УДК. 621.052.08

А.Н.Смирнов

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛА ПОВРЕЖДЕННОГО ГНУТОГО УЧАСТКА ПАРОПРОВОДА

В тепловой энергетике наибольшую опасность с точки зрения надежности представляют гибы (гнутые участки труб) паропроводных и пароперепускных труб в которых, несмотря на одинаковую температуру эксплуатации с прямыми участками, скорость накопления микроповрежденности значительно выше, что можно объяснить повышенным уровнем действующих напряжений. Здесь кроме напряжений от внутреннего давления суммируются напряжения, вызванные формой сечения гиба, компенсационные напряжения, напряжения от весовых нагрузок и т.д., что подтверждается прочностными расчетами. Отсюда аварийные разрушения гибов не редкие явления.

В настоящей работе исследован разрушенный гиб паропровода после 116 тыс. часов эксплуатации. Материал – сталь 12Х1МФ. Номинальные размеры паропровода: диаметр – 273 мм, толщина стенки – 32 мм.

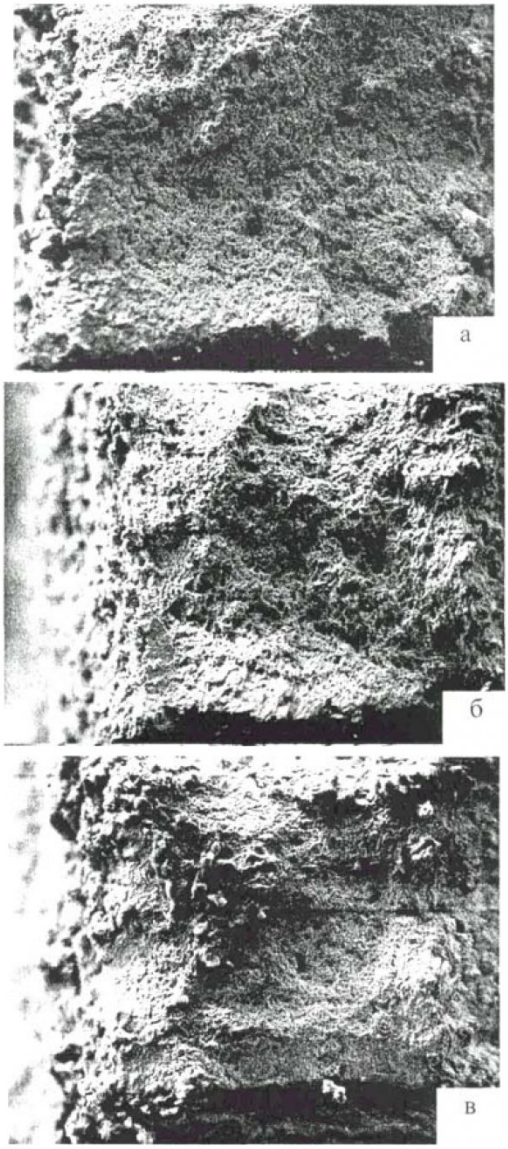

Рис.1. Изображение в сканирующем электронном микроскопе излома образцов стали 12Х1МФ, вырезанных из различных зон «гиба» трубы: а – внутренняя, б – средняя, в – внешняя зоны. ×250

