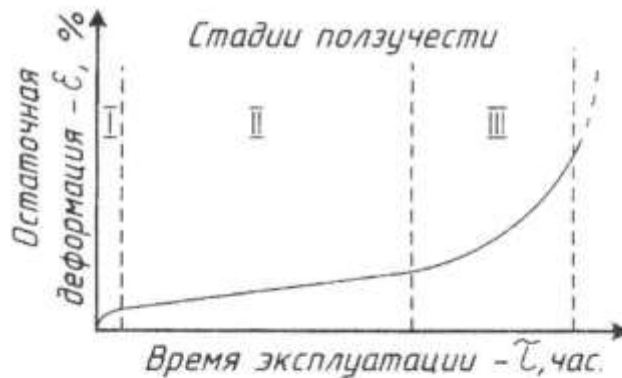


## К МЕХАНИЗМУ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Обнаружено, что в стали на последней – ускоренной стадии ползучести по границам зёрен образуются не микропоры (округлые и полые) и клиновидные микротрещины, как на данный момент принято считать, а компактные микрорыхлоты. Металлическая составляющая в микрорыхлотах занимает ~ 70 - 80 % от их объёма.

При описании высокотемпературной ползучести теплостойких сталей выделяют три её стадии, в зависимости от того, как изменяется с течением времени остаточная деформация ползучести (см. рисунок).



Изменение остаточной деформации ползучести с течением времени

Считается, что на последней (III), ускоренной стадии, которая заканчивается разрушением, в структуре металла по границам зёрен образуются микропоры, т.е. округлые микрополости [1]. Размеры этих микрополостей-микропор достигают нескольких микрон и микропоры видны на шлифе при помощи металлографического микроскопа при увеличении 500 – 1000 раз (фото 1).

Количество микропор, например, в стали 12Х1МФ, в состоянии предразрушения (в конце III стадии) достигает 6-8 тысяч штук на один квадратный мм плоскости шлифа. Со временем они объединяются, образуя протяженные микродефекты – микротрещины, которые в дальнейшем дают начало одной или нескольким макротрещинам.

Для выявления микропор ползучести применяется специальная методика приготовления металлографического шлифа – десяти и более кратное повторение операции «полировка + травление».

В отличие от микропор ползучести для наблюдения микродефектов, например, трещин с раскрытием в несколько микрон, причиной образования которых являются усталость или термические напряжения, не требуется так тщательно готовить металлографический шлиф. Микротрещины, образовавшиеся не по механизму ползучести, видны на шлифе уже после первой полировки или, по крайней мере, после первого травления шлифа (фото 2).

Кроме отмеченной особенности металлографической методики выявления микропор ползучести существует ещё расхождение в значениях изменения плотности металла с микропорами ползучести, полученных различными методами.

Многочисленными измерениями плотности металла путём взвешивания (в жидкости) установлено, что изменение (уменьшение) плотности, например, стали 12Х1МФ, не превышает 1,5 %. Однако, если рассчитать объём, который занимают микропоры в единице объёма металла, то эти результаты превышают в несколько раз значения, полученные при взвешивании.

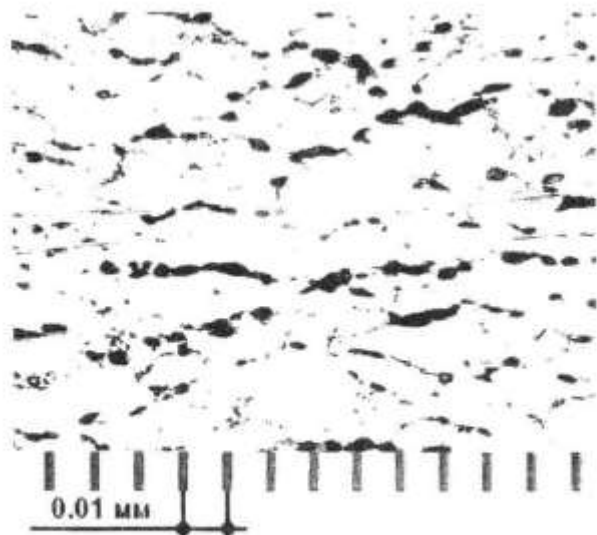


Фото 1. X500 Микропоры на шлифе (сталь 12Х1МФ)

