

УДК 624.078.45:539.422.22

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИК ОЦЕНКИ ХРУПКИХ РАЗРУШЕНИЙ
СВАРНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

*канд. техн. наук, доц. А.Л. ЛИСОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Исследуются причины образования хрупких разрушений сварных соединений строительных конструкций. Проведен анализ методик оценки хрупких разрушений и даны рекомендации, понижающие вероятность их образования. Хрупкие разрушения сварных соединений строительных конструкций носят местный характер, но приводят к катастрофическим последствиям. Показано влияние низких температур, обуславливающих охрупчивание сварных соединений, проиллюстрированы условия производства сварочных работ, качество сварочных материалов, защита расплавленного металла, термомеханическое воздействие сварки на металл, геометрическая форма соединений и др., недостаточное внимание к которым может привести к резкому ухудшению свойств металла и снижению хладостойкости сварных конструкций. Влияние сварки на свойства сварных соединений, эксплуатируемых при резких температурах, многообразно и может изменяться в широких пределах, поэтому в большинстве случаев не поддается конкретному количественному выражению. Представлены рекомендации по методам снижения вероятности образования хрупких разрушений сварных соединений.

Введение. Сварные соединения в строительных конструкциях находят все большее применение. Однако при выполнении сварных работ возрастает вероятность наиболее опасных хрупких разрушений, даже при сварке, казалось бы, пластичных малоуглеродистых сталей. Характерной особенностью хрупких разрушений является то, что они происходят при весьма незначительной пластической деформации материала, расположенного вблизи поверхности разрушения. Хрупкость металлов зависит от структуры и свойств материала, формы тела, вида напряженного состояния, скорости деформирования, низкой температуры и др., которые являются разновидностями основных проблем, создаваемых при определенных условиях нагружения.

Деление разрушений на хрупкие и вязкие в инженерной практике является условным и основывается на результатах испытаний металлов по различным методикам. Резкой границы между вязкими и хрупкими разрушениями не существует. При переходе от вязкого разрушения к хрупкому, например, при понижении температуры постепенно возрастает роль хрупкой составляющей в виде кристаллического излома. Имеются разрушения промежуточного типа, которые называются квазихрупкими, или хрупко-пластичными.

Аналитический обзор. Хрупкие разрушения в промышленных объектах и строительных конструкциях считаются наиболее опасными. Причина заключается в том, что хрупкие разрушения, протекающие с малой пластической деформацией металла, обладают существенными неблагоприятными особенностями, по сравнению с вязкими разрушениями. Эти особенности состоят в следующем. При статическом нагружении и наличии концентраторов напряжений величина разрушающей нагрузки зависит главным образом от равномерности распределения напряжений по сечению детали. Эта равномерность при наличии концентраторов может быть достигнута только вследствие протекания значительной пластической деформации металла в концентраторах. Недостаточно квалифицированная сварка, в том числе и закладных деталей, приводит к увеличению количества концентраторов напряжений. Разрушение в концентраторе наступает при низких средних напряжениях в закладной детали, что означает уменьшение несущей способности конструкции. Можно было бы учесть ожидаемое снижение несущей способности, но большинство современных методов расчета на прочность при статических нагрузках не учитывает концентрацию напряжения, т.е. фактически предполагает возможность протекания в концентраторах пластической деформации. Если такая пластическая деформация в концентраторе на самом деле не наблюдается, а наступает хрупкое разрушение, то оказывается, что элемент конструкции не выдержал расчетного значения нагрузки.

Вторая причина, по которой хрупкие разрушения считаются наиболее опасными, состоит в том, что распространение хрупких разрушений ввиду малой пластической деформации металла происходит при незначительных затратах энергии. Следовательно, разрушение может распространяться при низких напряжениях в металле и малой накопленной энергии в конструкции. Хрупкие трещины при этом, как правило, пересекают все сечение детали, и конструкция может разрушиться, что приводит обычно к крупным авариям. При вязком характере наступившего разрушения оно идет только в зоне весьма высоких напряжений и прекращается вследствие большой затраты энергии на продвижение трещины. Наличие хрупких зон металла, возникших под влиянием технологических операций, опасно тем, что в этих зонах не могут протекать значительные пластические деформации, а наступившее хрупкое разрушение сообщает

трещине скорость, достаточную для ее дальнейшего продвижения как квазихрупкой трещины по зоне вязкого металла. Хрупкие разрушения нередко являются завершающей стадией разрушений, начавшихся от различного рода причин, например, усталостных нагрузок, ударов, коррозионного растрескивания и т.п.

