деформацию. Значения удлинения сетки и напряжений в ней к моменту разрыва определяются ориентацией проволок относительно направлений растяжения W , Q , а также прочностью и пластичностью основ и утков.

Максимальное значение δ_W достигается при расположении сетки под углом $\alpha = \alpha_{кр}$, когда разрушение происходит одновременно по основам и уткам. Значения углов $\alpha_{кр}$ определяют методом последовательных приближений из условия $\delta_{1W} = \delta_{2W}$. Исследование влияния относительного обжатия в процессе сварки на пластичность фильтровых сеток позволило установить, что при $\varepsilon_{II} < 0,5$ в условиях одноосного растяжения относительное удлинение фильтровых сеток в направлении основ больше, чем в направлении утков, т. е. $\delta_x > \delta_y$ (рис. 4), а значение угла $\alpha_{кр}$ находится в интервале $45^\circ \geq \alpha_{кр} \geq 0$. В условиях, близких к симметричному двухосному растяжению, независимо от угла α сетки разрушаются по проволокам, имеющим меньшую пластичность. Напряжения к моменту разрушения сетки в направлении осей W и Q рассчитываются по формулам, полученным из выражений (7) и (8):

- при разрушении по основам

$$\begin{aligned} \sigma_{iBW} &= \frac{1+\delta_W}{1+K\delta_W} [A_B \sigma_{iBx} + B_B \sigma_{iy}(\delta_x)]; \\ \sigma_{iBQ} &= \frac{1+K\delta_W}{1+\delta_W} [B_B \sigma_{iBx} + A_B \sigma_{iy}(\delta_x)]; \end{aligned} \quad (9)$$

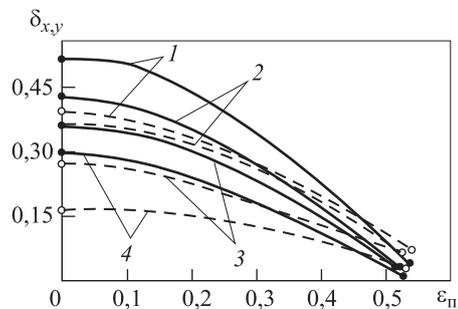


Рис. 4. Влияние относительного обжатия в процессе сварки прокаткой на максимальное относительное удлинение фильтровых сеток вдоль основ (—) и утков (---):
1 — П24; 2 — П36; 3 — П60; 4 — П90

• при растяжении по уткам

$$\begin{aligned} \sigma_{iBW} &= \frac{1 + \delta_W}{1 + K\delta_W} [A_B \sigma_{ix}(\delta_y) + B_B \sigma_{iBy}]; \\ \sigma_{iBQ} &= \frac{1 + K\delta_W}{1 + \delta_W} [B_B \sigma_{ix}(\delta_y) + A_B \sigma_{iBy}], \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} A_B &= \frac{\cos \alpha}{\sqrt{(1 + \delta_W)^2 + (1 + K\delta_W)^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}}; \\ B_B &= \frac{\sin \alpha}{\sqrt{(1 + \delta_W)^2 + (1 + K\delta_W)^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha}}; \end{aligned}$$

σ_{iBx} , σ_{iBy} — напряжения в i -м слое сетки соответственно вдоль основ при разрушении по основам и вдоль утков при разрушении по уткам; $\sigma_{ix}(\delta_y)$, $\sigma_{iy}(\delta_x)$ — напряжения в i -м слое сетки соответственно вдоль основ при разрушении по уткам и вдоль утков при разрушении по основам.

Для сеток с квадратными ячейками независимо от значения относительного обжатия при сварке соблюдаются равенства $\sigma_{Bx} = \sigma_{By}$; $\delta_x = \delta_y$, а угол $\alpha_{кр} = 45^\circ$, поэтому напряжения σ_{iBW} и σ_{iBQ} можно определить по формулам как (9), так и (10).

