

Повреждаемость оболочковых конструкций с течением времени и оценка остаточного ресурса их работы

К.Д. Басиев, В.А. Гулуев, М.Ю. Кодзаев

Республика Северная Осетия-Алания является регионом со значительным промышленным потенциалом. Основу экономики республики в советское время составляли крупные промышленные предприятия преимущественно оборонного, металлургического, химического и машиностроительного профиля. Поэтому для РСО-А характерны все проблемы, типичные для всех промышленных регионов России. Это проблемы экологии, а также морального и физического износа основных фондов. В настоящее время на территории РСО-А находится значительное число промышленных предприятий, эксплуатирующих критические с точки зрения аварийной опасности объекты. Переход к рыночной экономике значительно усугубил ситуацию на промышленных предприятиях, так как требующие больших финансовых вложений мероприятия по обеспечению безопасности отошли на второй план. В условиях старения металлических конструкций и объектов требуется их обновление с увеличением объемов капитального ремонта или реконструкции. Но в последнее время наблюдается обратное: заметно снизились объемы капитального ремонта производственного оборудования и сооружений. Вследствие этого в последние годы значительно возросло количество аварий и отказов на производственных объектах. Особую тревогу вызывает резко возросшая аварийность на таких объектах, как магистральные трубопроводы, резервуары, реакторы, котельные, насосные и компрессорные станции.

Большая часть этих аварий происходит при соблюдении технологических норм эксплуатации, в силу деградации металла, а также стресс-



*Д.т.н. профессор
К.Д. Басиев*



*Аспирант СКГТУ
В.А. Гулуев*



*Аспирант СКГТУ
М.Ю. Кодзаев*

коррозии. Оценка фактической деградации металла и определение его остаточного ресурса существующими методами практически невозможна. При определенных условиях невыявляемый визуальным осмотром дефект может привести к лавинному разрушению. К категории особо опасных объектов относятся прежде всего оболочковые конструкции, такие как резервуары, трубопроводы, манифольды, различного рода реакторы, теплообменники, абсорбционные и ректификационные колонны и подобное им оборудование. Значительная часть этого оборудования морально устарела и физически изношена. Однако в силу производственной целесообразности оно продолжает эксплуатироваться, и объективно оценить степень его аварийной опасности по причине деградации металла имеющимися на территории РСО-А средствами не представляется возможным.

Особую тревогу вызывают участвовавшие в последнее время аварии по причине коррозионного растрескивания под напряжением (КРН), или стресс-коррозии. Впервые упоминание о КРН появилось в начале 60-х годов, это явление на газопроводах высокого давления зарегистрировано во многих странах: США, Австралии, Канаде и др.

Внешний признак КРН – группы или колонии трещин вблизи очагов разрушений, ориентированных преимущественно вдоль оси трубы. Трещины могут проникать на различную глубину. Разрушение конструкции происходит, когда трещины или группа трещин достигают критического размера. Этому виду повреждений подвержены энергонагруженные оболочковые конструкции, такие как магистральные газопроводы, резервуары большой емкости и реакторы высокого давления, а также любые металлические конструкции, обладающие большим запасом упругой энергии. Стресс-коррозии подвержены прежде всего стали и сплавы нового поколения, с повышенными прочностными характеристиками.

Выявление стресс-коррозионных дефектов и предупреждение аварий по причине стресс-коррозии является задачей государственной важности, к решению которой привлечены ведущие научные кадры в области механики, металловедения, электрохимии, микробиологии. Наиболее опасно это явление на магистральных газопроводах и реакторах высокого давления. Такое внимание к проблеме стресс-коррозии вызвано тем, что раскрытие трещины происходит практически мгновенно, вызывая лавинное разрушение и сопровождается, как правило, масштабным взрывом и возгоранием, а в случае химических производств еще и выбросом токсических веществ.

Механизм стресс-коррозионного повреждения сложен и учитывает влияние многих факторов, таких как распределение напряжений, накопленная упругая энергия, воздействие среды, деятельность сульфатовосстанавливающих бактерий, электрохимические и структурно-деградационные процессы в поверхностном слое.

