

Образование сварных твердофазных соединений проволоки при изготовлении пористых сетчатых материалов из стали 12X18H10T

© А.Ф. Третьяков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 1005005, Россия

Опыт применения оболочек турбинных лопаток на основе пористых сетчатых материалов в изделиях аэрокосмической техники и высокотемпературных газовых турбин показал, что они подвержены деструкции под воздействием колебаний давлений. При этом усталостное разрушение наступает в первую очередь в тех проницаемых оболочках, где отсутствуют качественные соединения структурообразующих элементов. Установлено, что при диффузионной сварке и сварке прокаткой прочность сварных соединений возрастает с увеличением температуры процесса, а также глубины вакуума и времени деформирования — при диффузионной сварке. Показано, что при скоростях деформирования $10^{-2} \dots 1,0 \text{ с}^{-1}$ низкое качество сварных соединений объясняется высоким сопротивлением деформированию микронеровностей на контактных поверхностях проволоки и низкой скоростью диффузионного массопереноса в зоне соединения. Установлено, что в условиях диффузионной и ударной сварки в вакууме возможно образование твердофазного соединения на всей поверхности макроконтраста. При этом в процессе ударной сварки влияние величины температуры в исследуемом интервале на качество сварных соединений значительно ниже, чем для процессов с более низкими скоростями нагружения. Приведены практические рекомендации по определению оптимальных режимов сварки проволоки сеток при изготовлении пористых сетчатых материалов из стали 12X18H10T.

Ключевые слова: пористый сетчатый материал, ударная сварка, диффузионная сварка, твердофазное соединение, относительная деформация, скорость деформации, температура, площадь контакта, массоперенос, прочность, сварка прокаткой

Введение. Проведенный анализ конструкций и условий работы фильтров, газозащитных, теплотехнических устройств позволил установить, что наиболее перспективными являются такие проницаемые пористые материалы на металлической основе, которые наряду с требуемыми гидравлическими, фильтрованными, теплофизическими свойствами обладают высокой прочностью, штампуемостью и свариваемостью [1]. Пористые материалы на основе тканых проволочных сеток с заданным взаимным расположением представляют значительный интерес для изготовления рассмотренных изделий, поскольку благодаря организованной структуре и консолидации проволоки между собой в условиях горячей деформации в вакууме они обладают стабильными и воспроизводимыми характеристиками [2].

Испытания оболочек турбинных лопаток на основе пористых сетчатых материалов (ПСМ) в изделиях аэрокосмической техники и

в высокотемпературных газовых турбинах показал [3–5], что они подвержены деструкции под действием колебаний давлений. При этом усталостное разрушение наступает в первую очередь в тех проницаемых оболочках, где отсутствуют качественные соединения структурообразующих элементов. Для предотвращения разрушения пористых изделий следует выполнить комплекс исследований, предполагающих изучение механизма и кинетики сварки.

Для качественной сварки заготовок помимо образования пластического контакта необходимы активация атомов и объемное взаимодействие в зоне соединения, в результате чего между атомами соединяемых поверхностей образуются химические связи и осуществляются процессы релаксации напряжений, рекристаллизации и диффузии.

Активация контактных поверхностей происходит в результате зарождения и роста активных центров [6], кинетика образования которых зависит от температуры, уровня контактных напряжений, скорости деформации, условий образования и движения дислокаций, вакансий, межузельных и примесных атомов [7]. В условиях твердофазного взаимодействия основные каналы активации — термический, деформационный и химический [8]. Следует иметь в виду некоторую условность разделения источников активации, поскольку пластическая деформация и разрушение оксидов являются термически активируемыми процессами, а интенсивное динамическое нагружение приводит к повышению температуры.

Выполненные нами экспериментальные исследования твердофазного взаимодействия проволок при получении ПСМ позволили установить, что на процесс активации и объемного взаимодействия на контактных поверхностях, образованных однородными перекрещивающимися цилиндрическими образцами, существенное влияние оказывает физико-химическое состояние поверхности и величина пластической деформации в отдельных зонах соединения. Было показано, что наиболее эффективным каналом активации является термический, поскольку с увеличением температуры от 1373К до 1473К в условиях сварки прокаткой в вакуумированных конвертах перекрестий из стали 12Х18Н10Т величина площади, на которой произошло образование твердофазного соединения, возросла примерно вдвое, а при температуре $T < 1273\text{К}$ сварка не происходит во всем диапазоне исследуемых деформаций. Пластическая деформация облегчает условия активации путем разрушения оксидных пленок в местах выхода дислокаций. При этом в соединение вступает атомы металла или сплава, а не оксиды, у которых энергия разрыва межатомных связей значительно выше [7].