Свойства низкоуглеродистых и низколегированных сталей, а также сварных соединений из них наиболее заметно изменяются при понижении температуры. При испытании гладких образцов из этих сталей пределы текучести, прочности и выносливости повышаются, а относительное удлинение и поперечное сужение понижается. Пластичные в обычных условиях статического нагружения металлы могут вести себя как хрупкие при больших скоростях их деформирования, например, при ударе или распространении трещины. Трещины в металле распространяются с большими скоростями (до нескольких сот метров или даже нескольких километров в секунду). Очевидно, что металл перед фронтом движущейся трещины в момент ее подхода подвергается быстрому нагружению и, как показывает опыт, может разрушаться хрупко, хотя при медленном нагружении ведет себя как пластичный металл.

Результаты и обсуждения. Для служебных характеристик сварных соединений и элементов сварных конструкций решающим является их способность сопротивляться хрупким разрушениям. Поэтому вопросы хладостойкости принято рассматривать в тесной связи с хрупкостью металлов. При переходе от вязкого разрушения металла к хрупкому изменяются внешний вид поверхности излома, глубина пластически деформированного слоя металла от поверхности разрушения и, как следствие, работа пластической деформации металла.

В некотором достаточно узком интервале температур, разном для разных металлов, доля площади B разрушения с волокнистым характером разрушения изменяется от 100 % до нулевой величины (рис. 1, а), уступая место хрупкому кристаллическому излому, и понижается работа G_q разрушения металла при быстром динамическом распространении трещины (рис. 1, б). Температуру, при которой поверхность разрушения имеет 50 % хрупких участков и 50 % вязких, принято называть первой критической температурой $T_{кр1}$. При испытании крупных образцов и динамическом приложении нагрузок $T_{кр1}$ несколько смещается вправо, а при испытании более мелких образцов и статическом приложении нагрузок – влево, в область более низких температур. Смещение $T_{кр1}$ обычно невелико (в пределах 10...20 °С). Положение $T_{кр1}$ зависит от химического состава, способа производства и термической обработки стали, а также других факторов. Чем $T_{кр1}$ стали ниже, тем более широко эту сталь можно применять для изготовления сварных конструкций различного назначения. Положение $T_{кр1}$ указывает лишь на область перехода от вязкого разрушения к хрупкому, но не характеризует количественно способность металла сопротивляться разрушению при быстром распространении трещины. Количественной характеристикой является величина G_q : чем она больше, тем меньше вероятность разрушения.

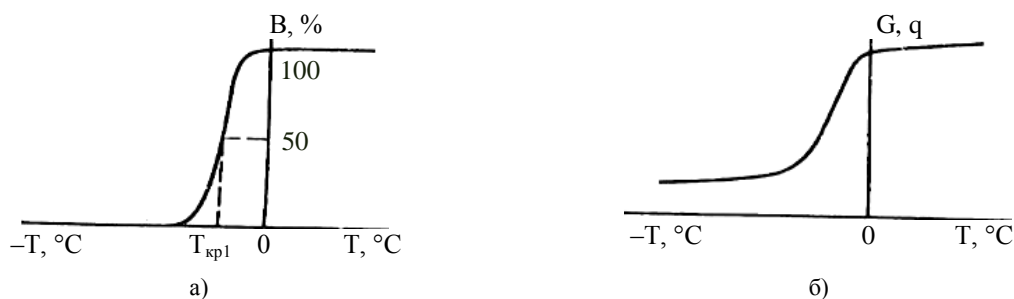


Рис. 1. Изменение площади разрушения с волокнистым характером разрушения (а) и работы разрушения металла при быстром динамическом распространении трещины в зависимости от температуры испытания (б)

