

Ю. М. Темис, Х. Х. Азметов,
Д. С. Тимофеев

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ НЕОДНОРОДНЫХ СТРУКТУР

Выполнено моделирование образования дефектов при диффузионной сварке. Методами математического моделирования показано, что дефекты в области сварки и их ориентация существенно влияют на циклическую долговечность соединения. Оценено влияние микроструктурной неоднородности материала на циклическую долговечность соединения, траекторию и скорость распространения трещины.

E-mail: jmt@newmail.ru

Ключевые слова: дефект, диффузионная сварка, циклическая долговечность, распространение трещины.

Диффузионная сварка — технологический процесс соединения как одинаковых, так и разнородных материалов без расплавления, причем получаемое соединение может обладать характеристиками до 95...99 % от соответствующих показателей исходного материала. Однако даже тщательно проведенная сварка не лишена дефектов. В зоне соединения из-за неправильного выбора или нанесения stop-off — вещества, препятствующего сварке отдельных областей заготовок, и образования хрупкого оксидного слоя могут образовываться непровары, сколы и микротрещины. Моделирование их формирования и влияния на характеристики соединения затруднительно, так как зависит от конкретных условий сварки. Поэтому рассмотрим наиболее распространенные дефекты — микропоры, образование которых связано с шероховатостью соединяемых поверхностей. К порам отнесем замкнутые полости (рис. 1, а, б) в зоне соединения, не содержащие оксидов и stop-off. За счет поверхностной диффузии материала при сварке они приобретают близкую к сферической форму и могут быть аппроксимированы сферическими полостями.

Модели закрытия пор. В первой модели принимаются во внимание лишь микропоры, и полагается, что их закрытие связано только с ползучестью и диффузией [1]:

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{total} = \left(\frac{da}{dt}\right)_{creep} + \left(\frac{da}{dt}\right)_{diffusion}, \quad (1)$$

$$\left(\frac{d}{dt}a(t)\right)_{diffusion} = -\frac{D\nu\Omega\left(\frac{2\gamma}{a} + P_{ext}\right)}{kTa}, \quad (2)$$

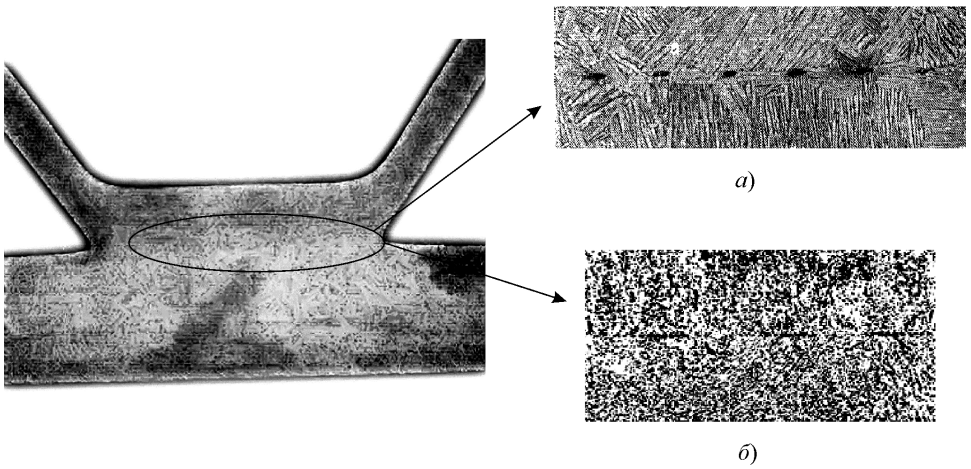


Рис. 1. Вариант соединения путем диффузионной сварки:

a – отдельно расположенные поры; *б* – сгруппированные поры

$$\left(\frac{d}{dt} a(t) \right)_{creep} = -\frac{3}{4} K_1 a \left(2\sigma_0 \ln \left(\frac{b}{a} \right) + \frac{2\gamma}{a} - P_{int} + P_{ext} \right). \quad (3)$$

Здесь $a(t)$ – средний радиус пор [см]; D_v – коэффициент диффузии [см²/с]; T – температура [К]; k – постоянная Больцмана [Дж/К]; P_{ext} и P_{int} – внешнее и внутреннее давления на стенки поры, соответственно [Па]; γ – поверхностная энергия материала стенки поры [Дж/см²]; Ω – объем вакансии [см³]; d – коэффициент диффузии [см²/с]; K_1 , σ_0 – константы материала [1/Па·с, МПа]. В качестве начального условия для уравнения (1) используется средняя высота неровностей поверхности. В расчете (рис. 2) предполагалось, что рабочий газ установки попадает в поры, причем процесс закрытия пор полагался изотермическим.