Стадия объемного взаимодействия во многом определяет качество сварки, потому что в реальных условиях равнопрочные твердофазные соединения невозможно получить «сшиванием» одного-двух

поверхностных монослоев. Поэтому процессы релаксации напряжений, рекристаллизации и диффузии можно считать одними из основных факторов, ответственных за образование прочного соединения. Кроме того, стадии образования физического контакта и активных центров на уровне объемного электронного взаимодействия в подавляющем большинстве случаев практически не удается наблюдать обычными структурными методами исследования [9]. Протекание процессов диффузии на третьей стадии позволяет «проявлять» активные центры и дает возможность демонстрировать металлографическими и фрактографическими методами.

На стадии объемного взаимодействия более эффективна роль термической активации, так как кинетика этого процесса экспоненциально зависит от температуры, с повышением которой интенсифицируются процессы релаксации напряжений, рекристаллизации и диффузии. Пластическая деформация является одним из каналов повышения объемного взаимодействия, поскольку процесс диффузии существенно ускоряется как полем упругих искажений от дислокаций, так и собственно дислокациями. Скорость диффузии атомов по дислокационным трубкам на 3-4 порядка выше, чем в обычных условиях [7]. Известно также, что с повышением величины и скорости деформации снижается температура рекристаллизации. Существенное влияние на диффузионную подвижность атомов в условиях пластической деформации оказывает скорость нагружения [10]. Так, при $\dot{\epsilon}_n \geq 1 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ наблюдается аномальное ускорение диффузии, вызванное высокой подвижностью межузельных атомов, которые образуются в процессе пластической деформации при неконсервативном движении в кристалле винтовых дислокаций с порогами [11, 12]. Такое явление носит общий характер, так как проявляется при ударной сварке в вакууме [13], магнитно-импульсной и сварке прокаткой широкого круга металлов и сплавов. Причем способ нагружения, краткость приложения нагрузки не оказывают существенного влияния на процесс миграции атомов, а определяется, в первую очередь, скоростью деформации материала [14].

Исследование методом электронномикроскопической автордиографии соединений, полученных сваркой с импульсным нагружением показало, что зона стыка обеднена изотопом $F_e^{55,59}$, а максимум его распределения находится на расстоянии 5 мкм. Наблюдаемое смещение максимума концентрации изотопа с поверхности контакта в глубь металла может быть объяснено тем обстоятельством, что при высоких скоростях деформации межузельные атомы совершают скачки не хаотично, а в направлении от стыка в глубь металла [15]. Перемещения огромного количества межузельных атомов приводит

к залечиванию микропор, которые образуются в результате пластической деформации микронеровностей на стадии формирования фактической площади контакта (ФПК).

Анализ влияния микрорельефа на механизм массопереноса в условиях диффузионной сварки, представленного в работе [16], позволил установить, что участки зон активной деформации совпадают с областями высокой пластической деформации в местах взаимодействия выступов шероховатостей контактирующих поверхностей. Насыщенность поверхностей дефектами определяет глубину и интенсивность диффузионных процессов в приконтактной зоне. С увеличением времени сварки диффузионный поток в зоне контактирования становится более однородным для поверхностей, имеющих различную шероховатость. Следовательно, при низкоинтенсивном силовом воздействии (например диффузионная сварка) шероховатость поверхности не является лимитирующим параметром образования твердофазного взаимодействия на всей площади макроконтраста. На качество соединений, полученных при сварке с интенсивным динамическим нагружением, наиболее существенное влияние оказывает скорость деформации.

Таким образом, проведенный анализ процессов формирования ФПК, активации и объемного взаимодействия в зоне макроконтраста сварных твердофазных соединений позволил установить, что для повышения стабильности и уровня механических свойств ПСМ следует проводить дополнительные исследования для определения оптимальных значений технологических параметров процессов их изготовления.

Цель настоящей работы — изучение влияния температуры, величины и скорости деформации в процессе сварки прокаткой, ударной и диффузионной сварки в вакууме на качество твердофазных соединений проволоки при изготовлении ПСМ из стали 12Х18Н10Т.

Методика проведения исследований. Поскольку необходимым условием получения пористых элементов на основе металлических сеток является сварка проволок между собой, разработку технологических процессов их изготовления необходимо начинать с определения значений температуры, величины и скорости деформации, состава контролируемой среды, обеспечивающих получение изделий с заданными свойствами при максимальной межслойной прочности. Форма и размеры площади контактов в перекрестиях проволок сеток определяются взаимным расположением и диаметром проволок, а также величиной обжатия брикета, конкретные значения которых могут изменяться в широких пределах. С учетом методических трудностей, возникающих при изучении процесса образования контактов проволок при горячем деформировании брикета сеток, использован метод физического моделирования. Наиболее близкая модель,

обладающая геометрическим подобием, представляет собой два цилиндрических элемента, у которых соотношение диаметров, взаимное расположение и относительная деформация соответствуют перекрестиям, образовавшимся в реальном ПСМ.