Расчеты, выполненные на основе приведенных зависимостей, позволили получить контуры прочности и пластичности фильтровых сеток и сеток с квадратными ячейками, которые в полярных координатах приведены на рис. 5–8. Анализ полученных результатов позволил установить, что с ростом относительного обжа-

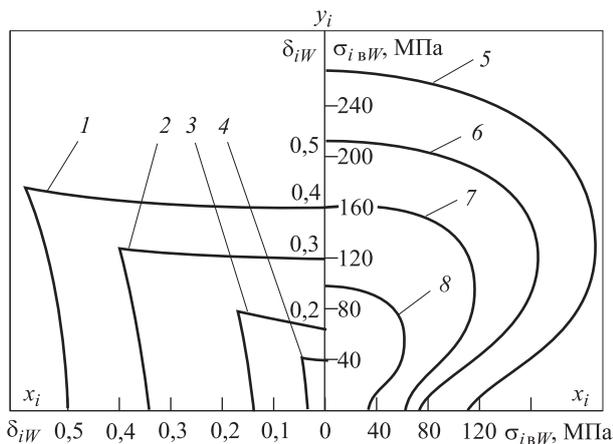


Рис. 5. Контурсы пластичности δ_{iW} (1–4) и прочности σ_{iBW} (5–8) в условиях двухосного растяжения ($K = 0,2$) одного слоя фильтровой сетки П24 после обжатия в процессе сварки прокаткой: 1, 8 — $\epsilon_n = 0$; 2, 7 — $\epsilon_n = 0,26$; 3, 6 — $\epsilon_n = 0,45$; 4, 5 — $\epsilon_n = 0,54$

тия в процессе сварки возрастает напряжение σ_{iBW} и снижается пластичность сеток. Уменьшение прочности сеток при $K \rightarrow 1$ происходит в результате увеличения расстояния между проволоками, воспринимающими растягивающую силу. В условиях симметричного двухосного растяжения сетки (фильтровые и с квадратными ячейками) обладают минимальной прочностью и пластичностью.

ПСМ являются сварными конструкциями, состоящими, как правило, из нескольких слоев сеток, поэтому в процессе нагружения они претерпевают равную деформацию. В соответствии

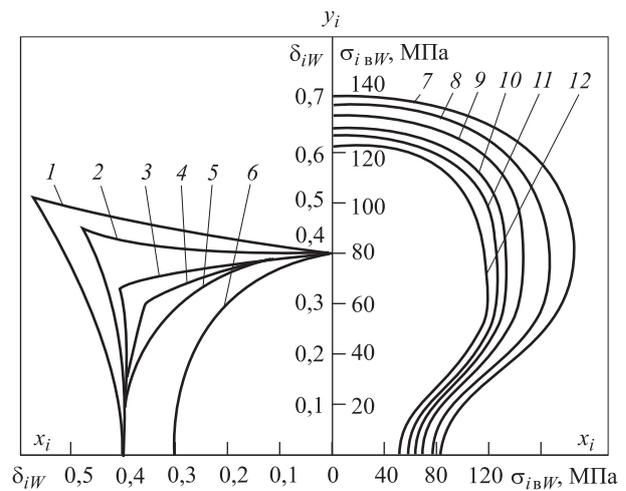


Рис. 6. Контурсы пластичности δ_{iW} (1–6) и прочности σ_{iBW} (7–12) одного слоя фильтровой сетки П24 после обжатия в процессе сварки прокаткой при $\epsilon_n = 0,26$ в условиях растяжения: 1, 7 — $K = 0$; 2, 8 — $K = 0,2$; 3, 9 — $K = 0,4$; 4, 10 — $K = 0,6$; 5, 11 — $K = 0,8$; 6, 12 — $K = 1,0$

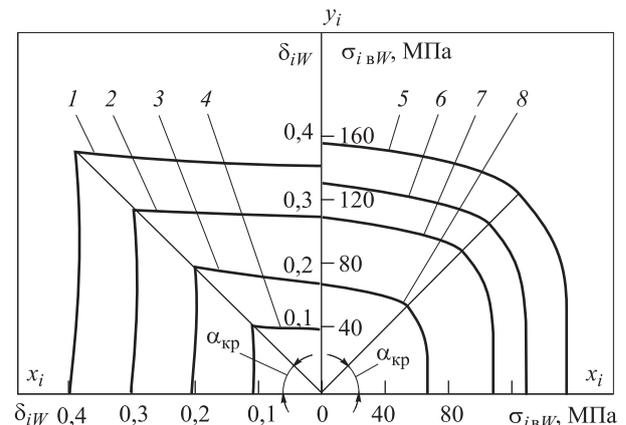


Рис. 7. Контурсы пластичности δ_{iW} (1–4) и прочности σ_{iBW} (5–8) в условиях двухосного растяжения ($K = 0,2$) слоя сетки с квадратными ячейками № 1 после обжатия в процессе сварки прокаткой: 1, 8 — $\epsilon_n = 0$; 2, 7 — $\epsilon_n = 0,28$; 3, 6 — $\epsilon_n = 0,38$; 4, 5 — $\epsilon_n = 0,48$