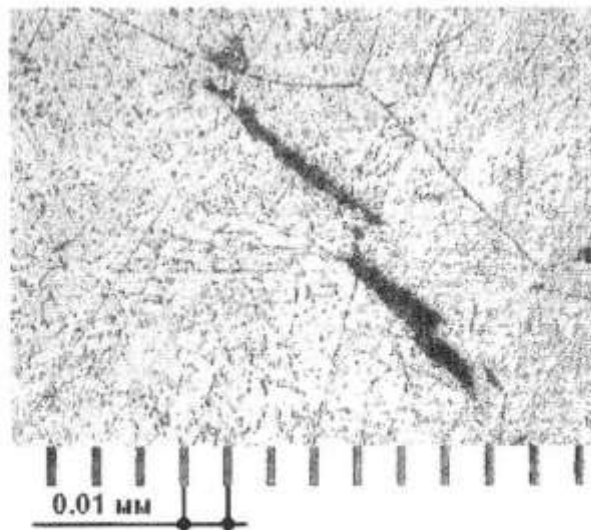


Фото 2. X500 Термические трещины в стали 25Х1М1Ф

При этом нужно ещё иметь в виду, что микропоры, размеры которых меньше разрешающей способности объектива микроскопа, не учитываются при расчёте объёма, занимаемого микропорами.

Для изучения указанных особенностей металла с микропорами ползучести были выбраны следующие образцы:

№ 1 – выпуклая часть гнутого участка трубы  $\varnothing 273 \times 32$  мм из стали 12Х1МФ, в котором после эксплуатации 157000 часов при параметрах среды (пара):  $T = 553$  °С,  $P = 138$  атм. была обнаружена макротрещина;

№ 2 – выпуклая часть гнутой трубы  $\varnothing 219 \times 24$  мм из стали 12Х1МФ после испытания на стенде при параметрах пара  $T = 600$  °С,  $P = 200$  атм. Труба демонтирована после 16700 часов, когда появились микротрещины<sup>1</sup>;

№ 3 – труба  $\varnothing 273 \times 32$  мм из стали 20, по ошибке сваренная при ремонте в паропровод из стали 12Х1МФ, эксплуатирующийся при  $T = 555$  °С и  $P = 140$  атм. Эта труба разорвалась после 7000 часов эксплуатации.

№№ 4 и 5 – образцы из стали 20 и стали 12Х1МФ в состоянии поставки, т.е. не эксплуатировавшиеся в условиях ползучести.

Образцы 2 и 3 были выбраны потому, что микропоры на шлифах этих образцов в 2-3 раза больше, чем микропоры в металле при стандартных параметрах эксплуатации (температуре и давлении).

Всем образцам придавалась форма куба со стороной 15 мм. Образцы взвешивались на аналитических весах, размеры определялись с помощью микрометра.

Рассчитывалось изменение плотности металла образцов №№ 1, 2 и 3 из сталей 20 и 12Х1МФ относительно образцов соответствующей стали в состоянии поставки. Результаты приведены в таблице.

Для выявления микропор шлифы 10-кратно полировались и травились 4%-ным раствором азотной кислоты в спирте, окончательное травление проводилось в 2%-ном растворе пикриновой кислоты в спирте. Полировка производилась алмазной пастой.

Шлифы готовились на всех шести плоскостях каждого образца – плоскости параллельные поверхности трубы, плоскости, проходящие через ось трубы, и плоскости перпендикулярные оси трубы. С помощью микроскопа при увеличении в 1000 раз подсчитывалось количество микропор на единицу площади шлифа и средние размеры микропор.

