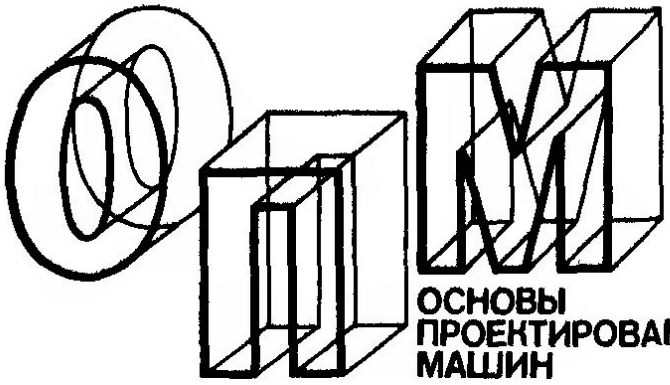
В.А. Винокуров
С.А. Куркин
Г.А. Николаев

СВАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ И КРИТЕРИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ



Основана
в 1983 году

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель — **К.В. Фролов**
(главный редактор издания)

Члены: В.В. Бойцов, И.А. Глебов, А.П. Гусенков (зам. председателя), Ф.М. Дементберг, Ю.Н. Дроздов, И.Н. Жесткова, К.С. Колесников (зам. председателя), Г.В. Крейнин, И.П. Ксеневич, Г.В. Новожилов, И.Ф. Образцов, Г.С. Писаренко, Г.П. Свищев, А.А. Туполев, М.К. Усков, Е.И. Шемякин



В.А. Винокуров С.А. Куркин Г.А. Николаев

СВАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ И КРИТЕРИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Под редакцией Б.Е. Патона



Москва "Машиностроение" 1996

ББК 30.4
В49
УДК 621.791.05:620.17

Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований

Винокуров В.А. и др.

В49 Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев; Под ред. Б.Е. Патона — М.: Машиностроение. 1996. — 576 с.: ил.

ISBN 5-217-02776-2

Наряду с анализом существующих и традиционно используемых приемов испытаний и расчетов сварных соединений и конструкций систематизированно изложены современные подходы к постановке расчета сварных соединений с учетом наличия в них несплошностей на основе использования ЭВМ и метода конечных элементов, а также идей линейной и нелинейной механики разрушения, в том числе применительно к случаю страгивания и роста несквозной трещины по толщине элемента

Для научных работников, расчетчиков, технологов, проектировщиков и испытателей, работающих в отраслях тяжелого и транспортного машиностроения, тепловой и атомной энергетики, космонавтики, сельскохозяйственного машиностроения, судостроения, трубопроводного транспорта, строительства

В $\frac{2704060000-097}{038(01)-96}$ Без объявл. ББК 30.4

Научное издание

Винокуров Виталий Александрович, Куркин Сергей Александрович,
Николаев Георгий Александрович

Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности

Редактор *З М Рябкова* Переплет художника *Т Н Галициной*

ИБ № 7728
Лицензия ЛР № 080003 от 15 08 91
Сдано в набор 30 09 95 Подписано в печать 29 12 95
Формат 60×88 1/16 Бумага офсетная Гарнитура литературная
Печать офсетная Усл печ л 35,28 Уч изд л 36,07
Тираж 3000 экз Заказ 1275
Издательство "Машиностроение", 107076, Москва, Стромынский пер , 4
Отпечатано в АООТ "Политех-4", 129110, Москва,
ул Б Переяславская, 46 с готового оригинал-макета

ISBN 5-217-02776-2

© Издательство "Машиностроение", 1996

ПРЕДИСЛОВИЕ

Монография представляет собой систематизированное обобщение исследований в области прочности сварных соединений и конструкций, проведенных на кафедре сварки МГТУ им. Н.Э. Баумана. Авторы внесли наибольший вклад в создание и развитие хорошо известной в стране и за рубежом научной школы прочнистов-сварщиков.