Ввиду сложности определения взаимозависимости различных факторов, влияющих на работоспособность конструкций и элементов магистрального трубопровода, возникла потребность в реализации системного подхода к данной проблеме. С этой точки зрения не ретроспективные данные (даже в больших статистических массивах), а расчет и прогнозирование возможного развития процессов в реальных условиях работы являются основой для формирования необходимого уровня конструктивной надежности энергонагруженных конструкций,

работающих в условиях сложного напряженного состояния.

Стало очевидным, что применявшиеся ранее методы прочностного расчета, основанные на принципах предельных нагрузок или допустимых напряжений, безусловно, не исчерпывают всех аспектов возможного разрушения конструкции. Так, в частности, известно, что магистральные трубопроводы в ряде случаев могут выйти из строя в результате лавинного (со скоростью 0,1 – 0,4 скорости звука в металле) распространения в них трещин, причем при напряжениях, значительно меньших, заложенных в них как допустимые при их статическом или циклическом нагружении (т. е. меньших, чем предел текучести металла). Это явление связано с хрупким разрушением материала, которое для этого случая и определяется как разрушение, при котором происходит нестабильный рост трещины при напряжениях, меньших предела текучести. Отмеченное явление проявляет себя лишь тогда, когда в конструкции есть концентраторы напряжений (а в самом металле какие-нибудь дефекты), но система нагружения не позволяет приложенным напряжениям релаксировать в момент начала роста образовавшейся трещины. И если при небольшом запасе упругой энергии, с ростом трещины происходит уменьшение нагрузок, (за счет расходования энергии на образование новой поверхности, и как следствие этого рост трещины замедляется), то при избытке в системе упругой энергии происходит резкое ускорение процесса разрушения, называемого взрывным.

Определение взрыва как крайне быстрого выделения энергии, связанного с внезапным изменением состояния вещества, сопровождаемого разбрасыванием и распространением в среде особого рода возмущения — ударной или взрывной волны, вполне подходит к критическому состоянию многих случаев механического разрушения. Поэтому неслучайно резкое механическое разрушение в условиях эксплуатации называют взрывным [1]. Например «взрывы» реактивных самолетов типа «Комета», лавинообразное, хрупкое разрушение цельносварных судов типа «Либерти», резервуаров, крупных трубопроводов, нагруженных внутренним давлением жидкости и особенно газа, и др. Подобные разрушения крупных сооружений привлекли внимание исследователей к запасу упругой энергии, накопленной в систе-

ме, и ее влиянию на прочность и характер разрушения [2].

Известно, что с ростом запаса упругой энергии, например при увеличении объема жидкости, передающей давление [2], или при переходе от гидравлического к пневматическому источнику давления разрушение приобретает взрывной характер.

Величина запаса упругой энергии в напряженной системе определяет характер изменения нагружающего усилия в процессе разрушения (во времени): при большом запасе упругой энергии (ЗУЭ) релаксация усилия мала, в связи с чем с большей перегрузкой и более лавинно заканчивается процесс разрушения. Наблюдаются случаи понижения прочности образцов с увеличением ЗУЭ. Поэтому увеличение ЗУЭ опасно для материалов, чувствительных к влиянию дефектов (трещин), особенно в условиях сложного напряженного состояния, например при двухосном растяжении, растяжении с кручением и т. п. [3]. С уменьшением степени релаксации внешнего усилия скорость деформации возрастает [4], полное время до разрушения уменьшается, сокращается критическая длина трещины и изменяется кинетика ее развития [4]. Эти особенности в той или иной мере присущи всем основным типам механического разрушения: ударному и статическим (кратковременному, длительному, замедленному и многократному, в том числе и усталостному).

Исследования взаимосвязи энергетических характеристик с прочностными легли в основу энергетической теории разрушения. Работы этого направления, начатые А. Гриффитсом, И.В. Обреимовым и Е. Орованом [5, с. 170], бурно развиваются в последние годы.

Известно, что при осевом растяжении тела без трещины упругая энергия на единицу объема

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (1)$$

Формула Гриффитса, позволяет вычислить прочность твердого тела при наличии трещины [6,7,8]. Принимается, что при растяжении пластины единичной толщины с трещиной длиной $2l$, направленной перпендикулярно растягивающим силам, разгружается область в зоне трещины, в форме эллипса с полуосями l и $2l$, площадью $2\pi l^2$. Следовательно, упругая энергия деформации пла-

стины с трещиной уменьшается на величину $\frac{\sigma^2}{2E}$.

