

## ОСОБЕННОСТИ ПОРООБРАЗОВАНИЯ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПАРОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. В. ДМИТРИК<sup>1</sup>, А. В. ГЛУШКО<sup>1</sup>, С. Г. ГРИГОРЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НТУ «ХПИ». 61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21. E-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлены результаты исследования порообразования в металле сварных соединений паропроводов, длительно эксплуатируемых в условиях ползучести. Выявлены особенности порообразования на участках зоны термического влияния сварных соединений, что позволяет повысить оценку диагностирования их остаточного ресурса. Критическим порогом повреждаемости сварных соединений является местная плотность микропор величиной 1500...1800 пор/мм<sup>2</sup> размером от 0,8 мм и более. Библиогр. 7, рис. 7.

*Ключевые слова:* сварные соединения паропроводов, поры, остаточный ресурс, диагностирование, повреждаемость, диффузионное перемещение

Диагностирование остаточного ресурса сварных соединений паропроводного тракта ТЭС, выработавших свой парковый ресурс, является в настоящее время важнейшей задачей тепловой энергетики Украины.

В процессе длительной эксплуатации сварных соединений из Cr–Mo–V теплоустойчивых перлитных сталей в условиях ползучести их повреждаемость преимущественно обусловлена образованием и развитием пор. Повреждаемость порами металла участков зоны термического влияния (ЗТВ), а также металла шва и основного металла изучена недостаточно, что не позволяет диагностировать с достаточной точностью остаточный ресурс сварных соединений паропроводов.

Зарождение и развитие пор в металле паропроводов следует рассматривать как взаимосвязанные составляющие процесса их повреждаемости. Целью работы являлось изучение особенностей механизма порообразования в металле длительно эксплуатируемых сварных соединений паропроводов из сталей 15X1M1Ф и 12X1MФ. Результаты исследований позволили обеспечить снижение интенсивности порообразования и уточнить диагностирование остаточного ресурса сварных соединений паропроводов [1–7], повреждаемость которых является более интенсивной, чем интенсивность повреждаемости самих паропроводов.

Структура металла сварных соединений изучалась с помощью микроструктурного, микрорентгеноспектрального и рентгенографического методов путем использования экспериментальных образцов, а также образцов, вырезанных из действующих паропроводов (ТЭС г. Змиев, ТЭС г. Энергодар). Изучение процессов обра-

зования микропор и микротрещин проводилось путем использования электронной и световой микроскопии.

Зарождение микропор происходит вследствие сопряженного действия диффузионного и деформационного механизмов. Диффузионный механизм обеспечивает направленное перемещение легирующих элементов, что приводит к образованию сегрегаций, а также обеспечивает перемещение микронесплошностей и их слияние [1]. Деформационный механизм включает процесс перемещения дислокаций и их торможение, что обеспечивает локальное увеличение плотности дислокаций и образование зародышевых пор, размер которых может составлять примерно 0,1 мкм.

Диффузионное перемещение легирующих элементов (хрома и молибдена) из центральных зон зерен  $\alpha$ -фазы в их приграничные зоны, а также перемещение приведенных элементов по границам зерен, что приводит к образованию сегрегаций, способствует протеканию карбидных реакций I гр [1]. Перемещение легирующих элементов вызывает уменьшение прочностных характеристик зерен  $\alpha$ -фазы, что подтверждается, соответственно, фрагментацией (полигонизацией) зерен и увеличенным уровнем их деформации [2]. Установлено, что уровень деформации участков ЗТВ значительно превышает массовую деформацию паропроводов, составляющую (при наработке сварных соединений свыше 250000 ч) около 0,5...0,7 %. (рис. 1). Можно показать, что деформация металла шва сварных соединений незначительно отличается от деформации металла самих паропроводов.