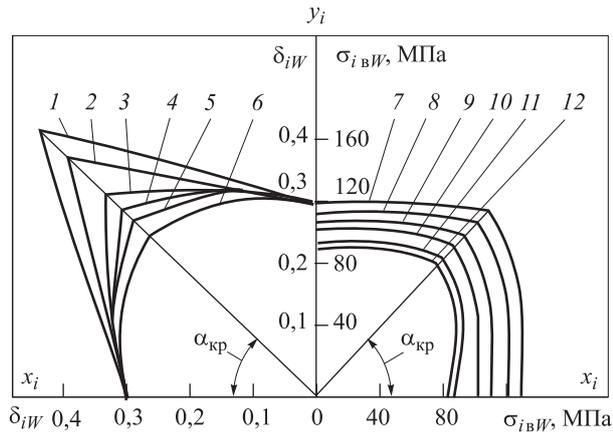


Рис. 8. Контуры пластичности δ_{iW} (1–6) и прочности σ_{iBW} (7–12) слоя сетки с квадратными ячейками № 1 после обжатия в процессе сварки прокаткой при $\epsilon_n = 0,26$ в условиях растяжения: 1, 7 — $K = 0$; 2, 8 — $K = 0,2$; 3, 9 — $K = 0,4$; 4, 10 — $K = 0,6$; 5, 11 — $K = 0,8$; 6, 12 — $K = 1,0$

с принятым допущением предельное состояние разрушения определяли как

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

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

Прочность ПСМ на основе сеток одного типоразмера при двухосном растяжении в направлении взаимно перпендикулярных осей W и Q можно определить из следующих выражений:

$$\sigma_{BW} = \frac{(1 - \epsilon + \epsilon_n)(1 + \delta_W)}{[\bar{\psi}(n-1) + 1](1 - \epsilon)(1 + K\delta_W)} \times \left[\sum_{i=1}^m \sigma_{iBW} + \sum_{i=m+1}^n \sigma_{iW}(\delta_W) \right];$$

$$\sigma_{BQ} = \frac{(1 - \epsilon + \epsilon_n)(1 + K\delta_W)}{[\bar{\psi}(n-1) + 1](1 - \epsilon)(1 + \delta_W)} \times \left[\sum_{i=1}^m \sigma_{iBQ} + \sum_{i=m+1}^n \sigma_{iQ}(\delta_W) \right],$$

(11)

где σ_{iBW} и σ_{iBQ} — максимальные макроскопические осредненные напряжения, возникшие в разрушившемся i -м слое сетки в направлении осей W и Q ; $\sigma_{iW}(\delta_W)$ и $\sigma_{iQ}(\delta_W)$ — напряжения в не разрушившихся слоях к моменту разрушения ПСМ в направлении осей W и Q ; n_1 — количество слоев сеток в ПСМ, разрушившихся при достижении относительного удлинения δ_W .

Расчеты, выполненные на основе уравнений (11), позволили получить контуры прочности и пластичности ПСМ, которые в полярных координатах приведены на рис. 9, 10. Анализ полученных результатов показал, что наиболее высокой анизотропией свойств обладают ПСМ на основе фильтровых сеток при параллельном их расположении (см. рис. 9). Применение сеток с квадратными ячейками, расположенными под углом 45° , позволяет значительно уменьшить анизотропию прочности и пластичности ПСМ в плоскости листа (см. рис. 10). Кроме того, установлено, что для ПСМ так же, как и для одного слоя сетки, с увеличением относительного обжатия 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.

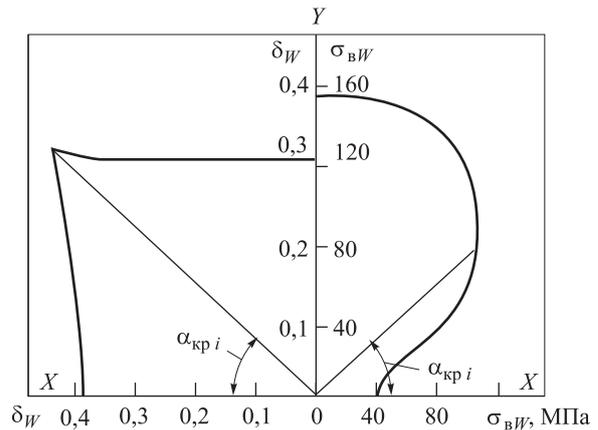


Рис. 9. Контуры прочности σ_{BW} и пластичности δ_W ПСМ, полученных сваркой прокаткой брикета фильтровых сеток П24 с параллельной укладкой слоев, при $\epsilon_n = 0,26$ в условиях двухосного растяжения ($K = 0,2$)