$2\pi l^2 = \frac{\pi l^2 \sigma}{E}$ На возникновение новой поверхности затрачивается работа $4ly$ (где y — поверхностная энергия). Таким образом, часть внутренней энергии пластины, связанная с наличием трещины

$$U = 4ly - \frac{\pi l^2 \sigma^2}{E} \quad (2)$$

Рассматриваемая пластина теряет устойчивость с изменением длины трещины, когда величина U достигает максимума (при $s = \text{const}$), т. е.

$$\frac{\partial U}{\partial l} = 0, \text{ откуда}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}} \quad (3)$$

Бурное (лавинное) развитие трещины определяется условием $\frac{dU}{dl} < 0$

Далее в теории Гриффитса предполагается, что закон Гука соблюдается всюду, в том числе и вблизи вершин узкого эллиптического отверстия. При развитии трещины затрачивается энергия, пропорциональная увеличению свободной поверхности, и освобождается упругая энергия за счет частичной разгрузки напряженного тела в окрестности растущей трещины. С момента, когда рост трещины приводит к превышению интенсивности освобождения упругой энергии над интенсивностью увеличения поверхностной энергии, система делается неустойчивой, и трещина, становясь саморазвивающейся, пересекает тело, т.е. происходит полное разрушение.

В равновесном положении разность поверхностной и упругой энергии при изменении длины трещины стационарна — максимальна, минимальна или постоянна; в первом случае равновесие неустойчиво, в остальных устойчиво.

В большинстве теорий механического разрушения поставлена задача определить условия и рассчитать величину внешней нагрузки или напряжения, при которых происходит разрушение,

точнее наступает критическое состояние процесса.

Хотя разрушение твердых тел – резко структурно-чувствительный процесс, основные представления удалось развить без учета структуры на основе механики сплошных сред. В теории А. Гриффитса не рассматриваются условия возникновения трещин. Эта теория отображает лишь условия наступления критического состояния по разрушению в теле с исходной трещиной, без учета времени и кинетики процесса, как в докритическом, так и в закритическом состоянии. Для учета кинетики процесса необходимо принять зависимость поверхностного натяжения от времени и отразить неупругие процессы, которые сопровождают все или почти все случаи разрушения реальных тел. Теория А. Гриффитса подвергалась многочисленным проверкам, уточнениям, развитию и критике. Работы, посвященные этому вопросу, можно разделить на два направления: первое – изучение разрушения вполне упругих тел; второе – изучение разрушения с учетом пластической деформации.

Отметим, что замена модели сплошной среды на среду с исходными дефектами – щелями, во многих случаях приводит к результатам, сходющимся с известными практическими случаями, лучше, чем расчеты, проведенные для бездефектной среды. Так, например, получает объяснение понижение хрупкой прочности при переходе от одноосного к двухосному растяжению, в то время как по классическим теориям при двухосном растяжении тело равнопрочно (I теория) или даже более прочно в $(1 + m)$ раз и составляет 1,43 при $m = 0.3$ (II теория). По статистическим теориям В. Вейбулла и С.Д. Волкова это отношение составляет 0,85; по расчетам на основе теории А. Гриффитса (по данным Е.М. Морозова) оно составляет 0,69.

Многие другие закономерности в последнее время также все чаще объясняются допущением в твердом теле исходных дефектов. **Так, при коррозионной усталости при большой базе испытания прочность растет с увеличением диаметра образца, так как наблюдается относительно большее ослабление образцов малого диаметра вследствие увеличения дефектности приповерхностных зон в коррозионной среде [9].**

Энергетическая теория А. Гриффитса в ра-

ботах Дж. Р. Ирвина [10, т. 3, ч. 1, с. 4] получила эквивалентную формулировку в виде так называемого локального силового критерия: тело с трещиной под нагрузкой достигает предельного состояния равновесия, при котором трещина или начинает двигаться, или при малейшем превышении достигнутой величины нагрузки может стронуться с места, при этом коэффициент интенсивности напряжения K достигает предельной (критической) для данного материала и условий нагружения величины K_c , иногда называемой вязкостью разрушения [11]. Коэффициент интенсивности напряжения K определяет величину нормального напряжения σ_y в данной точке на малом расстоянии z от вершины трещины (в асимптотическом представлении; ось y перпендикулярна направлению трещины):

$$K = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_y \quad (4)$$

Критический коэффициент интенсивности напряжений K_c связан с критической интенсивностью освобождения упругой энергии или вязкостью разрушения G_c . Так, для плоского напряженного состояния. Для практического определения величин K_c и G_c на основании испытания образцов определенных размеров Дж. Р. Ирвином была предложена расчетная формула (на основании решения Г. Вестергаарда), учитывающая ширину b и толщину t пластины, нагружаемой силой P :

$$G_c = \frac{P^2}{Ebt^2} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi l_c}{b} \right) \quad (5)$$