В исходном металле сварных соединений микронесплошности и микропоры по телу зерен

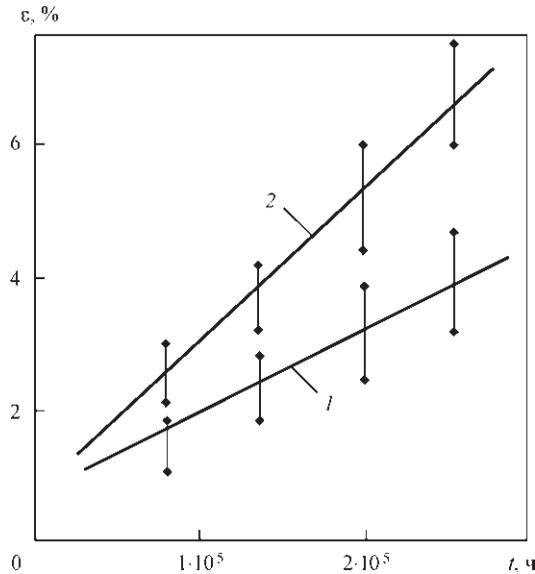


Рис. 1. Зависимость относительной деформации металла сварных соединений стали 12Х1МФ от длительности его наработки: 1 — металл участка перегрева ЗТВ; 2 — участка неполной перекристаллизации

$\alpha$ -фазы и по их границам расположены хаотически. Такое их расположение сохраняется примерно до 150000 ч наработки паропроводов. В процессе дальнейшей наработки образование пор происходит с определенной ориентировкой. Форма пор от шаровидной и эллипсоидной (правильной) в процессе их развития становится разветвленной (неправильной). Затем слившиеся поры превращаются в трещину (рис. 2). Трещины ползучести имеют зигзагоподобный вид и развиваются после наработки сварных соединений свыше 270 тыс. ч преимущественно по хрупкому ме-



Рис. 2. Микрошлиф ( $\times 500$ ) металла сварного соединения паропровода из стали 12Х1МФ с повреждениями по механизму ползучести. Ресурс 280 тыс. ч. Температура эксплуатации 545...565 °С

ханизму. Порообразование существенно зависит от структуры сварных соединений [7].

Для уточнения диагностирования остаточного ресурса сварных соединений целесообразно определять плотность пор на тех участках ЗТВ сварных соединений, где отмечается наибольшая структурная неоднородность. Например, на участке неполной перекристаллизации, где новые продукты распада аустенита представляют глобуляризованный перлит [6].

Образование пор происходит преимущественно по границам зерен  $\alpha$ -фазы и зависит от: расположения границ зерен относительно рабочих напряжений; структуры и строения границ зерен (границы между двумя и тремя зернами); наличия выделений вторых фаз по границам зерен. Порообразование можно рассматривать как эффект конденсации вакансий, обусловленный степенью пластической деформации, что приводит к локальному пересыщению вакансиями границ зерен и образованию микронесплошностей [4, 6]. Их образование в условиях ползучести обеспечивается проявлением внутреннего скольжения и проскальзывания по границам зерен  $\alpha$ -фазы. Наиболее интенсивно — в местах нахождения коагулирующих выделений вторых фаз [2].

Проскальзывание по границе зерна  $\alpha$ -фазы в местах взаимодействия границы с коагулирующим выделением приводит к раскрытию полости, развивающейся в зародышевую микропору (рис. 3). Дальнейшее развитие порообразования характеризуется определенной стадийностью и зависит от структуры и условий эксплуатации паропроводов (рис. 4).

В условиях ползучести (наработка сварных соединений более 250000...280000 ч) порообразование по телу зерен  $\alpha$ -фазы носит хаотический характер, однако их расположение по границам зерен имеет определенные особенности. Микропоры образуются:

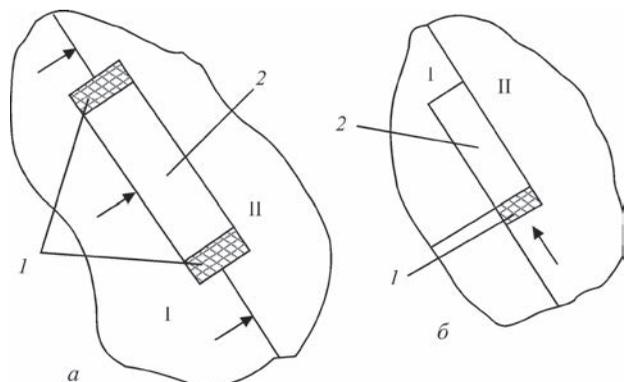


Рис. 3. Схема образования зародыша микропоры: а — образование полости 1 на торцах выделения второй фазы 2; б — проскальзывание по границе у выделения 2, приводящее к образованию зародыша микропоры 1 (I, II — зерна, разделенные границей)