<sup>1</sup> Автор благодарит А.В.Федосеенко за этот образец металла.

Изменение плотности металла образцов №№ 1, 2 и 3 из сталей 20 и 12Х1МФ относительно образцов соответствующей стали в состоянии поставки

№ образца	Материал (сталь)	$\delta\rho$ , % по результатам взвешивания	$\delta V$ , % по результатам подсчёта	$\delta V$ , % по программе SIAMS
1	12Х1МФ (после эксплуатации)	1,2	5,7	7,1 – 7,9
2	12Х1МФ (стендовые испытания)	1,4	6,8	7,0 – 7,7
3	Сталь 20 (после разрушения)	1,6	7,1	8,1 – 8,8

Для каждой плоскости рассчитывалась доля поверхности, которую занимают микропоры, полученные значения для противоположных плоскостей куба усреднялись.

При условии равномерного распределения микропор по объёму образца можно воспользоваться принципом Кавальери<sup>2</sup> и утверждать, что доля объёма, которую занимают микропоры, равна их доле на поверхности шлифа.

Изменение плотности, равное объёму микропор ( $\delta V$ , %) в единице объёма металла, рассчитанное «вручную» и по программе SIAMS, приведено в таблице. Видно, что результаты расчёта доли объёма занимаемой микропорами, проведённый в предположении, что микропоры ползучести – это пустоты, в 4-5 раз превышают изменение плотности, измеренное путём взвешивания.

Это несоответствие вполне могло бы быть объяснено, если считать, что микропоры ползучести не пусты, а чем-то заполнены.

При исследовании образцов методами рентгеноструктурного анализа, нейтронографии и методом комбинационного рассеяния никаких новых фаз в образцах не обнаружено.

В микропорах образца 3 из стали 20 методом комбинационного рассеяния обнаружены включения графита. Массовая доля углерода в исследуемых сталях невелика (0,15 – 0,2 %) и даже, если весь углерод из карбидов и твёрдого раствора перейдёт в графит его будет недостаточно для заполнения всего объёма микропор.

Дальнейшие исследования были проведены с помощью микроскопа ММПУ [3].

Этот микроскоп позволяет наблюдать один и тот же участок шлифа в процессе его подготовки.

На трубах, из которых были вырезаны образцы 1, 2, 3 готовились шлифы, и один и тот же участок на каждом шлифе просматривался и фотографировался после каждой полировки и каждого травления. На фото 3 – 12 представлены результаты, полученные на металле трубы  $\varnothing 219 \times 24$  (образец № 2).

На фото 3 видно, что изначально, до травления шлифа в местах, где в будущем (после многократного повторения операции «полировка + травление») появятся «микропоры», имеются рыхлые участки металла.

По мере подготовки шлифа эти рыхлоты растворяются, и на их месте образуются микропоры (фото 9, 10). Если сравнить фото 9 и 11, фото 10 и 12, то видно, что после того, как рыхлота вытравилась и на шлифе образовалась микропора, дальнейшее повторение операций полировки и травления не увеличивает размеры микропоры. Это вполне объяснимо: кислота при травлении шлифа растворяет металл в этих рыхлотах значительно

<sup>2</sup> Принцип Кавальери – предложение, состоящее в следующем: если при пересечении двух тел любой плоскостью, параллельной некоторой другой плоскости, получаемые в сечении площади равны, то и объёмы этих тел равны. Аналогичное предложение имеет место и для плоских фигур: если при пересечении двух плоских фигур любой прямой, параллельной некоторой другой прямой, длины хорд в получаемом сечении равны, то и площади этих плоских фигур равны. Принцип Кавальери является теоремой, т. е. данное предложение в геометрии имеет доказательство [2].

быстрее, чем окружающий их плотный металл. И после того, как участки металла с развитой поверхностью в микрорыхлотах растворены кислотой, дальнейший процесс травления окружающего более плотного металла тормозится.