Для оценки свойств сварных соединений и элементов сварных конструкций при пониженных температурах применяют многочисленные методы и критерии. Критерии и методы испытаний могут быть классифицированы по многим признакам, в частности, различают методы, с помощью которых определяется способность металла сопротивляться началу разрушения, и методы, с помощью которых оценивают свойства металла в процессе распространения трещины. Критерии классифицируют также по роду регистрируемой величины, разделяя, например, их на критерии, связанные с напряжениями деформацией, перемещением и затраченной энергией.

Наиболее распространена оценка сварных соединений и элементов сварных конструкций по разрушающей силе P_p или среднему разрушающему напряжению σ_p (рис. 2). С их помощью можно выявить так называемую вторую критическую температуру $T_{кр2}$. При $T_{кр2}$ среднее разрушающее напряжение испытываемого элемента становится равным пределу текучести металла σ_T при соответствующей температуре.

Положение $T_{кр2}$ зависит от многих факторов. Чем выше концентрация напряжений, скорость приложения нагрузки, остаточные напряжения, уровень сварочной пластической деформации, содержание

газов и вредных примесей в шве, скорость охлаждения при сварке, приводящая к закалке, крупнее зерно и больше сечение испытываемого элемента, а также хуже защита металла при сварке, тем правее располагается $T_{кр2}$, смещаясь в сторону положительных температур. При крайне неблагоприятных сочетаниях отрицательных факторов в ограниченной области сварного соединения свойства металла существенно ухудшаются, при этом $T_{кр2}$ может оказаться даже правее $T_{кр1}$.

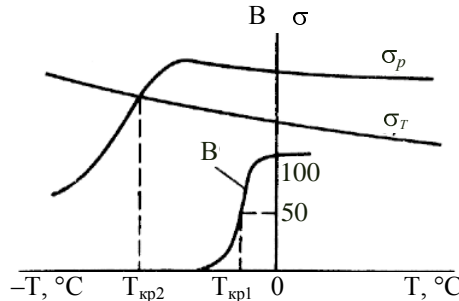


Рис. 2. Зависимость предела текучести σ_T , среднего разрушающего напряжения σ_p и процента волокнистости излома B от температуры

Преимуществом испытания для определения σ_p является его простота. Недостаток состоит в том, что, проводя испытания конструкционного элемента при конкретной температуре T выше $T_{кр2}$ и получая коэффициент запаса прочности $n_s = \sigma_p / \sigma_T > 1$, нельзя судить о запасе пластичности и о возможности наступления хрупкого разрушения. Это объясняется тем, что на диаграмме в координатах «напряжение – средняя деформация ε_{cp} » (рис. 3) в опасном сечении при изменении концентрации напряжений, свойств металла и т. п. точка разрушения D смещается в основном по горизонтали, в то время как средняя разрушающая деформация $\varepsilon_{cp,D}$ изменяется существенно.

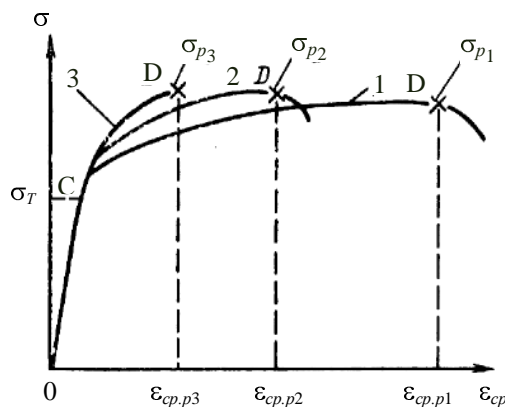


Рис. 3. Диаграмма зависимости среднего напряжения σ от средней деформации ε_{cp}

Большое развитие получила механика разрушения. Одним из основных понятий в механике разрушения является коэффициент K интенсивности напряжений. Он характеризует напряженное состояние вблизи конца трещины, находящейся в нагруженном элементе. В момент начала продвижения конца трещины при механических испытаниях материала регистрируется критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} или K_c , который является характеристикой материала и служит для оценки его способности сопротивляться началу движения трещины при статической или ударной нагрузке в зависимости от условий проведения испытаний.