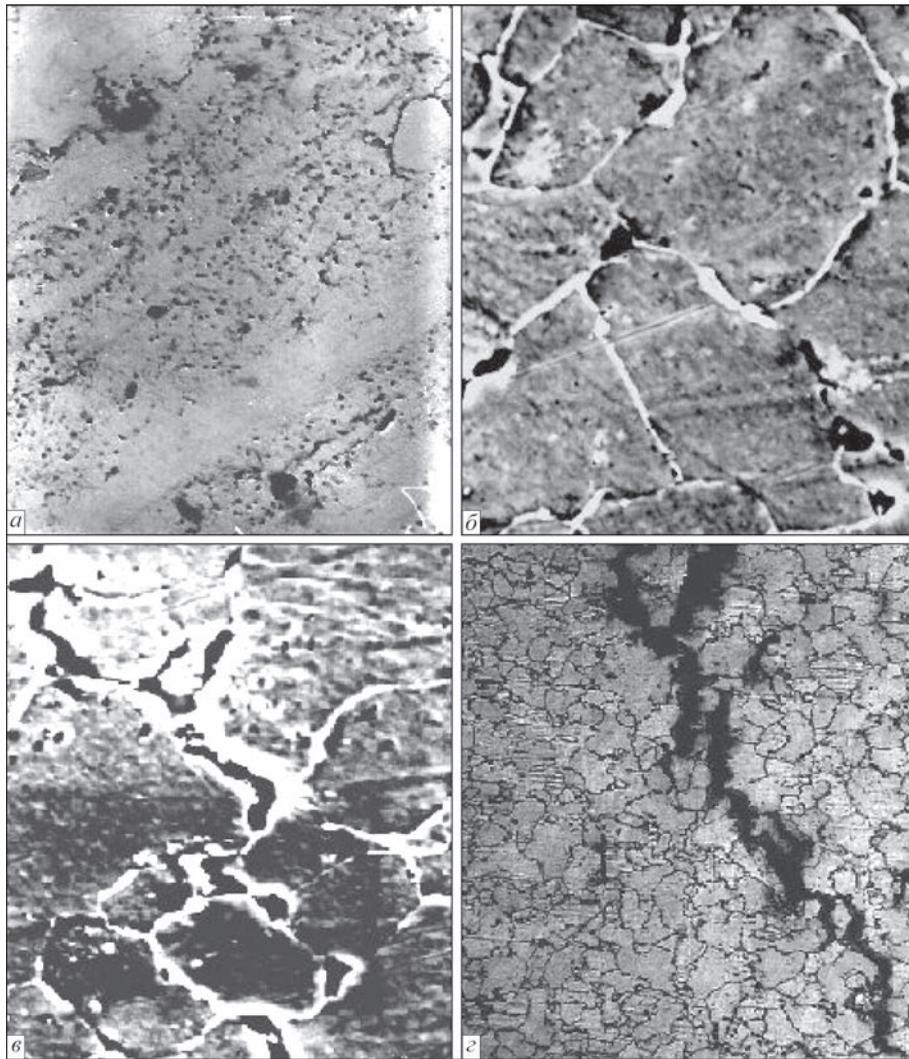


Рис. 4. Последовательность развития пор в сварных соединениях стали 12X1MΦ: *a* — зародышевые поры диаметром 0,1...0,3 мкм ( $\times 5000$ ); *b* — единичные поры диаметром 1...4 мкм по границам зерен ( $\times 2500$ ); *c* — поры на стадии объединения в микротрещины ( $\times 2500$ ); *d* — трещина ползучести ( $\times 500$ )

1. На границах, перпендикулярных растягивающим напряжениям, в местах, где расположены коагулирующие выделения вторых фаз (преимущественно  $M_{23}C_6$ ) — около 70 %.

2. На стыке трех зерен без выделений вторых фаз — 20 % (рис. 5).

3. На стыках двух зерен — 10 %.