Аналогичные результаты были получены и на образцах 1, 3.

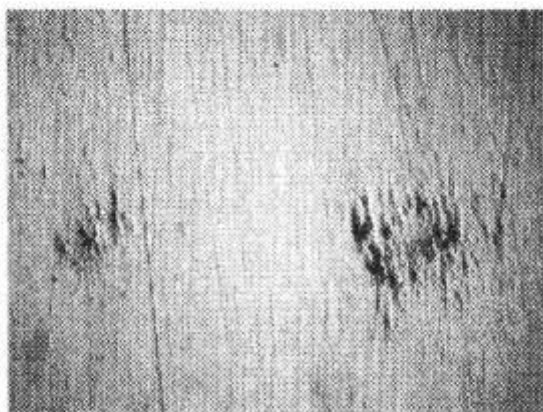


Фото 3. X1000 Шлиф после первой полировки

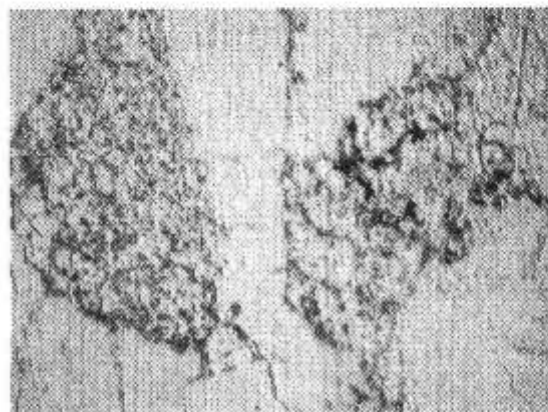


Фото 4. X1000 Тот же участок, что и на фото 3, после первого травления

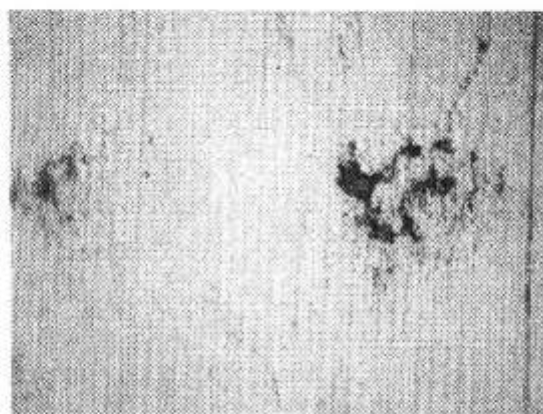


Фото 5. X1000 Двукратное повторение цикла «полировка + травление»+полировка

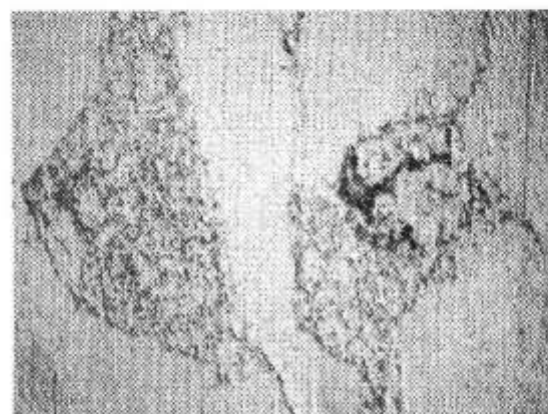


Фото 6. X1000 Трёхкратное повторение цикла «полировка + травление»