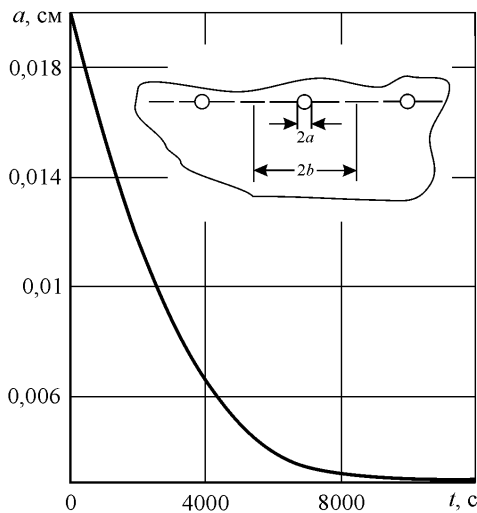


Рис. 2. Изменение среднего радиуса микропоры

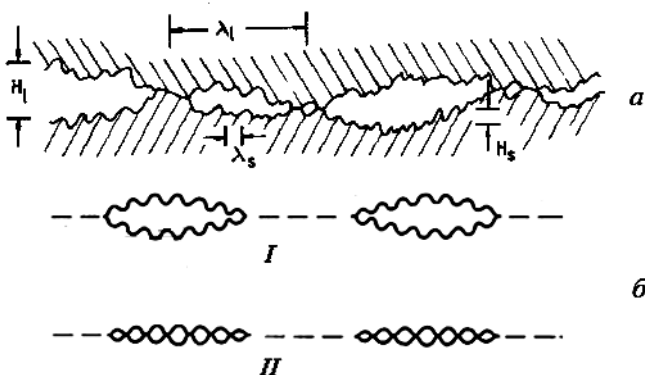


Рис. 3. Модель протяженных пор:

a — модель контактирующих поверхностей; *б* — этапы схлопывания пор

Вторая модель учитывает как малые, так и существенные по протяженности неровности контактирующих поверхностей (рис. 3, *a*). На рис. 3, *б* представлены этапы схлопывания пор: *I* — первичный контакт и начало закрытия протяженных полостей; *II* — формирование групп микропор и их закрытие. В пользу этой модели говорят экспериментальные исследования соединений [1] (рис. 1, *б*).

Численное моделирование циклической долговечности соединения. Расчетная схема (рис. 5) моделировала цепочку пор. Ориентация цепочки пор (рис. 6) может варьироваться. Проведена численная оценка циклической долговечности цепочки пор с использованием модели малоциклового усталости и технологии “умирающих элементов” [2–4]. Максимальные напряжения в зоне соединения действуют в радиальном направлении. К границе области в зависимости от направления цепочки пор (рис. 6) прикладывалось перемещение, соответствующего напряжению отнулевого цикла.

На рис. 7 для различной ориентации цепочек пор показаны расчетные усталостные диаграммы до начала развития трещины. Из результатов расчета видно, что при размахах деформаций более 0,5 % допус-