Образование микропор вызывает снижение пластичности металла и связано с наличием остаточной деформации. Например, при массовой деформации металла сварного соединения 0,6 % деформация металла участка неполной перекристаллизации ЗТВ может составлять 4...6 %, (наработка 280000 ч), что близко к данным Ф. А. Хромченко (6...8 %, наработка 250000 ч) [4].

Заметим, что Ф. А. Хромченко участок неполной перекристаллизации ЗТВ называет «мягкой прослойкой», хотя ее твердость в сварных соединениях рассматриваемых сталей 15X1M1Φ и 12X1MΦ может быть не меньше твердости других участков ЗТВ. Участок неполной перекри-

сталлизации характеризуется наибольшим пересыщением вакансиями по сравнению с другими участками сварного соединения. Такое пересыщение обусловлено самодиффузией хрома и молибдена из центральных зон зерен  $\alpha$ -фазы в пригра-

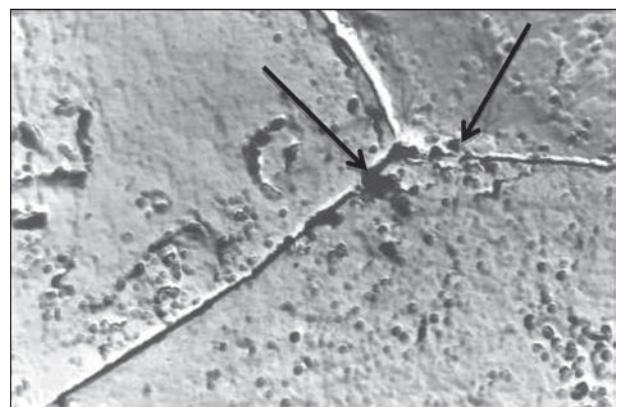


Рис. 5. Микршлиф ( $\times 14000$ ) металла участка неполной перекристаллизации ЗТВ сварного соединения стали 12X1MΦ, показывающий зарождение пор на границе трех зерен (стрелки). Нарботка 275637 ч

ничные зоны и образованием сегрегаций, а также диффузией вакансий и образованием флуктуаций вакансий [6]. Флуктуации в процессе наработки сварных соединений свыше 250000 ч имеют тенденцию увеличиваться. Подтверждается предположение Гринвуда, что поры на границах зерен в условиях ползучести следует рассматривать как эффект конденсации вакансий, избыток которых относительно равновесной концентрации создается пластической деформацией [5]. Установлено, что количество микропор увеличивается при увеличении пластической деформации. Порообразованию способствует уменьшение энергии границ зерен при ликвидации части их поверхности, что можно расценивать как начальный период рекристаллизации. Связь между пересыщением вакансиями ( $\Delta/c_0$ ) и радиусом растущего зародыша в процессе диффузионного зарождения поры определяли по Я. Е. Гегузину [5]

$$r = \frac{2\gamma V}{kT(\Delta/c_0)},$$

где  $\gamma$  — поверхностная энергия;  $V = b^3$  — атомный объем;  $\Delta = c_1 - c_0$  — изменение концентрации вакансий;  $c_1$  — установленная концентрация вакансий;  $c_0$  — равновесная концентрация вакансий;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура.

Можно представить, что концентрация вакансий в металле сварных соединений (наработка более 250000 ч) в 4...8 раз превышает равновесную.

Учитывая  $b = 3 \cdot 10^{-3}$  см и  $\gamma = 500$  эрг/см<sup>2</sup>, получим для температуры 545 °С размер зародыша поры, включающий примерно  $10^7 \dots 10^9$  вакансий. При дальнейшей эксплуатации в условиях рабочих напряжений и температур, а также влияния дополнительных факторов (перегревы, пуски-остановы, локальное увеличение напряжений и др.) величина пересыщения вакансиями может быть увеличена примерно на 30...40 %.