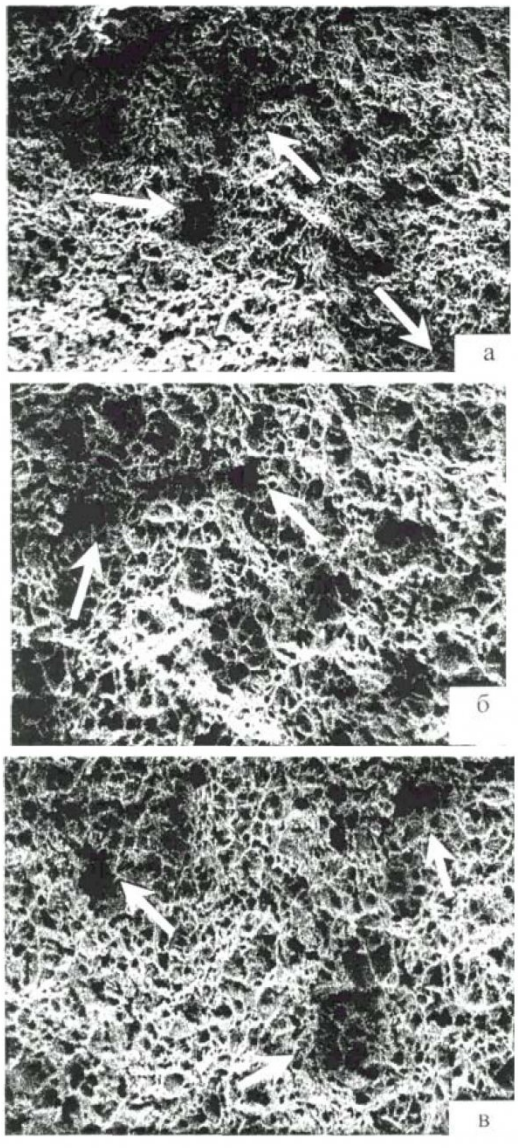

Рис.2 Чашечный вязкий излом внутренней зоны «гиба» трубы: а – ×500; б, в – вблизи тех же мест при ×1000. Стрелками указаны более грубый излом и микропоры на границах зёрен

Таблица

Данные о размере чашечек излома

Зона	Средний размер чашечек излома, мкм	Наиболее вероятный размер чашечек излома, мкм
Внутренняя	2,02	1,50
Средняя	2,30	1,50
внешняя	3,20	1,50

Паропровод эксплуатировался при температуре 550 ^{0}С и давлении 14,0 МПа. Исследование проведено методами электронной и растровой микроскопии.

Изучали поверхности разрыва и металл рядом с изломом в трех зонах (наружная, средняя, внутренняя), а также проводили механические испытания и анализировали механические характеристики металла. Сквозная трещина расположена с растянутой стороны гиба и имеет ширину раскрытия – 53 мм, длина трещины достигает – 950 мм.

Картина пластичного излома. При малом увеличении во всех трех зонах имеет место волокнистый излом. В соответствии с классификацией, данной в известном справочнике [1], он называется волокнистым изломом имеющим грубонеоднородное строение. Структура излома стали при небольших увеличениях, наблюдаемая в сканирующем электронном микроскопе, представлена на рис. 1. На этих картинах дано практически полное поперечное сечение шейки разорванного образца. Видно, что большого качественного различия между картиной излома различных зон трубы нет, однако излом несколько грубее на ее поверхности, чем внутри трубы. Доля вязкой составляющей близка к 100%. Картина излома в исследуемой стали при большем увеличении представлена на рис.2 - 4. Хорошо видна вязкая структура излома. Чашечки - мелкие по телу зерен и несколько крупнее по границам зерен. Наличие мелких чашечек в теле зерен и крупных чашечек на их границах свидетельствует о достаточно высокой вязкости материала, которая несколько уменьшается на границах зерен, где присутствуют мелкие поры. Они хорошо видны во внутренней зоне материала на рис.2, а также в средней зоне (рис.3). В средней зоне на фоне более грубых чашечек и зародышевых пор на границах зерен присутствуют зародышевые микротрещины, длина которых достигает 20 мкм. Во внешнем сечении к уже наблюдавшимся особенностям на границах зерен таким, как более грубые чашечки, поры и микротрещины, добавляются частицы микронного размера (рис.4). Эти частицы либо присутствовали на границах зерен со времени образования этой стали (литье, кристаллизация), либо сформировались в процессе эксплуатации стали.