Для более точных определений предложена многочленная расчетная формула А. Кобаяси и др. [12, с. 25].

Зарождение микродефектов структуры исследовали с позиций физики металлов Френкель, Финкель, Ребиндер и ряд других исследователей см., например, [13, 14, 15].

Во многих случаях разрушение реализуется ростом единственной трещины. Не менее, однако, многочисленны ситуации, когда возникает система микротрещин, которые объединяются затем путем разрыва перемычек, осуществляемого магистральной трещиной. Часто оказывается, что монолитная в макроскопическом отношении трещина представляет собой в микроскопическом плане совокупность микроще-

лей, смещенных вдоль и поперек направления распространения трещины. Более того, по-видимому, можно утверждать, что для квазихрупких или вязких материалов реально именно система трещин, в то время, как отдельную монолитную трещину можно рассматривать лишь как известное и очень удобное теоретическое приближение.

Стресс-коррозионное поражение металла характеризуется именно наличием системы микротрещин. Значительное стимулирующее воздействие на появление систем микротрещин способна оказать поверхность. Так, Вествуд [16] продемонстрировал влияние твердых покрытий. Образующиеся на границе пленки скопления краевых дислокаций приводят к зарождению микротрещин, распространяющихся далее по плоскостям спайности. Стокс [16, стр. 352] нашел системы микротрещин на поверхности кристаллов NaCl после водной полировки и просушки.

Общеизвестно влияние водорода [17] на рост многочисленных микротрещин – расплывчатых по массиву образца и концентрирующихся в вершине существующей магистральной трещины.

Типичным примером разрушения, происходящего вследствие объединения системы микротрещин, является завершающая стадия ползучести, когда основная трещина, перемещаясь по межкристаллитному сочленению, присоединяет многие мелкие [18].

Из рассмотренных и многих других работ совершенно ясно, что микротрещины могут возникать на самых ранних стадиях пластической деформации, особенно в поликристаллических материалах, где всегда возможны перегрузки отдельных зерен. Таким образом, всегда или почти всегда реальный металл работает с готовыми или появляющимися на самых ранних этапах деформирования микротрещинами. Наибольший интерес в теоретическом и практическом отношении представляет вопрос о том, каким образом и когда заканчивается первая неопасная стадия докритического вязкого подрастания микротрещин и начинается вторая, неуправляемая и катастрофическая стадия лавинного роста. Если в макроскопическом отношении существуют некоторые механические критерии такого перехода, например условие

Гриффитса, коэффициент интенсивности напряжений Ирвина, модуль сцепления по Г.И. Баренблатту, то этого нельзя сказать в отношении физических процессов, лежащих в основе такого перехода, несмотря на большое число экспериментальных и теоретических исследований. Сложность явления обусловлена сосуществованием двух процессов: образования микротрещин, вызванного тем или иным видом взаимодействия дислокации, и роста микротрещин. Если первый процесс сравнительно хорошо изучен и известно, по крайней мере, семь дислокационных механизмов зарождения трещины, то второй еще неясен даже в макрообъеме, поскольку речь идет об устойчивости системы не с одной, а с огромным числом трещин. Тем более неясно решение этой задачи в микроскопических условиях, когда рост одной из микротрещин происходит путем объединения многих других. Ни в одной из известных работ оба эти процесса одновременно не рассматриваются. Совершенно неясен вопрос и о поле напряжений, существующем в таких условиях в микрообъеме. Неудивительно поэтому, что, несмотря на существование отдельных соотношений о переходе к закритическому разрушению для монокристаллов, весь вопрос в целом крайне далек от своего решения и является одной из основных проблем современной физики прочности.

Основные работы в этой области выполнены механиками, и в них рассматривается равновесие среды, содержащей несколько или много трещин при вполне определенном их расположении.