Также большое значение для оценки свойств сварных соединений и основного металла имеют энергетические критерии. Для определения свойств металла околошовных зон и шва широко применяют испытания на ударный и статический изгиб призматических образцов с получением диаграммы « P (сила) – f (прогиб образца)». Диаграмма (рис. 4, а) имеет линейный упругий участок OA . Участок изгиба образца AB до появления в надрезе трещины или до начала ее движения, если трещина создана заранее, и участок BC , если трещина распространяется по поперечному сечению образца. Площадь фигуры $OABD$ представляет собой работу пластической деформации образца на стадии до начала движения трещины, площадь DBE — накопленную энергию упругой деформации, площадь $DBCF$ является работой пластической деформации

образца во время продвижения трещины. При хрупком распространении трещины (рис. 4, б) удается определить только работу пластической деформации изгиба – площадь $OABD$. Вертикальный участок диаграммы по линии BE указывает лишь на то, что работа, истраченная на распространение трещины, меньше величины энергии упругой деформации, выражаемой площадью DBE , но какова она в действительности, установить невозможно.

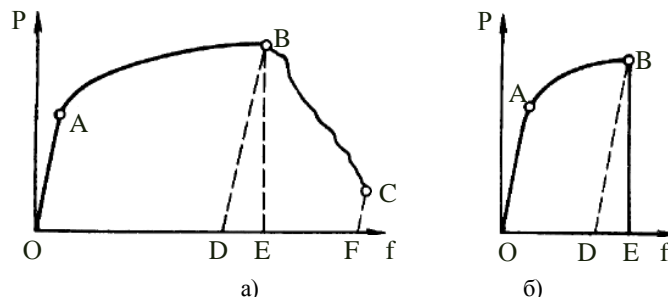


Рис. 4. Характер диаграмм « $P-f$ » при вязком (а) и хрупком (б) распространении трещины

Современные способы сварки и применяемые сварочные материалы обеспечивают получение наплавленного металла, не уступающего по хладостойкости основному металлу аналогичного химического состава, а в некоторых случаях даже превосходящего по своим свойствам основной металл. Однако при сварке имеется ряд факторов, таких как условия производства сварочных работ, качество сварочных материалов, защита расплавленного металла, термомеханическое воздействие сварки на металл, геометрическая форма соединений и другие, недостаточное внимание к которым может привести к резкому ухудшению свойств металла и снижению хладостойкости сварных конструкций.

Влияние сварки на свойства сварных соединений, эксплуатируемых при резких температурах, многообразно, оно может изменяться в широких пределах и поэтому в большинстве случаев не поддается конкретному количественному выражению. Характерным является также то, что изменения свойств носят местный, локальный характер.

Наиболее распространены несколько случаев отрицательного влияния сварки:

- образование хрупких зон в сварных швах под влиянием изменения химического состава металла шва по сравнению с основным металлом за счет нерационального легирования или загрязнения металла вредными примесями и газами;
- образование хрупких при низких температурах околошовных зон за счет термического влияния сварки – быстрого охлаждения, роста зерна, структурных изменений. Степень этого влияния решающим образом зависит от химического состава основного металла, способа его производства и исходного состояния;
- концентрация пластических деформаций и деформационное старение металла в зонах неповара и резкого изменения формы соединений, трещинах и т.п., находящихся в пределах зоны термического влияния сварки. Данный случай является наиболее распространенной причиной хрупких разрушений сварных соединений при низких температурах.

По количеству хрупких разрушений, зарегистрированных в сварных конструкциях при низких температурах, на первом месте находятся разрушения, возникшие от концентраторов, расположенных в зоне сварки, где протекали значительные пластические деформации, возникали остаточные растягивающие напряжения и происходило старение металла. Значительная часть хрупких разрушений была вызвана усталостными трещинами, явившимися результатом неудовлетворительного конструктивного оформления соединений, в сочетании с низкой сопротивляемостью основного металла распространению хрупких разрушений. Некоторая часть разрушений зарегистрирована как возникшая от участков металла с низкими пластическими свойствами по причине загрязнения металла и его плохой защиты в нагретом состоянии.