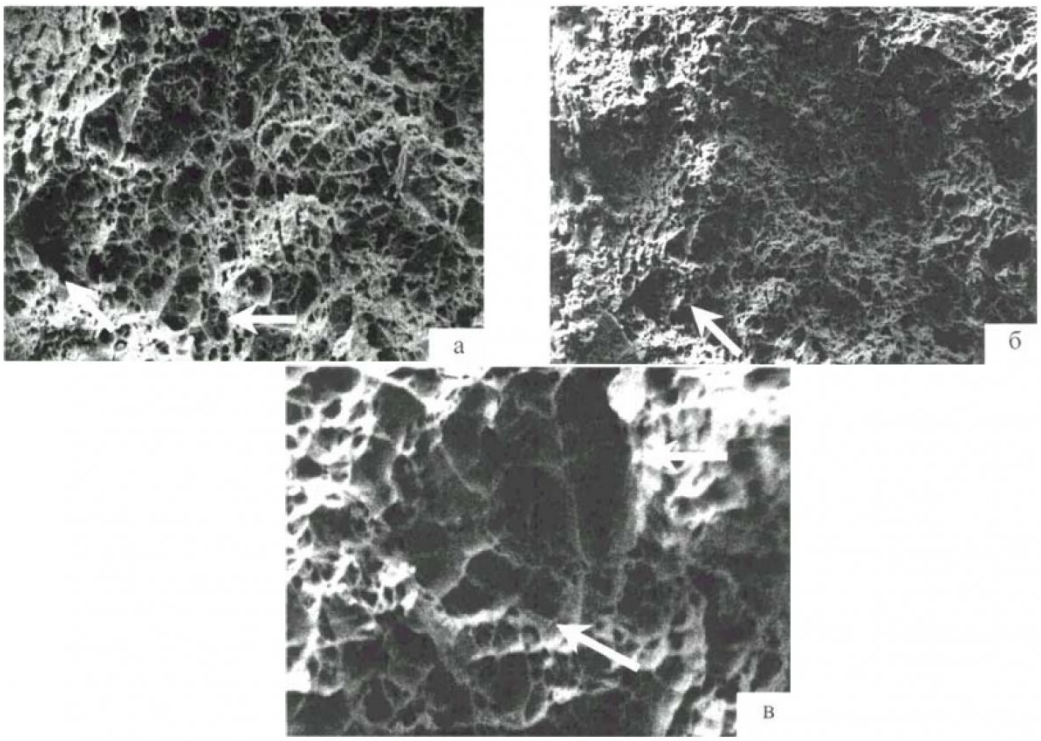

Рис.3 Картина излома образцов, вырезанных из средней зоны. Испытания на растяжение. Шейка образца: а – ×500; б – ×l000; в – ×2000. Стрелками указаны микропоры и зародышевые микротрещины на границах зёрен

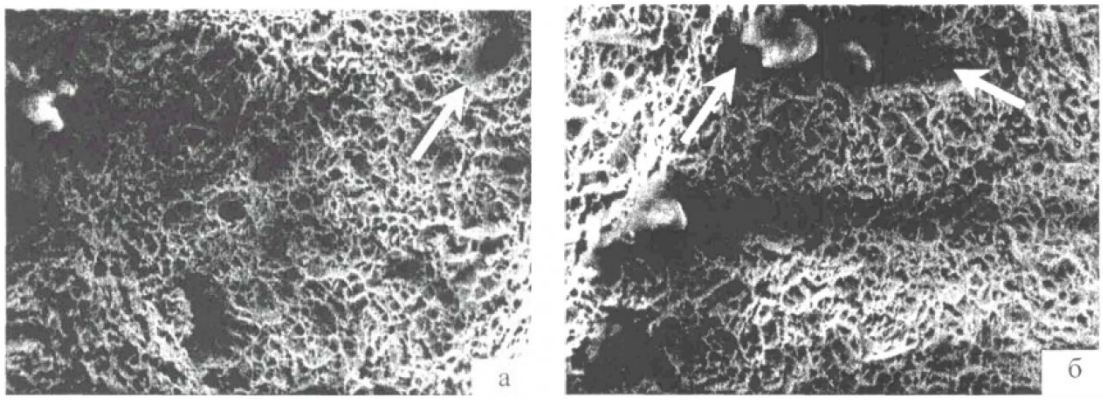

Рис.4. Картина излома образцов, вырезанных из внешней зоны при ×1000. Стрелками указаны микропоры и частицы на границах зёрен