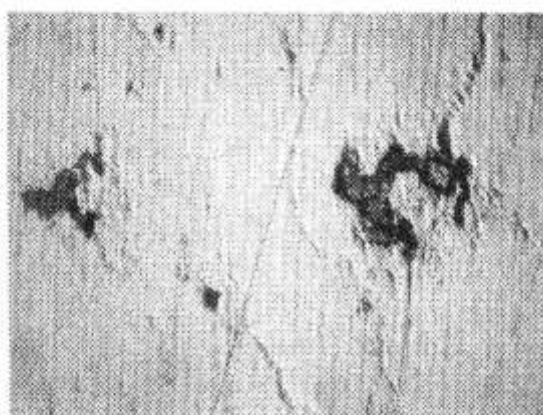


Фото 7. X1000 Четырёхкратное повторение цикла «полировка + травление»+полировка

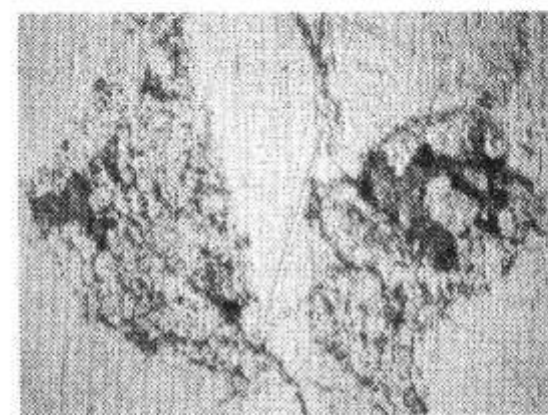


Фото 8. X1000 Пятикратное повторение цикла «полировка +травление»

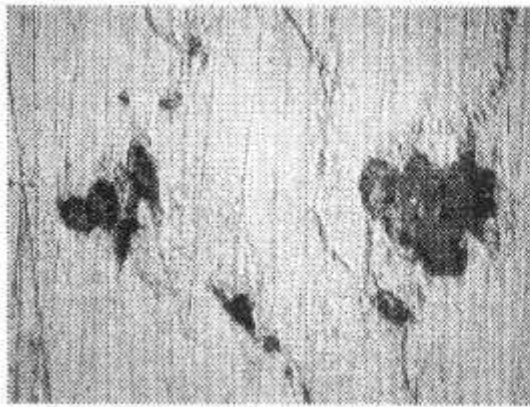


Фото 9 X1000 Семикратное повторение цикла «полировка + травление» + полировка

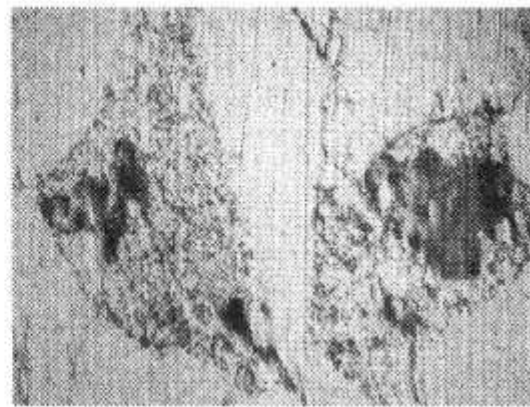


Фото 10. X1000 Восьмикратное повторение цикла «полировка + травление»



Фото 11 X1000 Одиннадцатикратное повторение цикла «полировка + травление» + полировка

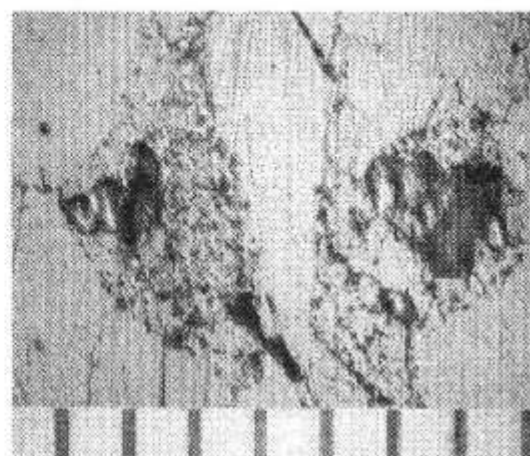


Фото 12. X1000 Двенадцатикратное повторение цикла «полировка + травление»

Если воспользоваться результатами представленными в таблице, то можно утверждать, что собственно, пустота в рыхлотах занимает ~ 20-30%, остальная доля (70-80%) приходится на металлическую составляющую.