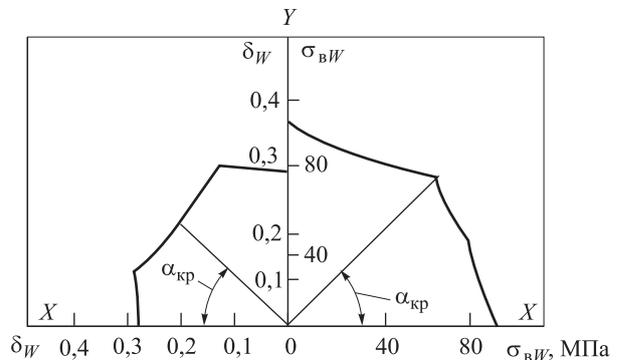


Рис. 10. Контуры прочности σ_{BW} и пластичности δ_W ПСМ, полученных сваркой прокаткой брикета сеток с квадратными ячейками № 1 с укладкой под углом 45° при $\epsilon_n = 0,26$, в условиях двухосного растяжения ($K = 0,2$)

В целях проверки полученных зависимостей для расчета прочности и пластичности ПСМ проведены экспериментальные исследования в условиях двухосного растяжения, реализованного при гидростатическом выпучивании [11, 12]. При деформации через круглую матрицу реализована схема симметричного двухосного растяжения ($K = 1$) в вершине выпучины, а использование эллиптической матрицы с соотношением осей 1:2 позволяет обеспечить нагружение, при котором $1 > K > 0$.

В процессе испытания измеряли давление масла под образцом p , радиусы кривизны R_W , R_Q и удлинение материала в направлении главных осей эллипса в области вершины выпучины. Проверку адекватности зависимостей (11) проводили путем сопоставления расчетных и экспериментальных значений давлений. Расчетные значения давления p_p определяли по известной формуле Лапласа, полученной из условия равновесия элемента образца и, следовательно, справедливой для любых материалов, в том числе и пористых:

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

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных позволило установить, что относительная ошибка результатов расчета давлений и деформаций не превышает 20 %.

Таким образом, полученные зависимости могут быть использованы для расчета прочности, пластичности ПСМ и их анизотропии при заданных конструктивных и технологических параметрах процесса изготовления ПСМ, а также для определения значений факторов,

обеспечивающих оптимальные механические свойства, необходимые для осуществления формоизменяющих операций при изготовлении изделий листовой штамповкой.

Выводы

1. Установлено, что, варьируя типом плетения сеток и значением относительного обжатия брикета сеток в процессе горячей деформации в вакууме, можно активно влиять на механические свойства в плоскости ПСМ, а обоснованное расположение листовых заготовок по отношению к направлениям деформирования в процессе листовой штамповки позволяет рационально использовать имеющийся ресурс пластичности.

2. Наиболее высокой анизотропией свойств обладают материалы на основе фильтровых сеток при параллельном расположении. Повышение прочности ПСМ с увеличением относительного обжатия брикета сеток происходит в результате уменьшения объема пор, а сопровождающееся при этом снижение пластичности тем больше, чем ниже качество твердофазных соединений структурообразующих элементов.

3. При переходе от одноосного растяжения к двухосному происходит снижение прочности ПСМ в результате увеличения расстояния между проволоками, воспринимающими растягивающую силу, а следовательно, уменьшения их количества на единице площади. В условиях симметричного двухосного растяжения, например, при листовой штамповке сферических элементов, ПСМ обладают минимальной прочностью и пластичностью.

Литература

- [1] Белов С.В., ред. *Пористые проницаемые материалы: справочник*. Москва, Металлургия, 1987. 338 с.
- [2] Sparks T., Chase G. *Filters and Filtration. Handbook*. Elsevier, 2013. 444 p.
- [3] 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).
- [4] 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.
- [5] Bunker R.S. Gas turbine cooling. Moving from macro to micro cooling. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2013, 3 p.
- [6] 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.