Поверхность контакта без учета шероховатости, образовавшейся в процессе пластической деформации перекрещивающихся элементов, получила название «поверхность макроконтакта» F_r , величина которой 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 ($d_1 \geq d_2$), позволили получить регрессионную зависимость [17], анализ которой показал, что с уменьшением угла β , под которым они перекрещиваются, и увеличением относительной деформации перекрестия ε_n возрастает площадь макроконтакта F_r . Максимальное значение F_r/d_1^2 при постоянных значениях β, ε_n достигается в том случае, когда $d_1 = d_2$.

Отличительной особенностью 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 величина ФПК. Фактическая площадь контакта перекрестия F_ϕ — это та максимальная поверхность, на которой возможно образование сварного соединения.

Теоретические и экспериментальные исследования процесса пластической деформации микронеровностей на площади F_r показали [18], что на величину ФПК существенное влияние оказывает скорость деформирования

$$\dot{\varepsilon}_n = \varepsilon_n/t,$$

где t — время деформирования перекрестия.

Увеличение ФПК при $\dot{\varepsilon}_n < 5 \cdot 10^{-2}$ Па протекает тем интенсивнее, чем больше реологическая константа материала, температура и длительность процесса деформирования, а в условиях высокоскоростного нагружения при $\dot{\varepsilon}_n > 5 \cdot 10^{-2}$ Па площадь возрастает с ростом градиента плотности дислокаций в зоне контакта [18].

Необходимым условием получения ПСМ является образование твердофазных соединений проволок сеток, так как их количество,

взаимное расположение и площадь существенно влияют на механические и технологические свойства материала. Оптимальный режим сварки для конкретного технологического процесса получения ПСМ определяли на физических моделях, представляющих перекрестия проволок из стали 12Х18Н10Т диаметром 1; 4 и 5 мм. Качество сварных соединений оценивали по величине относительной прочности $\sigma_{отр}/\sigma_{в}$ при испытании на отрыв. Величину прочности сварных соединений перекрестий проволок на отрыв определяли как

$$\sigma_{отр} = P_{отр}/F_{г},$$

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

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

$$\varphi = \frac{F_{св}}{F_{г}} = \frac{\sigma_{отр}}{\sigma_{в}}.$$

При планировании многофакторного эксперимента параметром оптимизации принята величина $P_{отр}$, при сварке прокаткой в качестве варьируемых факторов принимали $\varepsilon_{п}$ и T , а в условиях диффузионной сварки исследовали также влияние времени сварки. Сварку прокаткой перекрестий выполняли в вакуумированных конвертах при степени разряжения 1...5 Па на двухвалковом стане ДУО-160 со скоростью 0,1...0,5 м/с, а диффузионную сварку — на установке СДВУ-2, в которой создавался вакуум $(1...5) \cdot 10^{-2}$ Па. Для получения уравнений регрессии $P_{отр} = f(\varepsilon_{п}, T)$ и $P_{отр} = f(\varepsilon_{п}, T, t)$ в виде полинома второй степени реализован не композиционный план второго порядка [19].

Исследование влияния интенсивного динамического нагружения на свойства соединений проволок выполнено совместно с В.В. Звягинцевым в условиях ударной сварки в вакууме $1 \cdot 10^{-2}$ Па. Нагрев проволок из стали 12Х18Н10Т осуществляли проходящим электрическим током до температур $T = 1273, 1373, 1473$ К, а деформацию перекрестий выполняли байком со скоростью $v = 2,5$ м/с.

Результаты экспериментальных исследований влияния температуры, величины относительной деформации и скорости деформации

в процессе диффузионной сварки, сварки прокаткой и ударной сварки в вакууме на относительную прочность соединений проволок на отрыв приведены далее на рис. 1–7.

Обсуждение результатов исследования. Анализ полученных экспериментальных данных позволил установить, что при диффузионной сварке и сварке прокаткой (см. рис. 1, 3) прочность сварных соединений возрастает с увеличением температуры процесса, глубины вакуума и времени деформирования. Изучение влияния величины $\varepsilon_{\text{п}}$ на относительную прочность сварных соединений, полученных диффузионной сваркой (см. рис. 1) и сваркой прокаткой (см. рис. 3), позволило выявить наличие максимума при $\varepsilon_{\text{п}} = 0,1 \dots 0,2$, значение которого возрастает с повышением температуры, увеличением глубины вакуума и времени при диффузионной сварке.