Возле коагулирующих выделений, где скапливаются дислокации, создаются соответствующие растягивающие напряжения. Скопление дислокаций отмечается при электронно-микроскопических исследованиях тонких фольг из образцов сварных соединений после их наработки свыше 270000 ч. Подтверждением является образование полигональной структуры зерен  $\alpha$ -фазы, т.е. их фрагментация (рис. 6). В структуре кристаллов  $\alpha$ -фазы, в условиях ползучести, скольжение происходит в направлении диагоналей кубической решетки  $\langle 111 \rangle$  по совокупности додекаэдрических плоскостей  $\{110\}$ . После наработки сварных соединений более 250000 ч скольжение происходит сначала по плоскостям  $\{112\}$ , а затем и по плоскостям  $\{123\}$ . Проскальзывание по границам зерен, в зависимости от расположения выделения, при-

водит к возникновению, соответственно, растягивающих и сжимающих напряжений (см. рис. 3). Длительно действующие растягивающие напряжения приводят к раскрытию полости. Зарождение микропор связано так же с образованиемazole коагулирующих выделений субграниц.

Известные модели образования пор не учитывали наличие коагулирующих выделений по границам зерен. Заметим, что скорость проскальзывания, необходимая для образования микропор в длительно эксплуатируемых сварных соединениях, является различной. Скорость зависит от расположения границ зерен, их строения, наличия на них коагулирующих выделений вторых фаз и интенсивности их коагуляции. Размеры выделений по длине, расположенных по границам зерен, при наработке сварных соединений свыше 280000 ч могут составлять 1...5 мкм. Установлено, что количество пор, образующихся на границах зерен, зависит от их деформации. Например, в металле участка неполной перекристаллизации ЗТВ сварных соединений стали 15Х1МФ при его деформации 5...7 % усредненная плотность пор размером 2...8 мкм на 1 мм<sup>2</sup> составляла 7,2. Деформация участков ЗТВ существенно зависит от их структуры. При наличии в структуре участка неполной перекристаллизации новых продуктов распада аустенита в виде глобуляризованного перлита его деформация может составлять 5...7 %, в виде сорбита — 1...2 %, троостита — около 1 % при массовой деформации сварных соединений около 0,7 %. Плотность пор в зависимости от наработки сварных соединений, имеющих соответствующую структуру новых продуктов распада аустенита, распределилась следующим образом (рис. 7).

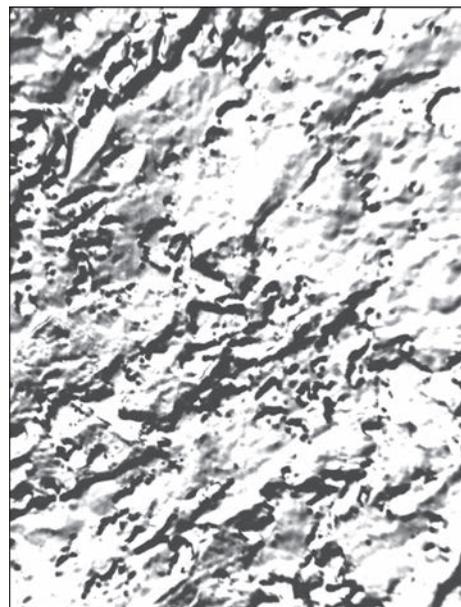


Рис. 6. Фрагментированная структура участка неполной перекристаллизации ЗТВ сварного соединения стали 15Х1МФ ( $\times 6000$ ). Ресурс 276000 ч

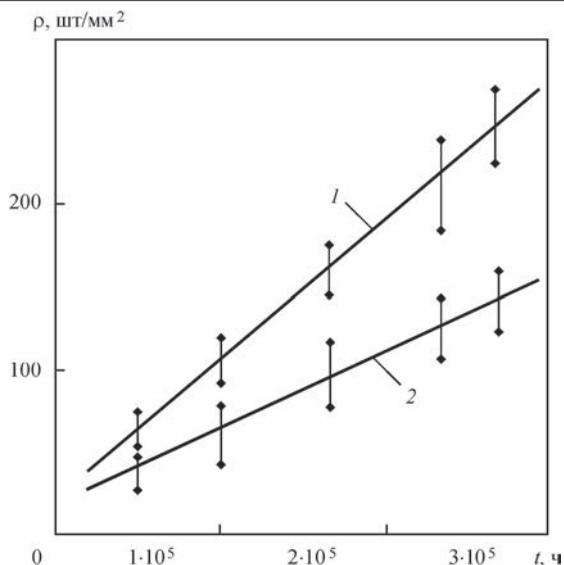


Рис. 7. Зависимость плотности пор ползучести  $\rho$  (продольный размер 0,5...1,1 мкм), образующихся на участке неполной перекристаллизации ЗТВ сварного соединения стали 12Х1МФ от длительности его наработки  $t$ . Новые продукты распада аустенита: 1 — глобуляризованный перлит; 2 — сорбит. Нароботка — 276000 ч