- [7] Пелевин Ф.В. Технология изготовления пористых материалов. *Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса*, 2007, № 3, с. 46–51.
- [8] Liu P., He G., Wu L.H. Fabrication of sintered steel wire mesh and its compressive properties. *Materials Science and Engineering*, 2008, vol. 489, no. 1–2, pp. 21–28.
- [9] Вилимок Я.А., Назаров К.А., Евдокимов А.К. Напряженное состояние плоских образцов при одноосном и двухосном растяжении. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2013, № 11, с. 388–393.
- [10] 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.
- [11] Куркин С.А. *Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением*. Москва, Машиностроение, 1976. 184 с.
- [12] Музыка Н.Г. Оборудование для испытания листовых конструкционных материалов при двухосном растяжении. Сообщение 1. Испытания односторонним давлением рабочей среды. *Проблемы прочности*, 2001, № 5, с. 141–148.

References

- [1] *Poristye pronitsaemye materialy: Spravochnik* [Porous permeable materials: Handbook]. Ed. Belov S.V. Moscow, Metallurgiya publ., 1987. 338 p.
- [2] Sparks T., Chase G. *Filters and Filtration. Handbook*. Elsevier, 2013. 444 p.
- [3] Pelevin F.V., Avramov N.I., Orlin S.A., Sintsov A.L. Effektivnost' teploobmena v poristykh elementakh konstruksii 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/catalogy/machin/roset/689.html> (accessed 20 March 2016).
- [4] 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* [Tests porous mesh material as the sheath gas turbine blade of high]. Moscow, Preprint, OIVT RAN, 2010, no. 2-502, 64 p.
- [5] Bunker R.S. Gas turbine cooling. Moving from macro to micro cooling. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2013, 3 p.
- [6] 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' zhiznediel'nosti* [Life safety]. 2015, no. 11, pp. 53–56.
- [7] Pelevin F.V. Tekhnologiya izgotovleniia 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.
- [8] Liu P., He G., Wu L.H. Fabrication of sintered steel wire mesh and its compressive properties. *Materials Science and Engineering*, 2008, vol. 489, no. 1–2, pp. 21–28.
- [9] Vilimok Ia.A., Nazarov K.A., Evdokimov A.K. Napriazhennoe sostoianie ploskikh obraztsov pri odnoosnom i dvukhosnom rastiazhenii [Stress state of flat in samples uniaxial and biaxial tension]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the TSU. Technical sciences]. 2013, no. 11, pp. 388–393.
- [10] Tret'iakov A.F. Tekhnologicheskaia nasledstvennost' v protsesse izgotovleniia izdelii iz poristykh setchatykh materialov s zadannymi svoistvami. Soobshchenie 1. Vliianie konstruksii 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]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing]. 2013, no. 5, pp. 32–42.

- [11] Kurkin S.A. *Prochnost' svarnykh tonkostennykh sosudov, robotaiushchikh pod davleniem* [The strength of welded thin-walled vessels, working under pressure]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1976. 184 p.
- [12] Muzyka N.R. Equipment for testing sheet structural materials under biaxial tension. Part 1. Testing under one-sided pressure of the working medium. *Strength of materials*, 2001, vol. 33, no. 5, pp. 503–507.

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: tretyakov@bmstu.ru).

Information about the author

TRETYAKOV Anatoly Fedorovich — Dr. Sc. (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: tretyakov@bmstu.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышел в свет учебник
Р.З. Кавтарадзе

«Теория поршневых двигателей. Специальные главы»

Изложены основы создания высокоэффективных и высокоэкологических двигателей, проанализированы термодинамические циклы поршневых и комбинированных двигателей, особенности и теплофизические свойства используемых топлив и рабочего тела. Описаны нульмерные и трехмерные модели рабочего процесса и способы его организации в двигателях с внешним и внутренним смесеобразованием, а также формы камеры сгорания. Значительное внимание уделено процессам впрыскивания, распыливания, испарения топлива, задержки воспламенения и тепловыделения в бензиновых двигателях и в дизелях. Рассмотрены процессы сгорания топлива, образования вредных выбросов, проанализированы методы снижения их концентрации, а также проблемы совершенствования и перспективы развития двигателей с непосредственным впрыскиванием бензина и дизельного топлива. Приведены математические модели основных внутрицилиндровых процессов и методы их экспериментального исследования.

Содержание учебника соответствует курсу лекций, читаемых автором в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

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