Таким образом, основываясь на представленных результатах исследований, можно сделать вывод: в стали на последней – ускоренной стадии ползучести по границам зёрен образуются не микропоры (округлые и полые) и клиновидные микротрещины, как на данный момент принято считать, а компактные микрорыхлоты. Металлическая составляющая в микрорыхлотах занимает ~ 70 - 80 % от их объёма.

Микрорыхлоты превращаются в микропоры и клиновидные микротрещины на металлографическом шлифе в результате растравливания при многократном повторении операции «полировка + травление» – традиционно применяемой методики подготовки металлографического шлифа для выявления микропор ползучести.

Образование на последней стадии ползучести не микропор, а компактных микрорыхлот позволяет объяснить:

а) специфичность методики подготовки металлографических шлифов при исследовании металла, работающего в условиях ползучести – необходимость многократного повторения операции «полировка + травление»;

б) различные значения плотности металла на последней – ускоренной стадии ползучести, полученные методом взвешивания и расчетным методом;

в) нелинейную зависимость остаточной деформации от времени на последней – ускоренной стадии ползучести;

г) пропорциональное увеличению остаточной деформации уменьшение (до 2-3%) скорости ультразвуковых волн в металле, наблюдающееся на последней – ускоренной стадии ползучести [4].

### Библиографический список

1. Долговечность металла в условиях ползучести / В. И. Куманин [и др.]. М.: Metallurgia, 1988. 220 с.
2. Толковый словарь математических терминов, М.: Просвещение, 1965. 950 с.
3. Пермикин В.С. Микроскоп металлографический портативный упрощенный. Методы и технические средства оперативной оценки структурно-механического состояния металла элементов, конструкций и машин / В.С. Пермикин // Всероссийская научно – техн. конф.: сб. докл. М.: МЭИ(ТУ), 2002. С. 169-171.
4. Пермикин В.С. Датчики и устройства для контроля состояния металла, эксплуатирующегося в условиях ползучести, по изменению скорости ультразвуковых волн / В.С. Пермикин // Сб. трудов XV сессии Российского акустического общества. Т.2. 2004. С. 82-86.

**В.В. Привалова, В.П. Федотов, Л.Ф. Спевак**  
Екатеринбург, Институт машиноведения УрО  
РАН

### МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТРЁХМЕРНЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

*Предложена модификация метода граничных элементов, в которой изначально на уровне алгоритма заложена технология распараллеливания. Основное отличие от классического метода заключается в том, что в предлагаемом подходе точка влияния берется произвольной, а фиксируется наиболее удобный базовый элемент границы, по которому один раз производится аналитическое интегрирование компонентов функций влияния, результатом которого являются функции от координат произвольной точки влияния. Получены формулы аналитического интегрирования компонентов функций влияния по произвольному треугольному элементу. Формулы являются одной из ключевых частей численно-аналитического алгоритма параллельного действия для решения плоских задач математической физики.*

Рассмотрим объёмную упругую область произвольной формы, на границе которой заданы некоторые нагрузки или перемещения. Задачей является нахождение вектора перемещений  $u_i$ , тензора деформаций  $\epsilon_{ij}$  и тензора напряжений  $\sigma_{ij}$ , которые удовлетворяют в области  $V$  полной системе уравнений теории упругости

$$\sigma_{ij,j} = 0, \quad (1)$$

$$\epsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2, \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = 2\mu\epsilon_{ij} + \frac{2\mu\nu}{1-2\nu}\epsilon_{kk}\delta_{ij}, \quad (3)$$

и заданным граничным условиям

$$\text{на поверхности } S_f: \sigma_{ij}n_j = f_i^*, \quad (4)$$

$$\text{на поверхности } S_u: u_i = u_i^*.$$

Здесь  $\mu$  – модуль упругости при сдвиге,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $n_i$  – вектор нормали к поверхности.