Скорее всего, это карбидные частицы, в основном $(Fe, Cr)_{23}C_6$. Спектр размеров частиц на границах представлен на рис.5. Крупные частицы, изображенные на рис.4, не вписываются в этот спектр размеров. Поэтому нельзя исключать, что излом прошел по первичным карбидам или частицам сульфидов, которые при анализе тонкой структуры в фольгах не наблюдались. Нельзя также исключить, что частицы могли возникнуть в процессе водородного охрупчивания стали. По крайней мере, вид этих частиц напоминает картину водородного охрупчивания [2,3].

Внутризеренный излом по структуре мельче во внутренней и средней зонах и грубее в поверхностной зоне, что видно из таблицы, в которой представлен размер чашечек излома.

Среднее значение чашечек излома, включающее и чашечки излома по границам зерен, от внутренней зоны к внешней возрастает. Можно констатировать, что тело зерен более пластично внутри и менее пластично во внешнем слое трубы. Подробно картина распределения чашечек излома по размерам приведена в виде гистограмм на рис.6. Структура гистограмм такова, что на ней хорошо просматриваются размерные эффекты, связанные с разрушением по телу зерен, по их границам и параметры развивающихся микротрещин, также в основном локализованных на границах зерен. Интервал размеров чашечек излома – 0,5...4 мкм принадлежит телу зерен, 4...7 мкм – границам зерен, 8...15 мкм – зародышевым микротрещинам. Последний интервал принадлежит частицам, наблюдаемым на границах зерен при изломе. Частицы карбидов $(Fe, Cr)_{23}C_6$ по своим размерам таковы, что они могут служить лишь зародышами чашечек излома на границах зерен.

Чашечки излома на границах зерен намного крупнее, чем в теле зерен (в 5 раз). Обратим внимание здесь на правый "хвост" распределений на рис.6. Благодаря более крупному размеру чашечек излома на границах зерен хорошо просматриваются контуры границ (см. рис.2 - 4). Можно констатировать, что границы зерен менее пластичны, чем тело зерен во всех зонах трубы. Скорее всего, это связано с наличием микропор и частиц на границах зерен. Микропоры по границам зерен, судя по картинам излома, присутствуют во всех трех зонах. Размер микропор соизмерим с размером чашечек. Во внешней зоне картина излома на границах зерен сложнее, там присутствуют крупные частицы. Чашечки излома несомненно характеризуют пластическое развитие разрушения, заключающееся в образовании микропор с последующим их слиянием путем разрыва перемычек между порами [4] и иногда особенно на границах зерен, образовании направленных разрывов, являющихся фактически, микротрещинами. Хотя карбидные частицы, расположенные в теле зерен, упрочняют материал и тем самым могут способствовать уменьшению его пластичности, можно определенно утверждать, что процесс вязкого разрушения с ними не связан. Среднее расстояние между карбидными частицами – 0,30...0,35 мкм, что значительно меньше размеров чашечек излома. Иными словами, не редко реализуемый в дисперсно-упрочненных материалах чашечный излом такого типа, когда каждая чашечка излома своим зародышеобразованием обязана дисперсной частице, здесь не реализуется. Это обусловлено небольшой объемной долей частиц в исследуемой стали. В то же время, несомненно, что размер чашечек пластичного излома тесно связан с образовавшейся в шейке к моменту разрушения образца дислокационной структурой. Структура эта обычно при степенях деформации 10...20% – ячеистая и фрагментированная [4]. Известно, что микропоры могут зарождаться на границах ячеек и фрагментов. При этих деформациях размер ячеек лежит в пределах 0,7...1,5 мкм. Известно, что длина зоны сдвига в дислокационной ячеистой и фрагментированной субструктурах кратна размеру ячеек или фрагментов [5]. В данном случае, по-видимому, границы каждого третьего – четвертого фрагмента или ячейки служат границами чашечек излома. Известна