Из полученных результатов следует, что плотность микропор (примерно 1500...1800 пор/мм<sup>2</sup>), размер которых составляет более 0,8 мкм, можно считать критической. Дальнейшее увеличение плотности пор приводит к ускоренному их слиянию и образованию трещин ползучести. Такие трещины развиваются преимущественно по хрупкому механизму, чему способствуют наличие коагулирующих выделений по границам зерен  $\alpha$ -фазы и наличие зернограницных сегрегаций.

Количество пор при постоянно действующих растягивающих напряжениях зависит от взаимодействия внутреннего скольжения и проскальзывания, что первоначально обеспечивается самодиффузией хрома и молибдена, а также диффузией вакансий. Их торможение, т.е. снижение интенсивности, в условиях ползучести приводит к увеличению стабильности структуры.

Проскальзывание можно рассматривать как эффект относительного смещения локальных участков границ зерен. Зарождение микронесплошностей у выделений связано с нарушением

когерентности выделений и зерен  $\alpha$ -фазы, что отмечается при коагуляции выделений. Увеличение стабильности структуры металла сварных соединений, длительно эксплуатируемых в условиях ползучести, существенно уменьшает интенсивность порообразования.

### Выводы

1. Выявлено, что наиболее интенсивно порообразование происходит на участке неполной перекристаллизации ЗТВ сварных соединений, где новые продукты распада аустенита представляют глобуляризованный перлит.

2. Установлено, что при повреждаемости сварных соединений паропроводов, длительно эксплуатируемых в условиях ползучести, плотность микропор 1500...1800 пор/мм<sup>2</sup>, размером от 0,8 мкм и больше, можно считать критической.

3. Показано, что количество микропор на участках металла ЗТВ сварных соединений паропроводов зависит от деформации участков и является наибольшим на участке неполной перекристаллизации, где новые продукты распада аустенита представляют глобуляризованный перлит.

1. Дмитрик В. В. Карбидные фазы и повреждаемость сварных соединений при длительной эксплуатации / В. В. Дмитрик, В. Н. Баумер // *Металлофизика, новейшие технологии.* — 2007. — Т. 2, № 7. — С. 937–947.
2. Особенности деградации металла сварных соединений паропроводов / В. В. Дмитрик, О. В. Соболев, М. А. Погребной [и др.] // *Автоматическая сварка.* — 2015. — № 7. — С. 12–17.
3. Трубочев В. М. Методы оценки микроповреждаемости металла длительно работающих паропроводов ТЭС / В. М. Трубочев, Н. И. Каменская // *Металловедение и термическая обработка металлов.* — 2012. — № 8. — С. 49–54.
4. Хромченко Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов / Ф. А. Хромченко. — М.: Машиностроение, 2002. — 351 с.
5. Розенберг В. М. Ползучесть металлов / В. М. Розенберг. — М.: Металлургия, 1967. — 275 с.
6. Уточнение механизма повреждаемости металла длительно эксплуатируемых сварных соединений паропроводов / В. В. Дмитрик, Т. А. Сиренко, С. М. Барташ [и др.] // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* — 2015. — № 6. — С. 13–18.
7. Березина Т. Г. Структурный метод определения остаточного ресурса деталей длительно работающих паропроводов / Т. Г. Березина // *Теплоэнергетика.* — 1986. — № 3. — С. 53–56.

Поступила в редакцию 12.05.2016

## ExpoWELDING 2016

18–20 октября 2016 г.

г. Сосновице, Польша

Экспо Силезия и Институт сварки Польши  
проводят очередную сварочную выставку ExpoWELDING 2016

<http://exposilesia.pl>