Заключение. Предупреждение хрупких разрушений сварных соединений и конструкций при низких температурах может быть осуществлено устранением причин, их вызывающих. Существует несколько основных путей повышения сопротивляемости хрупким разрушениям:

- 1) выбор основного металла для сварных конструкций, обладающих малой склонностью к деформационному старению и достаточно высокой сопротивляемостью распространению разрушений при температурах эксплуатации изделия. Развитие разрушения при использовании основного металла с высокой энергией разрушения при распространении в нем трещины возможно лишь при дефектах или зонах повреждения металла большой протяженности (например, в продольных швах трубопроводов). В большинстве сварных конструкций изменения, вызываемые сваркой, носят локальный характер, ввиду чего начавшееся разрушение не будет распространяться по основному металлу. Такой путь оправдан в конст-

ружках, где невозможно обеспечить полное отсутствие дефектов сварки. Закалка и отпуск основного металла являются эффективным средством повышения энергии разрушения сталей при низких температурах;

2) нормализация и закалка с отпуском сварных деталей. Такие операции не только устраняют отрицательные последствия влияния сварки на структуру металла в зоне сварных соединений, но и улучшают свойства основного металла;

3) применение высокого отпуска, который является эффективным средством, позволяющим восстановить пластические свойства металла, утраченные в результате протекания пластических деформаций и старения металла в концентраторах. Одновременно общий высокий отпуск значительно снижает остаточные напряжения и накопленную потенциальную энергию при сварке. Местный отпуск применяют главным образом как средство восстановления пластичности металла;

4) конструктивное оформление отдельных элементов, уменьшающее как концентрацию собственных деформаций в процессе сварки, так и концентрацию рабочих напряжений в процессе эксплуатации конструкции;

5) назначение последовательности сборочно-сварочных операций и технологических приемов выполнения сварных соединений, исключающих резкие концентраторы напряжений в зоне пластических деформаций, в том числе дефекты в виде непроваров, трещин, несплавлений, подрезов и т. п.;

6) применение присадочных металлов, обеспечивающих высокую пластичность и вязкость металла швов при низких температурах;

7) использование рациональных режимов сварки, исключающих появление зон с пониженными механическими свойствами при низких температурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев, Г.А. Сварка в машиностроении. Справочник / Г.А. Николаев. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 3.
2. Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев. – М.: Высш. шк., 1982.
3. Фролов, В.В. Теоретические основы сварки / В.В. Фролов. – М.: Высш. шк., 1970.
4. Прохоров, Н.Н. Технологическая прочность металлов при сварке / Н.Н. Прохоров. – М.: НТО, Машпром, Обществ. ун-т, 1960.
5. Рыкалин, Н.Н. Развитие теплофизики сварочных процессов / Н.Н. Рыкалин // Сварочное производство. – 1967. – № 11.

Поступила 31.10.2011

RESEARCH METHODS FOR ESTIMATING BRITTLE FRACTURE OF WELDED BUILDING CONNECTIONS

A. LISOWSKI

Shows the causes of brittle fractures of welded joints of building structures. Gives analysis of methodologies for assessing brittle fractures and recommendations lowering the probability of their formation. It is shown that the brittle fracture of welded joints of building structures is local, but it leads to disastrous consequences. Shows the effect of low temperatures, leading to embrittlement of welded joints, as well as the conditions of production of welding, the quality of welding materials, protection of molten metal, thermo-mechanical effects of welding on the metal, geometry and other compounds. There is emphasis on the lack of attention that could lead to a sharp deterioration of the properties of the metal and reduce the brittle fracture of welded structures. Stresses the effect of welding on the properties of welded joints operating at harsh temperatures, which can be varied within wide limits and, therefore, in most cases cannot be quantifiable. Provides recommendations on methods for reducing the probability of formation of brittle fracture of welded joints.