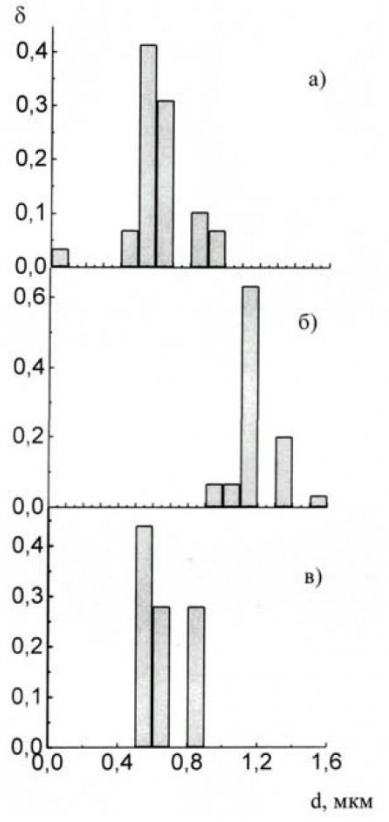

Рис.5 Распределение по размерам частиц карбидов (Fe, Cr)$_{23}$C$_6$, расположенных по границам зерен: а) внутренняя зона; б) средняя зона; в) внешняя зона

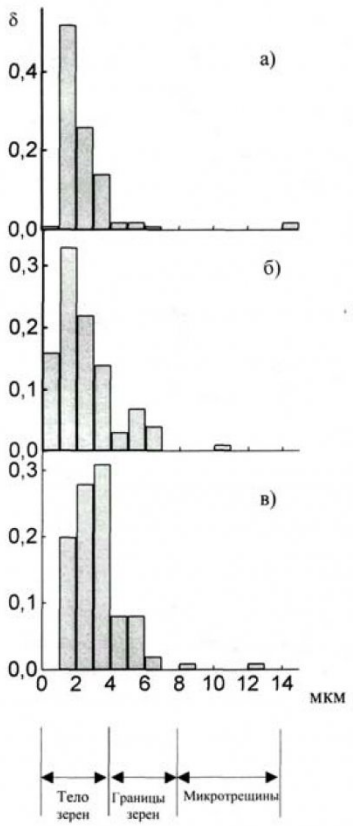

Рис. 6. Распределение чашечек излома по размерам в трех зонах трубы:а) внутренняя; б) средняя; в) внешняя

концепция о критической фрагментированной структуре деформированных металлов [6 - 8]. Она свидетельствует, что трещины пластического излома развиваются по границам фрагментов.

Следует также отметить, что изучаемая сталь находится в достаточно пластичном состоянии. Об этом свидетельствует малый размер чашечек излома (таблица). В углеродистых сталях средний размер чашечек излома находится в интервале размеров 3,5...6 мкм [7]. Излом в теле зерен исследуемой стали дает размер чашечек излома, лежащим в этих пределах.

Карбидные частицы на границах зерен и структура излома. На рис. 2 - 4 качественно показано возникновение особенностей разрушения на границах зерен. Это более грубый излом, наличие пор, продолговатых микротрещин и частиц. При измерении распределения чашечек излома область границ зерен также выделена количественно (рис.6). Наличие карбидных частиц на границах зерен коррелирует с этой картиной. Отдельные частицы карбида (Fe, Cr)$_{23}$C$_6$, вытянутые в длину на 1...1,5 мкм, располагаются по границам зерен, иногда по одиночке, иногда группами (рис. 7). Функция распределения длин этих частиц дана на рис. 5. Интервал их размеров простирается от 0,5 мкм до 1,5 мкм. Очевидно, что отдельные длинные частицы на границах зерен не могут обеспечить формирование картины излома на них. Следует учесть, что после