Основываясь на работах Н.И. Мухелишвили, Койтер [19] решил задачу бесконечного ряда коллинеарных трещин длиной $2c$ и смещенных на расстояние $2b$. Он получил следующее выражение для увеличения упругой энергии на одну трещину:

$$\Delta A\left(\frac{c}{b}\right) = -\frac{8b^2}{\pi} \cdot \left(\frac{\tau^2}{E} + \frac{\sigma^2}{E}\right) \log \cos \frac{\pi c}{2b} \quad (6)$$

Величина ΔA сопоставлялась с аналогичной величиной для одиночной трещины:

$$\Delta A(0) = \pi c^2 \left(\frac{\tau^2}{E} + \frac{\sigma^2}{E}\right) \quad (7)$$

Отношение этих величин имеет вид:

$$\frac{\Delta A\left(\frac{c}{b}\right)}{\Delta A(0)} = -\frac{8b^2}{\pi c^2} \log \cdot \cos \frac{\pi c}{2b} \quad (8)$$

Отсюда следует, что заметное взаимодействие между трещинами не обнаруживается в том случае, если $2c < \frac{1}{2}2b$

Иокобори и Исикава [20] рассмотрели аналогичную задачу в двух случаях. В первом разрушение осуществлялось нормальными растягивающими напряжениями, во втором – касательными. Для первого случая упругая энергия на каждую трещину составляет

$$\Delta A = -\frac{8(1-\nu^2)h^2\sigma^2}{\pi E} \log \cdot \cos \frac{\pi a}{2h} \quad (9)$$

Напряжения в окрестностях трещины равны

$$\sigma_x = \sigma \sin \frac{\pi y}{2h} \left[\sqrt{\left(\sin \frac{\pi y}{2h}\right)^2 - \left(\sin \frac{\pi a}{2h}\right)^2} \right]^{-1} \quad (10)$$

при $2nh + a \leq y \leq (2n+2)h - a$

$$\sigma_x = 0$$

при $2nh - a \leq y \leq 2nh + a$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

Для второго случая

$$\Delta A = -\frac{8(1-\nu^2)h^2\tau^2}{\pi E} \log \left(\cos \frac{\pi a}{2h} \right) \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \tau \sin \frac{\pi x}{2h} \left[\sqrt{\left(\sin \frac{\pi x}{2h}\right)^2 - \left(\sin \frac{\pi a}{2h}\right)^2} \right]^{-1} \quad (12)$$

при $2nh + a \leq x \leq (2n+2)h - a$

$$\tau_{xy} = 0$$

при $2nh - a \leq x \leq 2nh + a$

Если предположить, что условием распространения является $d(\Delta A + 4a\gamma)da = 0$ то критическими для первого случая окажутся напряжения

$$\sigma = \sqrt{\frac{E\gamma}{1-\nu} \cdot \frac{1}{h} \cos \frac{\pi a}{2h}} \quad (13)$$

При $h \rightarrow \infty$ это выражение трансформируется в известное гриффитсовское:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a(1-\nu^2)}} \quad (14)$$

Коттрелл и др. [21,22] ввели представление о кумулятивном разрушении. Объект рассмотрения – ряд коллинеарных трещин, каждая из которых имитируется как дислокационная стенка с переменным параметром. Трещина протяженностью $2c$ реализуется группами восходящих краевых дислокации с вектором Бюргерса, параллельным оси Y . В процессе роста трещины в ее центре непрерывно образуются пары, расходящиеся симметрично по оси X и проталкивающие своих восходящих предшественников далее по оси X .

Достоинство этой схемы – возможность рассмотрения релаксационных процессов в перемычках между трещинами или в вершине одиночной трещины. Собственно трещина заключается в пределах $x = \pm c$, а ее область релаксации – подготовительная зона – в пределах $x = \pm a$.

Анализ приводит к следующим выводам:

$$\frac{c}{a} = \cos \left(\frac{\pi a}{2\sigma_1} \right) \quad (15)$$

смещение

$$\frac{\Phi_c}{c} = \frac{2\sigma_1}{\pi^2 A} \ln \sec \left(\frac{\pi a}{2\sigma_1} \right) \quad (16)$$

где

$$A = \frac{E}{4\pi(1-\nu)} \quad (17)$$

σ_1 – разрушающая прочность (предел текучести).