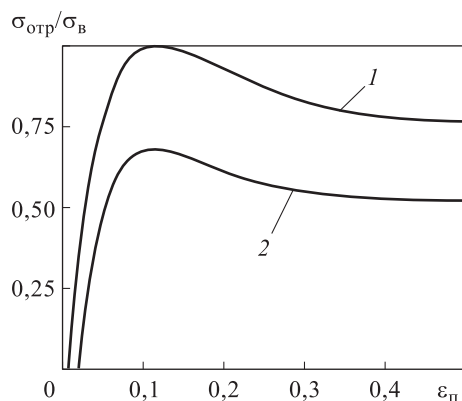


Рис. 1. Влияние относительного деформирования на относительную прочность на отрыв крестообразных соединений проволок, полученных диффузионной сваркой при $t = 15$ мин и температурах 1473К (1) и 1373К (2)

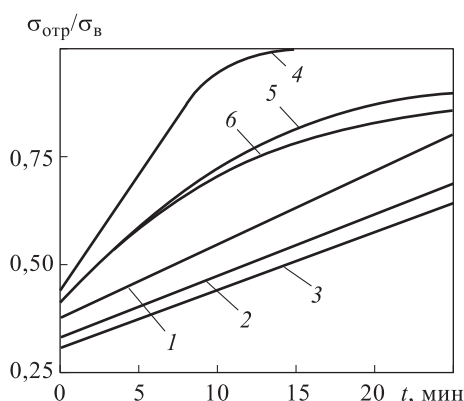


Рис. 2. Влияние времени диффузионной сварки на относительную прочность на отрыв крестообразных соединений проволок, полученных при температуре 1373К (1, 2, 3) и 1473К (4, 5, 6) и относительных деформациях $\varepsilon_{\text{п}} = 0,1$ (1, 4); 0,3 (2, 5); 0,5 (3, 6)

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 величины $F_{\text{св}}/F_{\text{г}}$. Следовательно, можно предположить, что с ростом относительного обжатия брикета сеток, со снижением температуры и времени процесса сварки произойдет уменьшение пластичности получаемых ПСМ.

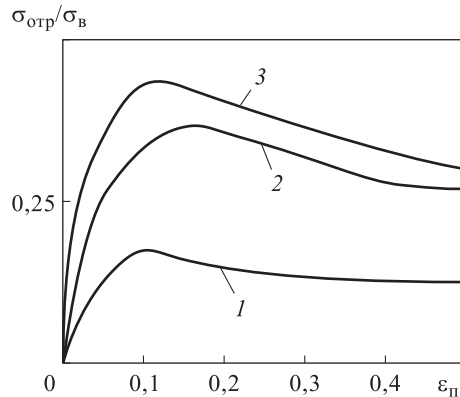


Рис. 3. Влияние относительной деформации на относительную прочность на отрыв крестообразных соединений проволок, полученных сваркой прокаткой в вакуумированных конвертах при температурах 1373К (1); 1473К (2); 1573К (3)

Исследование процесса образования сварных соединений проволок в условиях ударной сварки в вакууме позволило установить, что с увеличением $\epsilon_{п}$ и температуры процесса происходит повышение относительной прочности сварного соединения (см. рис. 4). Полученные результаты, очевидно, можно объяснить тем обстоятельством, 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 [20]. При этом образование соединения происходит и на периферии контакта, где величина деформации и контактные напряжения значительно ниже, чем в центральной зоне [18].

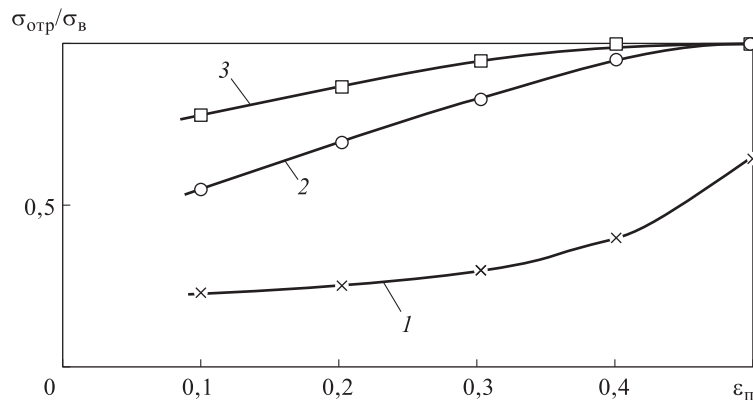


Рис. 4. Влияние относительной деформации на относительную прочность на отрыв крестообразных соединений проволок, полученных ударной сваркой в вакууме при температурах: 1273К (1); 1373К (2); 1473К (3)

Таким образом, полученные экспериментальные данные показали, что повышение механических свойств ПСМ может быть достигнуто путем установления оптимальных значений температуры и скорости деформации. Увеличение температуры во всем диапазоне величин и скоростей деформации приводит к существенному росту прочности сварных соединений на отрыв. Однако при температуре более 1373К происходит снижение пластичности в результате перегрева.