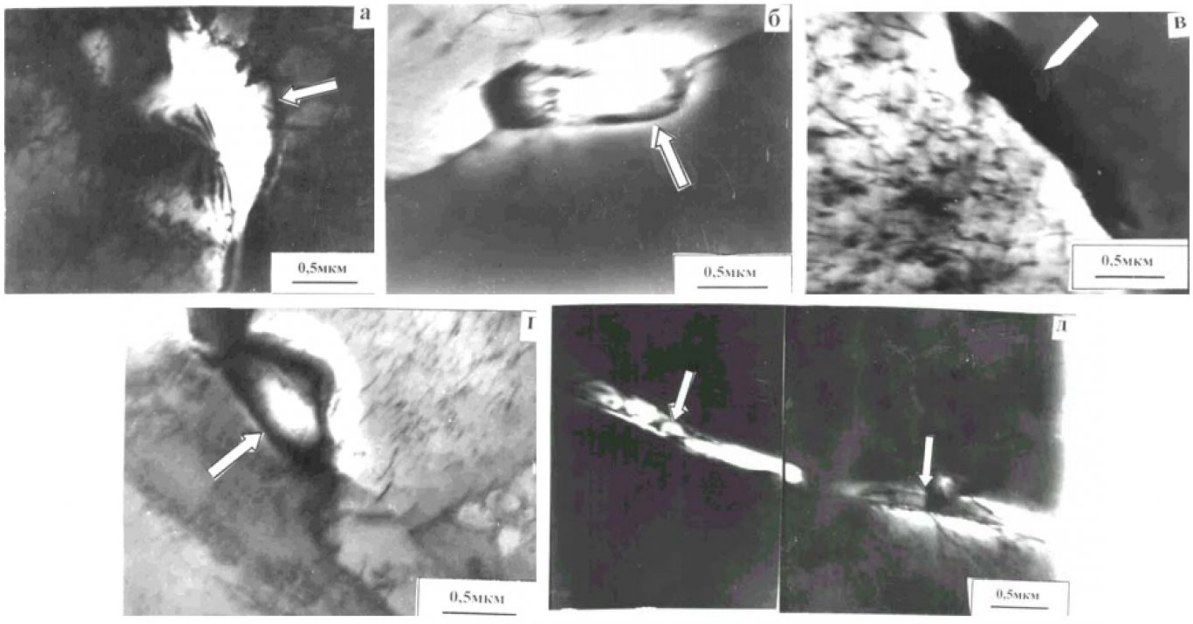

Рис.7. Карбидные частицы по границам зерен: а-г) отдельные частицы; д) группы частиц.

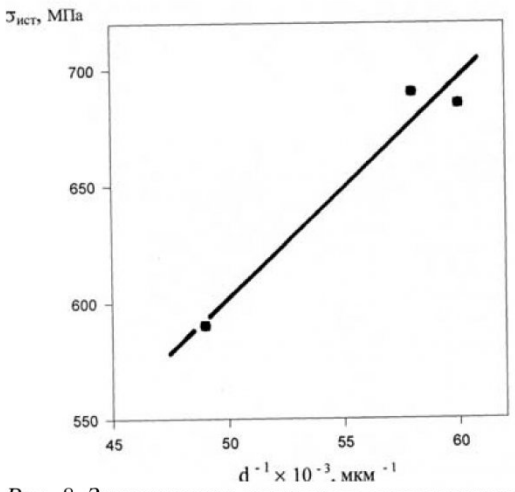

Рис. 8. Зависимость истинного напряжения разрушения $\sigma_{ист}$ от размера зерен d

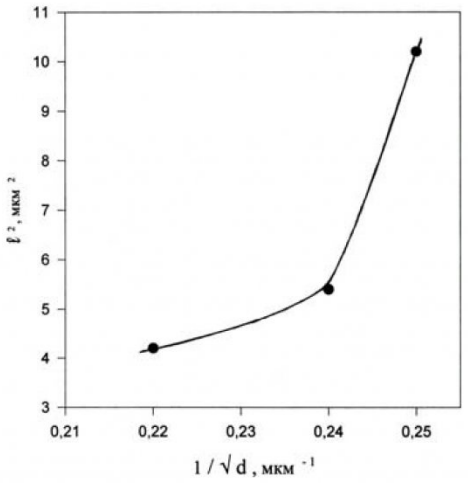

Рис. 9. Зависимость размеров чашечек излома l от размера зёрен d

длительной эксплуатации на границах зерен сформированы цепочки различных карбидов, преимущественно это $(Fe, Cr)_{23}C_6$. Когда разрушение развивается по таким участкам, должны формироваться картины излома, показанные на рис. 2 - 4 качественно и на рис. 6 – количественно. Можно не сомневаться в важной роли границ зерен при их нынешней структуре в зарождении и развитии разрушения исследуемой стали. Это подтверждается данными, приведенными на рис. 8,9.