Этот вопрос рассматривался еще в ряде статей [23,24,25,26,27].

Однако все вышеприведенные работы имеют один общий недостаток – попытка вывести универсальную формулу приводит либо к чрезмерному усложнению математического аппарата, делая решение весьма затруднительным, либо к неучету некоторых параметров, что хотя и упрощает решение, но делает его неудовлетворительно приближенным. На наш взгляд, при решении задач такого типа необходимо сочетать теоретические расчеты с экспериментальными данными, и за счет эмпирических коэффициентов привести расчетные формулы к более удобному для решения виду, с сохранением удовлетворительной сходимости. Применительно к системе микротре-

щин впервые подобный метод был применен В.М. Финкелем [14]. Полученные им результаты и зависимости не утратили своего научного значения в наши дни. Было установлено, что к моменту наступления критической стадии разрушения (росту магистральной трещины) металл оказывается пронизанным микроскопическими зародышами разрушения. Такое специфическое состояние в большинстве современных исследований не учитывается. Исследование процесса объединения микротрещин при разрушении металлов позволило выяснить основные закономерности этой стадии разрушения. Для нее характерно:

1) зарождение микротрещин перед основной при ее росте или возбуждение существующих микроразрывов;

2) отклонение траектории роста трещин от линии действия максимальных нормальных напряжений;

3) большая пластическая деформация материала перемычек перед разрывом и высокая скорость этого процесса.

В.М. Финкелем было предложено описание процесса и предпринята попытка объяснить его закономерности на основе существующих представлений о разрушении и деформации.

Целью работы коллектива исследователей СКГТУ является изучение явления зарождения и роста системы стресс-коррозионных трещин в трубных сталях и иных оболочковых конструкциях с использованием подходов, предложенных В.М. Финкелем.

С этой целью в лаборатории прочности СКГТУ была разработана методика исследования влияния цикличности нагрузки, воздействия агрессивной среды и параметров нагружения на длительную прочность стали в энергонагруженных системах. Принципиально важной особенностью данной методики является моделирование упругой энергии системы. Достигается это на специально сконструированном испытательном стенде при помощи оригинальной конструкции модели. Конструкция модели и способ испытаний защищены патентами РФ. В результате исследований удалось воспроизвести весь процесс зарождения и роста системы микротрещин вплоть до разрушения образца [28].

В качестве основы используются полученные в работе [29, стр. 59] уравнения равновесия сис-

темы из трех трещин, концы которых заданы координатами a , b и c .

Согласно [29, стр. 59], критические напряжения (средние по образцу) для роста соответствующего конца трещины определяются: (18)

$$\sigma_x^{(a)} = \frac{F(K)}{E(K)} \cdot \sqrt{\frac{b^2 - a^2}{c^2 - a^2}} \cdot \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi(1-\nu^2)a}} \quad (19)$$

$$\sigma_x^{(b)} = \frac{\sqrt{(b^2 - a^2)(c^2 - b^2)} \frac{F(K)}{E(K)}}{(c^2 - a^2) - (b^2 - a^2) \frac{F(K)}{E(K)}} \cdot \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi(1-\nu^2)b}} \quad (20)$$

$$\sigma_x^{(c)} = \frac{\frac{F(K)}{E(K)} \cdot \sqrt{K}}{\frac{F(K)}{E(K)} - 1} \cdot \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi(1-\nu^2)c}}$$

Координаты концов трещин входят в выражения как явным образом, так и неявным, через полные эллиптические интегралы $F(K)$ и $E(K)$, определяемые модулем сцепления K , причем (21)

$$F(K) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi}} \quad K = \frac{c^2 - b^2}{c^2 - a^2} \quad (22)$$

$$E(K) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$$

По Фриделю [30], поворот дислокационной трещины означает скольжение головной дислокации под действием каких-либо внешних напряжений. Основываясь на этом положении, будем считать, что поворот одной из двух коллинеарных трещин произойдет в тот момент, когда напряжения, действующие на головную трещинную дислокацию со стороны второй трещины, превысят напряжения взаимодействия этой дислокации со всеми остальными дислокациями трещины.

Каждую из указанных величин можно вычислить. Как и выше, трещина в данном случае рассматривается как стенка из краевых дислокации одного знака. Распределение дислокации может быть неравномерным или равномерным. В дальнейшем будет показано, что распределение дислокации в стенке-трещине не имеет принципиального значения.