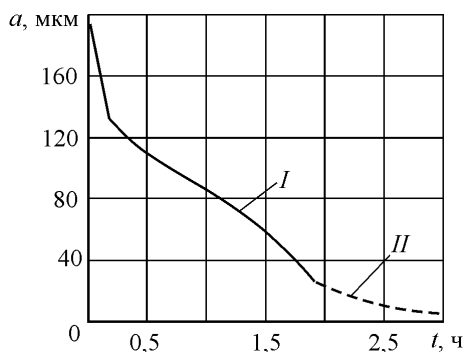


Рис. 4. Изменение среднего радиуса поры

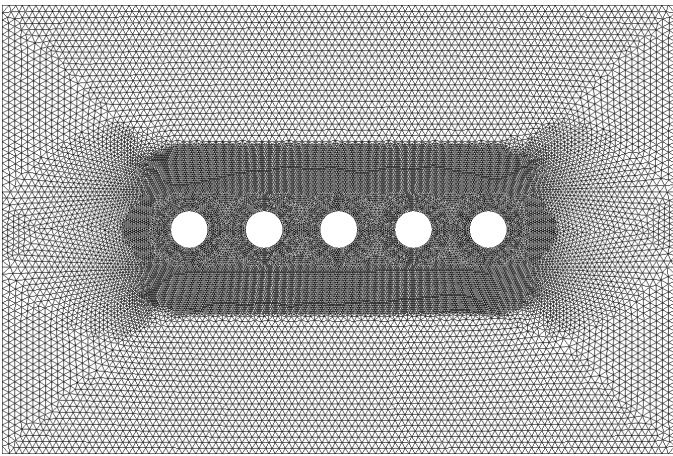


Рис. 5 Сетка конечных элементов

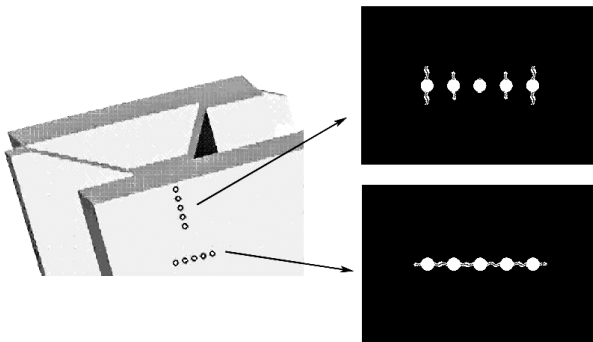


Рис. 6. Расчетная схема и результаты расчета для различной ориентации пор

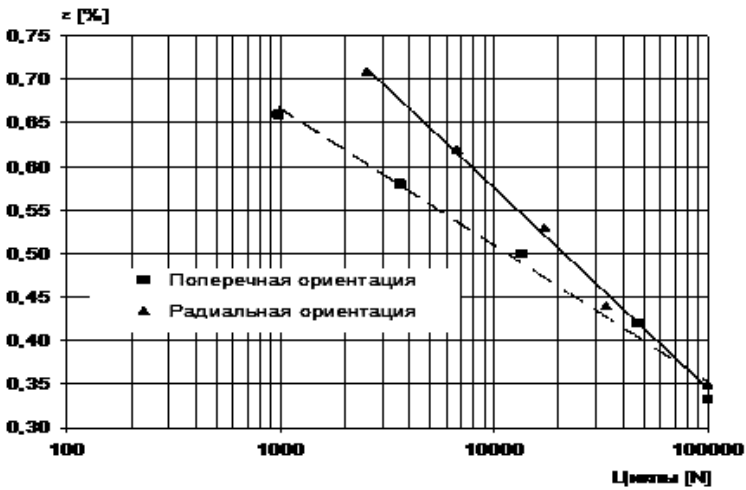


Рис. 7. Расчетная усталостная диаграмма цепочки пор до начала развития трещины

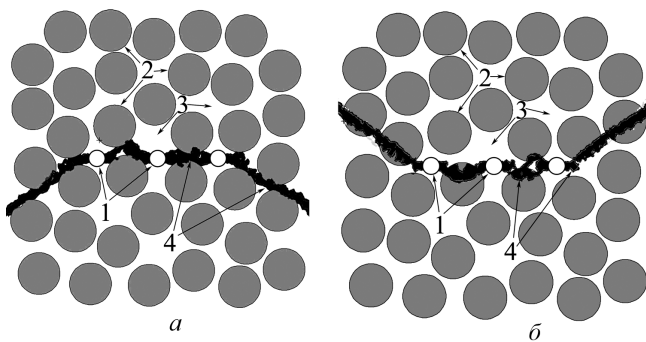


Рис. 8. Численный расчет развития трещины в структурированных образцах:
 1 — микропоры, 2 — условные зерна, 3 — материал между зернами, 4 — трещина.
 а — жесткое условное зерно, б — жесткий материал между зернами

каемый ресурс циклической долговечности соединения до начала развития магистральной трещины составляет не более 2 000 циклов. При этом скорость развития трещины и ресурс соединения существенным образом зависят от взаимного положения микропор и протяженности их цепочки.