В качестве критерия выбора оптимальной температуры может быть принята величина максимального относительного удлинения сварного перекрестия при растяжении в направлении одной из проволок. Результаты испытания образцов из стали 12Х18Н10Т, полученных ударной сваркой в вакууме (см. рис. 5), показали, что с повышением температуры сварки возрастает величина $\delta_{св}/\delta_{пр}$ ($\delta_{св}$ — относительное удлинение сварного соединения после разрушения, $\delta_{пр}$ — относительное удлинение проволоки после разрушения в состоянии поставки), однако при $T > 1370\text{К}$ лишь незначительно.

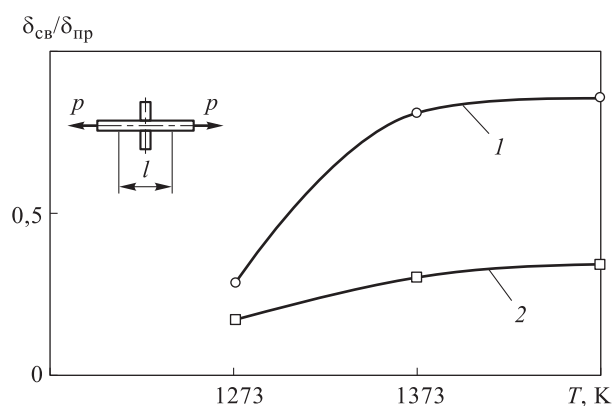


Рис. 5. Влияние температуры на величину $\delta_{св}/\delta_{пр}$ при растяжении крестообразных соединений проволок из стали 12Х18Н10Т, полученных ударной сваркой в вакууме при $p = 1 \cdot 10^{-2}$ Па (1) и $p = 5$ Па (2)

Кроме того, известно, что с увеличением глубины вакуума, температуры и времени нагрева легированных сплавов происходит испарение Cr, Ni, Zr и других элементов. Поэтому оптимальная температура при диффузионной сварке должна быть ниже, чем при кратковременных процессах, либо сварку следует проводить в условиях более низкого вакуума, а также в восстановительной или нейтральной среде.

Анализ приведенных на рис. 1, 3, и 5 данных позволил установить существенное влияние глубины вакуума на качество твердофаз-

ных соединений проволок, с увеличением которого возрастают прочность на отрыв и пластичность соединений.

Влияние скорости деформации на относительную прочность на отрыв сварных соединений проволок из стали 12Х18Н10Т показано на рис. 6 [11].

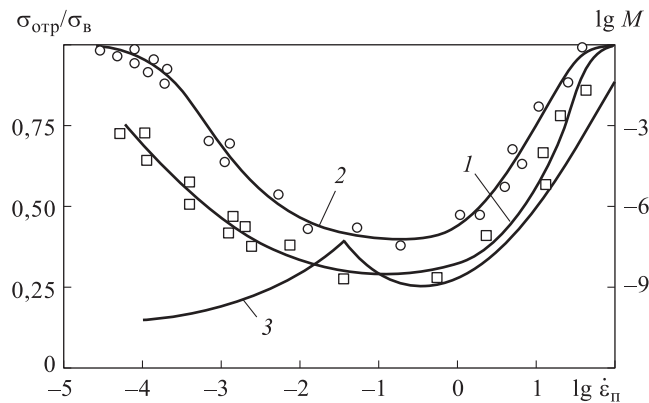


Рис. 6. Влияние скорости деформации на относительную прочность на отрыв ($\sigma_{отр}/\sigma_в$) в зоне крестообразных соединений проволок из стали 12Х18Н10Т при температурах 1373К (1), 1473К (2) и скорость массопереноса (3)

Результаты выполненных исследований позволили установить, что наиболее низкое качество сварных соединений достигается при сварке прокаткой ($\dot{\epsilon}_п = 10^{-2} \dots 1,0 \text{ с}^{-1}$). В условиях интенсивного динамического нагружения ($\dot{\epsilon}_п > 10^2 \text{ с}^{-1}$) и при ($\dot{\epsilon}_п < 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) в условиях диффузионной сварки 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 ниже, чем при процессах с меньшими скоростями нагружения. Исследование влияния $\dot{\epsilon}_п$ на скорость массопереноса M в зоне сварного соединения [11] и величину относительной ФПК [18] позволило установить, что при скоростях деформации $\dot{\epsilon}_п = 5 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ с увеличением $\dot{\epsilon}_п$ качество сварных соединений снижается как из-за повышения сопротивления деформированию микронеровностей, так и вследствие низкой скорости массопереноса (см. рис. 6). Большое значение M при динамическом нагружении, очевидно, является основной причиной снижения влияния температуры на процесс объемного взаимодействия при формировании

твердофазного соединения. Металлографические исследования образцов, полученных ударной сваркой в вакууме, показали возможность образования общих зерен в зоне контакта (см. рис. 7).