Для случая неравномерного распределения дислокации напряжение взаимодействия головной дислокации со своей трещиной может быть записано:

$$\tau = \sum_i \tau_i$$

где ϕ_i — максимальное касательное напряжение взаимодействия двух дислокаций одного знака, которое, согласно [31], находят по формуле

$$\tau_i = \frac{\mu b}{8\pi(1-\nu)h_i} \quad (24)$$

Подставляя выражение (24) в (23) и проводя суммирование по всем дислокациям стенки, получаем

$$\tau = \frac{\mu b}{8\pi(1-\nu)h_0} \quad (25)$$

Если принять равномерное распределение дислокации в стенке-трещине, то сумма, соответствующая (25), будет

$$\tau = \frac{\mu b}{8\pi(1-\nu)h} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right) \quad (26)$$

где h — расстояние между соседними дислокациями в стенке.

Как известно, сумма $\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right)$

может быть вычислена по формуле Эйлера. Оценивая число дислокаций по длине трещины в 10^4 , получим

$$\sum_{i=1}^{10^4} \frac{1}{i} = \ln 10^4 + c \approx 10 \quad c = 0,5772.$$

Поскольку $h=2h$, напряжения, найденные по (26), превышают напряжения, вычисленные по (25), всего в пять раз, это не может существенно отразиться на результате.

Аналогичные расчеты проведены Гилманом [32, стр. 339]. Заметим, что неравномерное распределение дислокации лучше характеризует явление, поскольку разориентировка краев трещины зависит от удаления рассматриваемой точки от вершины. Кроме того, с дислокационной точки зрения разориентировка, вносимая стенкой,

определяется величиной интервала между дислокациями в ней [33], и логично принять этот интервал возрастающим (а разориентировку уменьшающейся) по мере удаления от конца трещины.

Со стороны встречной трещины на головную дислокацию стенки действуют касательные напряжения, стремящиеся заставить ее скользить в плоскости, перпендикулярной плоскости трещины. Величину этих напряжений можно найти различными способами. Принимая во внимание, что, согласно Эшелби [34], распределение напряжений у трещины совпадает с распределением их у полосы скольжения, можно воспользоваться известными выражениями, полученными Стро для полосы длиной L :

$$\tau = \tau_s \sqrt{\frac{L}{\rho}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (27)$$

Здесь ϕ_s — предел текучести материала при сдвиге; r и u — полярные координаты рассматриваемой точки относительно вершины трещины.

Приравняв выражения, полученные по формулам (25) и (27), задавая различными направлениями и, можно решить уравнение относительно r :

$$r = \frac{64\pi^2 \tau_s^2 (1-\nu)^2 h_0^2 L}{\mu b} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (28)$$

для случая коллинеарного расположения $u = 0$, и выражение для r приобретает вид:

$$r = \frac{64\pi^2 \tau_s^2 (1-\nu)^2 h_0^2 L}{\mu^2 b^2} \quad (29)$$

Принимая $h_0 = 10^{-4}$ см, согласно [35], и подставляя значения m и n из таблиц, можно определить величину r для начала взаимодействия трещин. Соответствующий расчет показал, что трещины в стали X45 начинают «чувствовать друг друга» на расстоянии около 0,2 см, что подтверждается полученными нами экспериментальными данными.

Данная методика имеет огромное практическое значение, т.к. позволяет прогнозировать развитие дефектов в металлических конструкциях и сооружениях и предотвращать их разрушение.