Приведенные выше результаты были получены в предположении однородности материала. Однако, размеры микропор сравнимы с размерами зерна металла, следовательно, микроструктура металла оказывает существенное влияние на развитие трещины. Поэтому были рассмотрены две принципиально различные структуры материала: в первом случае более жестким полагалось условное зерно (рис. 8, а), во втором — материал между зернами (рис. 8, б). Кривые деформирования в области пластичности для “жесткого” и “мягкого” материалов отличались на 3...5%. В соответствующих численных экспериментах рассматривались структурированные образцы, к которым прикладывалась циклическая нагрузка, направленная перпендикулярно цепочке пор. Результаты расчетов приведены на рис. 8. Из результатов расчета видно, что микроструктура материала и ее характер оказывают существенное влияние на распространение трещины. Прямолинейное развитие трещины становится невозможным в образце, обладающем микроструктурой. Тот факт, что трещина в своем развитии должна преодолевать препятствия, в зависимости от характера структуры, в виде условных зерен или же материала между ними, позволяет предположить, что ее распространение будет затруднено по сравнению с трещиной в однородном материале.

Вычислительные эксперименты, призванные проверить данное предположение, проводились на одной и той же сетке конечных элементов как для образцов, обладающих неоднородной структурой, так и для однородных образцов. В качестве материала однородного образца были поочередно выбраны “жесткий” и “мягкий” материалы.

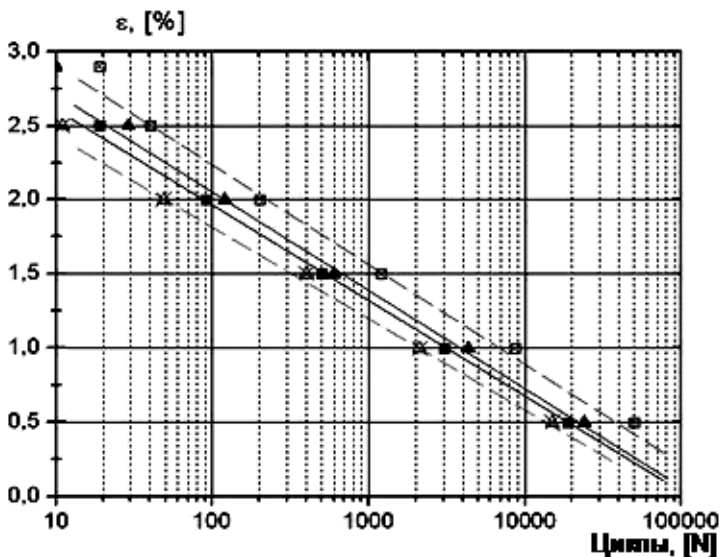


Рис. 9. Расчетная усталостная диаграмма цепочки пор в неоднородной (■ — “жесткое”; ▲ — “мягкое” зерно) и однородной (⊠ — “жесткий”; ⊡ — “мягкий” материал) структурах при отнулевом цикле с максимальной деформацией

Моделирование частично подтвердило выдвинутое предположение: распространение трещины затруднено в образце, обладающем неоднородной структурой, но лишь по сравнению с однородным образцом из “мягкого” материала; образец из “жесткого” материала показал более высокую циклическую долговечность (рис. 9). Характер развития магистральных трещин от инициирующих их микропор показан на рис. 8. Следует отметить, что в образце с “жесткими” зёрнами трещина развивается в межзеренном пространстве. В образце с “мягкими” зёрнами трещина развивается как в зёрнах, так и в межзеренной области.

Выводы. Выполнено моделирование образования дефектов при диффузионной сварке. Методами математического моделирования показано, что дефекты в области сварки и их ориентация существенно влияют на циклическую долговечность соединения. Оценено влияние микроструктурной неоднородности материала на циклическую долговечность соединения, траекторию и скорость распространения трещины. Результаты моделирования могут стать основой для настройки диагностического оборудования по оценке качества и ресурса готовых изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Garmon G., Paton N. E., Argon A. S. Attainment of Full Interfacial Contact During Diffusion Bonding // Metallurgical Transactions. 1975. V. 6, No. 6. P. 1269–1279.

2. Темис Ю. М. Пластичность и ползучесть в инженерных расчетах // Аналитические и численные методы в решении граничных задач пластичности и вязкоупругости. Свердловск: АН СССР, 1986. С. 100–106.
3. Темис Ю. М. Моделирование процессов неизотермического упругопластического деформирования в деталях энергосиловых установок / В кн.: Машиностроение. Энциклопедия. Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. — Динамика и прочность машин. Теория Механизмов и машин. Т. 1–3 в 2-х книгах. Кн.1. Под общ. ред. К.С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1994. С. 263–268.
4. Temis J. M., Azmetov Kh. Kh., Zuzina V. M. Low-Cycle Fatigue Simulation and Life-Time Prediction of High Stressed Structures // Solid State Phenomena. 2009. Vols. 147–149. P. 333–338.

Статья поступила в редакцию 27.07.2012