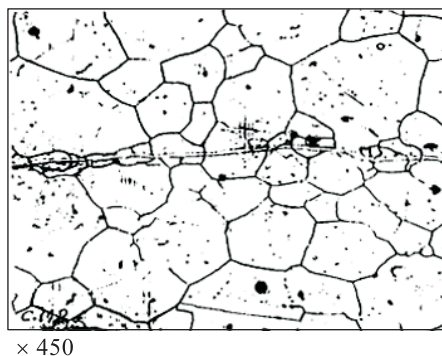


Рис. 7. Микроструктура крестообразного соединения проволок, полученного ударной сваркой в вакууме при $p = 1 \cdot 10^{-2}$ Па, $T = 1473$ К и $\dot{\epsilon}_{II} = 10^2$ с $^{-1}$

Полученные данные имеют большое практическое значение, так как позволяют рекомендовать увеличение скорости нагружения брикета сеток при изготовлении пористых элементов сваркой прокаткой либо применение горячей деформации заготовок на молоте для изготовления пористых оболочек.

Заключение. Анализ полученных экспериментальных данных позволил установить, что при диффузионной сварке и сварке прокаткой прочность сварных соединений возрастает с увеличением температуры процесса, глубины вакуума и времени деформирования (диффузионная сварка). Изучение влияния величины ϵ_{II} на относительную прочность сварных соединений позволило выявить наличие максимума при $\epsilon_{II} = 0,1 \dots 0,2$, величина которого возрастает с повышением температуры и увеличением глубины вакуума, а при диффузионной сварке — и времени процесса. Снижение прочности при $\epsilon_{II} > 0,2$ вызвано увеличением той части площади контакта, на которой значения нормальных и касательных напряжений ниже уровня, необходимого для образования твердофазного соединения.

Показано, что при $\dot{\epsilon}_{II} = 10^{-2} \dots 1,0$ с $^{-1}$ низкое качество сварных соединений объясняется высоким сопротивлением деформированию микронеровностей на контактных поверхностях проволок и низкой скоростью диффузионного массопереноса в зоне соединения. Проведенные эксперименты показали, что в результате непровара соединений, полученных сваркой прокаткой в вакуумированных конвертах,

образуются концентраторы напряжений, которые снижают пластичность ПСМ при растяжении и прочность на отрыв.

Исследование процесса образования сварных соединений проволок в условиях ударной сварки в вакууме позволило установить, что с увеличением ε_n и температуры процесса происходит повышение относительной прочности сварного соединения. Полученные результаты, очевидно, можно объяснить тем обстоятельством, что в условиях оптимального динамического нагружения не только возрастает ФПК, но и более интенсивно протекает объемное взаимодействие в зоне соединения путем аномального массопереноса по межзельному механизму. Поэтому сварное соединение образуется и на периферии макроконтakta, где значения деформации и контактных напряжений значительно ниже, чем в центральной зоне.

Установлено, что в условиях диффузионной и ударной сварки в вакууме $p = 1 \cdot 10^{-2}$ Па возможно образование твердофазного соединения на всей поверхности макроконтakta. При этом в процессе ударной сварки влияние величины температуры в исследуемом интервале на качество сварных соединений значительно ниже, чем для процессов с более низкими скоростями нагружения.

На основе выполненных исследований установлены следующие практические рекомендации по определению режимов сварки проволок сеток при изготовлении ПСМ из стали 12Х18Н10Т:

– диффузионную сварку сеток целесообразно осуществлять на стандартном оборудовании (СДВУ-2) в вакууме не ниже 10^{-2} Па при температуре $T = 1370 \dots 1420$ К со скоростью деформации не выше 10^{-4} Па, а время сварки должно составлять 15 мин;

– сварку прокаткой в конвертах необходимо выполнять при температуре $T = 1450 \dots 1470$ К в вакууме не ниже 1 Па и скорости деформации выше 1 с^{-1} ;

– ударную сварку в камере с контролируемой средой следует вести при $T = 1370 \dots 1400$ К в вакууме не ниже 10^{-2} Па и скорости деформации не ниже 10^2 с^{-1} .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Белов С.В., ред. *Пористые проницаемые материалы: Справочник*. Москва, Металлургия, 1987, 338 с.
- [2] Синельников Ю.И., Третьяков А.Ф., Матурин Н.И., Колесников А.Г., Панов А.Д., Макарошкин В.И. *Пористые сетчатые материалы*. Москва, Металлургия, 1983, 64 с.
- [3] Зейгарник Ю.А., Поляков А.Ф., Стратьев В.К. и др. Испытания пористого сетчатого материала в качестве оболочки лопаток высокотемпературных газовых турбин. *Препринт ОИВТ РАН № 2-502*. Москва, 2010, 64 с.