Литература

1. **Фридман Я. Б.** Кинетика деформации и разрушения. (На русск. яз.). Ada Technica Academiæ Scientiarum Hungaricæ, Conference on Dimensioning and Strength Calculation. Budapest, Oct. 24—28, 1961. Т. XXXV-XXXVI, с. 83-114, библи.
2. **Надаи А.** Пластичность и разрушение твердых тел. Пер. с англ. Под ред. Г. С. Шапиро. В 2-х т. Т. 1, М., Изд. иностр. лит., 1954, 648 с.; т. 2, М., «Мир», 1969, 863 с.
3. **Зилова Т. К., Новосильцева Н. И., Фридман Я. Б.** Методы испытания с переменным запасом упругой энергии и его влияние на механические свойства
4. **Зилова Т. К., Петрухина Н. И., Фридман Я. Б.** О закономерностях кинетики деформации в зависимости от датливости нагружения. ДАН СССР, 1959, т. 124, № 6, с. 1236—1239.
5. **Атомный** механизм разрушения. Материалы Международной конференции по вопросам разрушения, состоявшейся в апреле 1959 г. в Свомискотте (США). Пер. с англ. Под ред. М. А. Штремеля. М., Металлургиздат, 1963, 660 с.
6. **Дроздовский Б. А., Фридман Я. Б.** Влияние трещин на механические свойства конструкционных сталей. М., Металлургиздат, 1960, 260 с
7. **Упругость** и неупругость металлов. Пер. с англ. Под ред. С. В. Вонсовского. М., Изд. иностр. лит. 1954, 396 с.
8. **Griffith A. A.** The Phenomenon of Rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc., London, 1921,
9. **Карпенко Г. В.** Влияние рабочих сред на проявление масштабного эффекта.— «Заводская лаборатория», 1960, № 9, с. 1134 — 1135.
10. **Fracture.** An advances treatise. Academic Press, N. J., London. Ed. Liebowitz, II. In 7-th vol., 1968—1972
11. **Прикладные** вопросы вязкости разрушения. Сб. статей. Пер. с англ. Под ред. Б. А. Дроздовского с предисл. Я. Б. Фридмана. М., «Мир», 1968, 522 с.
12. **Браун У., Сроули Дж.** Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. Пер. с англ. Под ред. и с предисл. Б. Л. Дроздовского и Г. М. Морозова. М., «Мир», 1972, 13. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов. Л. «Наука», 1972
14. **Финкель В.М.** Физика разрушения. М.»Металлургия», 1970
15. **Ребиндер П.А.** Изв. ОМАН АН СССР. Сер. Хим., 1936, №5, стр.636
16. **Джонстон Т., Паркер Е.** В сб «Разрушение твердых тел». М. Металлургия, 1967., с.76
17. **Tetelman A.S., Robertson W.D.** Trans, AIME, 1962v.224 No.4.
18. **Sasaki Nabuji, Fukitomi Takeo J.** Appl. Phys., 1962
19. **Koyster W.T.** Ingenieur-Archiv, 1959v.58, p.168
20. **Yokobori T., Isikava M.,** Phys. Sos. Japan, 1964, v. 19, p.2341
21. **Cottrell A. H.** Proc. Roy. Soc., 1965, v. A 285, № 1400, p. 10.
22. **Smith E.** Proc. Roy. Soc., 1965, v. A 285, № 1400, p. 46.
23. **Smith E.** Proc. Roy. Soc., 1966, v. A 295, № 1443, p. 421.
24. **Smith E.** Internal. J. Engng. Sci., 1966, v. 4, № 1, p. 41.
25. **Smith E.** Proc. Roy. Soc., 1965, v. A 285, № 1400, p. 46.
26. **Yokobori T., Chashi M., Ichikawa M.** Repts. Res. Inst, Straught. a. Fract, Mech. Tohoku Univ, 1965, v. 1, № 2, p. 33.
27. **Sadowsky M. A. J.** Appl. Mech, 1956, v. 23, № 1, p. 80.
28. **Басиев К.Д., Тибилев В.И., Гулуев В.А., Чехоев В.У.** Исследование трещиностойкости и длительной прочности стали магистрального трубопровода с целью предотвращения отказов и аварий. Сборник МАНЭБ. 2002.
29. **Буйна Е. В.** Вопросы механики реального твердого тела. Изд-во «Наукова думка», 1964, № 2, с. 64.
30. **Коттрелл А. Х.** Атомный механизм разрушения. Металлургиздат, 1963, с. 30.
31. **Коттрелл А. Х.** Дислокации и пластическое течение в металлах. Металлургиздат, 1958.
32. **Джонстон Т., Паркер Е.** В сб. «Разрушение твердых тел». Изд-во «Металлургия», 1967, с. 76.
33. **Рид В. Т.** Дислокации в кристаллах. Металлургиздат, 1957.
34. **Эшелби Дж.** Континуальная теория дислокаций. ИЛ, 1963
35. **Foqel F. L.** Acta metall., 1955, v. 3, № 3, p. 245.