Известно, что в случае межзеренного разрушения напряжение разрушения $\sigma_{ист}$ связано с размером зерна следующим образом [4]:

$$\sigma_{ист} \approx \tilde{k} d^{-1} \qquad (1)$$

где $\tilde{k}$ – постоянная, учитывающая состояние границ зерен, наличие на них примесей, частиц, напряжений и т.п. Из рис.8 видно, что это соотношение выполняется. Работа разрушения A подчиняется зависимости Холла – Петча [4]:

$$A \sim N d^{-1/2} \qquad (2)$$

где N – некоторая постоянная. Работа разрушения определяется двумя факторами: 1) площадью поверхности разрушения, умноженной на ее энергию, и 2) предшествующей разрушению работой деформации. Если пренебречь анизотропией поверхности разрушения, то основная часть работы разрушения пропорциональна площади поверхности разрушения, которая, в свою очередь, пропорциональна размеру (l) чашечек излома. На рис. 9 изображена зависимость «l^2-$d^{-1/2}$». Хотя линейная зависимость не выполняется между этими величинами, влияние размера зерна на характеристики разрушения, несомненно. Как рис.9, так и рис. 8, подтверждают важную роль границ зерен в развитии разрушения исследуемой стали.

Связь характеристик пластичности образца в целом и размера чашечек излома. Развитое за период эксплуатации упрочнение исследуемой стали тесно связано с параметрами излома. Установленная линейная связь между $\langle l \rangle$ и σ_T указывает на тот факт, что исходное упрочнение материала во многом определяет его характер разрушения.

Любопытно, что такая характеристика, как равномерное удлинение материала ε_P не имеет логичной связи с размером чашечек излома (рис.10). Действительно ε_P скорее является характеристикой стадийности пластической деформации. На диаграммах растяжения $\sigma=f(\varepsilon)$ после предела текучести присутствует стадия с линейным упрочнением – стадия II и стадия с параболическим упрочнением – стадия III. Это типичная картина стадийности для поликристаллических материалов [9]. Достижение деформации ε_P фактически означает появление новой стадии деформации [10]. Известно, что для ОЦК-стали ε_P тесно связана с условием Консидера [7]:

$$\theta = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \qquad (3)$$

где θ – коэффициент деформационного упрочнения, σ – действующее напряжение. Поэтому такое поведение ε_P не удивительно. Напротив, реальные характеристики максимальной деформации до разрушения – истинное удлинение $\varepsilon_{ист}$, учи-

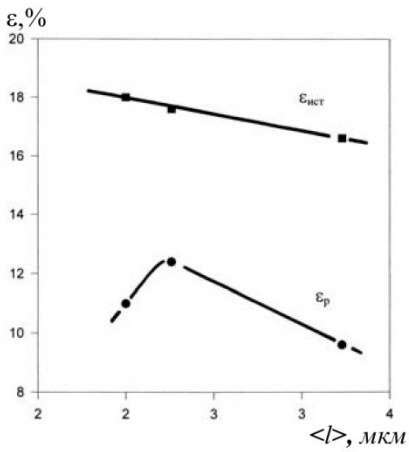

Рис.10. Зависимость равномерного (ε_P) и истинного ($\varepsilon_{ист}$) удлинений от среднего размера ($\langle l \rangle$) чашечек излома