- [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. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-4-698>
- [5] 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*, 2015, № 11, с. 53–56.
- [6] Красулин Ю.Л. *Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе*. Москва, Наука, 1971, 119 с.
- [7] Мазур А.М., Алехин В.П., Шоршоров М.Х. *Процессы сварки и пайки в производстве полупроводниковых приборов*. Москва, Радио и связь, 1981, 224 с.
- [8] Каракозов Э.С. *Сварка металлов давлением*. Москва, Машиностроение, 1986, 280 с.
- [9] Шоршоров М.Х., Колесниченко В.А., Алехин В.П. *Клинопрессовая сварка разнородных металлов*. Москва, Metallургия, 1982, 112 с.
- [10] Эпштейн Г.Н. *Строение металлов, деформированных взрывом*. Москва, Metallургия, 1980, 256 с.
- [11] Лариков Л.Н., Рябов В.Р., Фальченко В.М. *Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке*. Москва, Машиностроение, 1975, 192 с.
- [12] Лариков Л.Н., Мазенко В.Ф., Фальченко В.М. и др. Ускоренная диффузия в железе и титане при пластической деформации. *Доклады АН СССР*, 1975, № 7, с. 637–640.
- [13] Лариков Л.Н., Фальченко В.М., Мазенко В.Ф. и др. Особенности массопереноса при сварке в твердом состоянии железа армо с импульсным нагружением. *Автоматическая сварка*, 1974, № 5, с. 19–21.
- [14] Фальченко В.М. Подвижность атомов в условиях скоростной пластической деформации металлов и сплавов. *Влияние дефектов кристаллической структуры на диффузию металлов и сплавов на массоперенос при импульсном воздействии*. Киев, 1980, с. 6–7.
- [15] Харченко Г.К., Гуревич С.М., Игнатенко А.И. Распределение радиоактивных изотопов в стыке при сварке давлением. *Автоматическая сварка*, 1983, № 10, с. 73–74.
- [16] Мусин Р.А., Анциферов В.Н., Квасницкий В.Ф. *Диффузионная сварка жаропрочных сплавов*. Москва, Metallургия, 1979, 208 с.
- [17] 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.
- [18] Третьяков А.Ф. Консолидация структурообразующих элементов в процессе горячей прокатки металлических сеток. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*, 2016, № 1, с. 5–10.
- [19] Спиридонов А.А., Васильев И.Г. *Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов*. Свердловск, Уральский политехнический институт, 1975, 140 с.
- [20] Харченко Г.К., Игнатенко А.И. Новый способ сварки давлением. *Достижения и перспективы развития диффузионной сварки: Материалы конференции*, Москва, МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, Москва, 1987, с. 97–100.

Статья поступила в редакцию 29.03.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Третьяков А.Ф. Образование сварных твердофазных соединений проволок при изготовлении пористых сетчатых материалов из стали 12Х18Н10Т. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 5.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-5-2181>

Третьяков Анатолий Федорович — профессор, д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 150 опубликованных научных работ в области создания изделий из пористых композитов с заданным комплексом свойств. e-mail: tretyakov@bmstu.ru

Formation of welded solid-state wire bonds in the manufacture of 12Kh18N10T steel porous mesh materials

© A.F. Tretyakov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 1005005, Russia

The experience of using turbine blade shells based on porous mesh materials in aerospace products and high-temperature gas turbines has shown that they are subject to destruction when under the influence of pressure fluctuations. So, first of all, fatigue failure occurs, in those permeable shells where there are no high-quality connections of structure-forming elements. It has been established that in diffusion welding and rolling welding, the strength of welded bonds increases with an increase in the process temperature, as well as in the vacuum depth and deformation time in diffusion welding. Research findings show that at strain rates of $10^{-2} \dots 1.0 \text{ s}^{-1}$, the low quality of welded joints is explained by the high deformation resistance of microroughnesses on the contact surfaces of the wires and the low rate of diffusion mass transfer in the connection zone. The study establishes that under the conditions of diffusion and impact welding in vacuum, the formation of a solid-phase joint is possible on the entire surface of the macrocontact. At the same time, in percussion welding, the influence of the temperature value in the investigated interval on the quality of welded bonds is much lower than that for processes with lower loading rates. Practical recommendations are given for determining the optimal modes of wire mesh welding in the manufacture of porous mesh materials made of 12Kh18N10T steel.

Keywords: porous mesh material, percussion welding, diffusion welding, solid-state bonding, relative strain, strain rate, temperature, contact area, mass transfer, strength

REFERENCES

- [1] Belov S.V., ed. *Poristye pronitsaemye materialy: spravochnik* [Porous permeable materials: reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 338 p.
- [2] Sinelnikov Yu.I., Tretyakov A.F., Maturin N.I., Kolesnikov A.G., Panov A.D., Makarochkin V.I. *Poristye setchatye materialy* [Porous mesh materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 64 p.
- [3] Zeygamik Yu.A., Polyakov A.F., Stratev V.K., et al. *Preprint OIVT RAN (Preprint of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences)*, no. 2–502. Moscow, 2010, 64 p.
- [4] Pelevin F.V., Avramov N.I., Orlin S.A., Sintsov A.L. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-4-698>
- [5] Novikov Yu.M. Bolshakov V.A. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti — Life safety*, 2015, no. 11, pp. 53–56.
- [6] Krasulin Yu.L. *Vzaimodeystvie metalla s poluprovodnikom v tverдой faze* [Interaction of a metal with a solid-state semiconductor]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 119 p.
- [7] Mazur A.M., Alekhin V.P., Shorshorov M.Kh. *Protsessy svarki i payki v proizvodstve poluprovodnikovyykh priborov* [Processes of welding and soldering in the production of semiconductor devices]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1981, 224 p.

- [8] Karakozov E.S. *Svarka metallov davleniem* [Pressure welding of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 280 p.
- [9] Shorshorov M.Kh., Kolesnichenko V.A., Alekhin V.P. *Klinopressovaya svarka raznorodnykh metallov* [Clinopress welding of dissimilar metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982, 112 p.
- [10] Epshteyn G.N. *Stroenie metallov, deformirovannykh vzryvom* [The structure of metals deformed by an explosion]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980, 256 p.
- [11] Larikov L.N., Ryabov V.R., Falchenko V.M. *Diffuzionnye protsessy v tverдой faze pri svarke* [Diffusion processes in the solid phase during welding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 192 p.
- [12] Larikov L.N., Mazonko V.F., Falchenko V.M., et al. *Doklady AN SSSR (Proceedings of the USSR Academy of Sciences)*, 1975, no. 7, pp. 637–640.
- [13] Larikov L.N., Falchenko V.M., Mazonko V.F., et al. *Avtomaticheskaya svarka — Automatic Welding*, 1974, no. 5, pp. 19–21.
- [14] Falchenko V.M. Podvizhnost atomov v usloviyakh skorostnoy plasticheskoy deformatsii metallov i splavov [Mobility of atoms under conditions of high-speed plastic deformation of metals and alloys]. *Vliyanie defektov kristallicheskoy struktury na diffuziyu metallov i splavov na massoperenos pri impulsnom vozdeystviy* [Influence of crystal structure defects on the diffusion of metals and alloys on mass transfer under pulsed action]. Kiev, 1980, pp. 6–7.
- [15] Kharchenko G.K., Gurevich S.M., Ignatenko A.I. *Avtomaticheskaya svarka — Automatic Welding*, 1983, no. 10, pp. 73–74.
- [16] Musin R.A., Antsiferov V.N., Kvasnitskiy V.F. *Diffuzionnaya svarka zharo-prochnykh splavov* [Diffusion welding of heat-resistant alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 208 p.
- [17] Tretyakov A.F. *Proizvodstvo prokata (Rolled products production)*, 2013, no. 6, pp. 29–34.
- [18] Tretyakov A.F. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya (Problems of ferrous metallurgy and materials science)*, 2016, no. 1, pp. 5–10.
- [19] Spiridonov A.A., Vasilev I.G. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii i optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning an experiment in the study and optimization of technological processes]. Sverdlovsk, URFU Publ., 1975, 140 p.
- [20] Kharchenko G.K., Ignatenko A.I. *Novy sposob svarki davleniem. Dostizheniya i perspektivy razvitiya diffuzionnoy svarki: materialy konferentsii* [A new way of pressure welding. Achievements and prospects for the development of diffusion welding: conference proceedings]. Moscow, Dzerzhinsky MDNTP Publ., Moscow, 1987, pp. 97–100.

Trtyakov A.F., Professor, Dr. Sc. (Eng.), Department of Material Processing Technologies, Bauman Moscow State Technical University, author of more than 150 research publications in the field of creation of products from porous composites with a given set of properties. e-mail: tretyakov@bmstu.ru