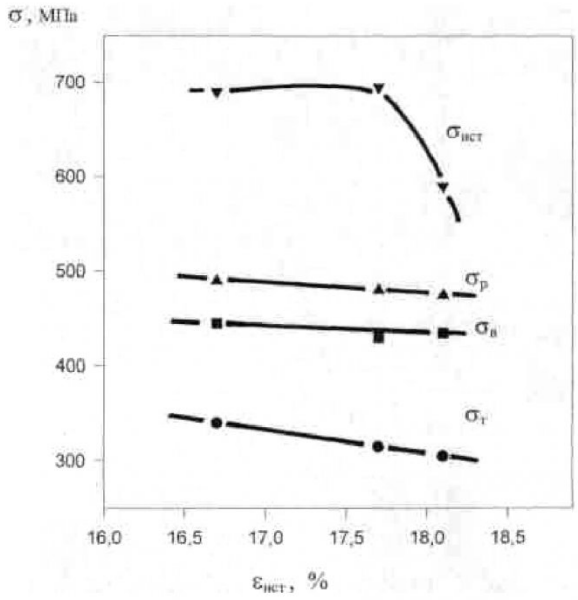

Рис. 11. Зависимости предела текучести (σ_T) и напряжений, характеризующих разрушение (σ_P, σ_B, $\sigma_{ист}$), от истинного удлинения $\varepsilon_{ист}$ в испытаниях на растяжение

тывающее равномерное и сосредоточенное удлинения и относительное сужение Ψ закономерно убывают с ростом размера чашечек (рис.10). При этом зависимость $\varepsilon_{ист}$ от $<l>$ оказывается линейной.

Линейной является также зависимость σ_T от истинного удлинения $\varepsilon_{ист}$ (рис.11), причем, чем выше σ_T, тем ниже пластичность. Линейная зависимость сохраняется и для силовых характеристик, связанных с разрушением. Временное сопротивление σ_B и напряжение завершения равномерного удлинения σ_P также линейно убывают с увеличением истинного удлинения $\varepsilon_{ист}$ (рис.11). Поведение истинного разрушающего напряжения $\sigma_{ист}$ столь однозначно, тем не менее, к более пластичной внутренней зоне напряжение разрушения убывает. Таким образом, можно констатировать, что основные параметры разрушения стали 12Х1МФ в состоянии после длительной эксплуатации логично связаны между собой. Это, во-первых, свидетельствует о надежном определении этих параметров и, во-вторых, подтверждает, что к настоящему моменту сталь при комнатной температуре находится в вязком удовлетворительном состоянии и разрушение гиба вызвано повышенным уровнем действующих эксплуатационных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Герасимова Л.П., Ежов А.А., Маресев М.И.* Изломы конструкционных сталей. Справочник. М.: Металлургия, 1987. – 272 с.

2. *Колачев Б.А.* Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985. –217с.

3. *Мороз Л.С., Чечулин Б.Б.* Водородная хрупкость металлов, 1967. – 255 с.

4. *Трефилов В.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П. и др.* Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов. Киев: Наукова думка, 1989. – 256 с.

5. *Конева Н.А., Козлов Э.В.* Закономерности субструктурного упрочнения // Изв. Вузов. Физика. – 1991. – №3. – С. 56-70.

6. *Лихачев В.А.* Физико-механические модели разрушения // Модели механики сплошной среды. – Новосибирск: СО АН СССР ИТПМ, 1983. – С. 255-277.

7. *Рыбин В.В.* Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. – 224 с.

8. *Конева Н.А., Тришкина Л.И., Козлов Э.В.* Эволюция субструктуры и зарождение разрушения // Современные вопросы физики и механики материалов. Материалы XXXII семинара "Актуальные проблемы прочности". Санкт-Петербург: НИИ НМ СПбГУ, 1997. – С. 322-332.

9. *Конева Н.А., Козлов Э.В.* Физическая природа стадийности пластической деформации // Изв. Вузов. Физика. – 1990. – №2. – С. 89-106.

10. *Козлов Э.В., Попова Н.А., Григорьева Н.А. и др.* Стадии пластической деформации, эволюция субструктуры и картина скольжения в сплавах с дисперсным упрочнением // Изв. Вузов. Физика. – 1991. – №3. – С. 112-128.

Автор статьи:

Смирнов
Александр Николаевич
– канд. тех. наук, доц. каф. технологии металлов