С 1947 по 1989 гг. научную школу сварщиков и кафедру "Машины и автоматизация сварочных процессов" возглавлял крупный ученый в области сварки Герой Социалистического Труда, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, академик Г.А. Николаев. Создание теории прочности сварных конструкций явилось результатом содружества Г.А. Николаева, Н.С. Стрелецкого и Е.О. Патона. Впоследствии работы Г.А. Николаева по исследованию прочности сварных соединений и конструкций стали теоретической и инженерной основой применения сварки в производстве. По его проектам были изготовлены первые сварные железнодорожные мосты, разработаны технологические процессы сварки.

Благодаря трудам специалистов-прочнистов на возглавляемой Г.А. Николаевым кафедре была разработана теория сварочных деформаций и напряжений, базирующаяся на новейших достижениях изотермической теории пластичности, методе конечных элементов и широком использовании ЭВМ. Большой вклад в постановку и развитие этих работ внес проф., д-р техн. наук В.А. Винокуров.

Работы по прочности при низких температурах, конструкционной прочности тонкостенных сосудов давления, по анализу развития разрушения оболочковых конструкций д-ра техн. наук С.А. Куркина явились основополагающими по соответствующим разделам теории прочности сварных конструкций.

Научное редактирование и окончательная подготовка рукописи к печати проделана С.А. Куркиным, большая помощь в подготовке рукописи оказана А.С. Куркиным. По просьбе основных авторов глава 13 и § 14.7 главы 14 написаны В.Ф.Лукьяновым.

Зав. кафедрой "Машины и автоматизация
сварочных процессов" МГТУ им. Н.Э. Баумана
академик РИА, проф. д-р техн. наук **Н.П. Алешин**

Глава 1

РАЗРУШЕНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ

§ 1.1. Применение сварки в конструкциях

Разработка научных основ проектирования конструкций проводилась в ИЭС им. Патона, МВТУ им.Баумана, ЦНИИТМАШе, ЦНИИСКе и др. Рационализация проектирования и типизация изделий проводилась ЦНИИпроектстальконструкцией им. Н.П.Мельникова и рядом других организаций.

Блестящими примерами на заре применения сварки было создание сварных мостов под автодорожное движение в Ленинграде (мост имени лейтенанта Шмидта) во второй половине 30-х годов и в Киеве (мост имени Е.О.Патона) во второй половине 40-х годов.

Применение сварки в мостостроении сыграло выдающуюся роль в развитии сварочной техники в металлоконструкциях всех видов. Сварной железнодорожный мост являлся своего рода флагманом, иллюстрирующим безопасность и надежность работы сварных соединений в наиболее трудных эксплуатационных условиях.

В мостах, в особенности со сквозными фермами, сочетаются многочисленные трудности применения сварки:

— высокие напряжения в элементах во время эксплуатации, наличие ярко выраженных динамических нагружений;

— большое число высоконапряженных швов,в том числе угловых,и относительно сложные конструктивные формы узловых сопряжений элементов ферм;

— ударное воздействие подвижного состава в стыковых накладках рельсов, в том числе в условиях низких температур;

— наличие элементов, пересекающихся в разных направлениях в пространстве, что создает трудные условия для монтажной сварки.

Поэтому естественно, что демонстрация возможности создания сварных конструкций мостов стимулировала применение сварки в других, более легких случаях эксплуатации.

Второй отраслью техники, значительно способствовавшей применению сварки, являлось судостроение. Сварка в судостроении стала применяться с начала 30-х годов.

§ 1.2. Разрушения конструкций

Разрушения конструкций крайне многообразны и далеко не всегда своим источником имеют нарушение прочности сварных соединений.

Значительная группа конструкций потерпела аварию вследствие отступлений при изготовлении относительно проекта. Например, разрушения имели место вследствие неучета состояния оснований под опоры конструкций. Это приводило к неравномерной осадке фундаментов, вызывавшей перегрузку отдельных частей сооружений, иногда менявшую статическую схему сооружения.

Много разрушений конструкций произошло в результате нарушения правил монтажа: использование элементов с недопустимыми дефектами, строповка за элементы конструкции вне узлов, несвоевременная постановка связей. Лавинообразные разрушения большой протяженности имели место в газопроводах.

В 30-х годах ряд сварных мостов с решетчатыми фермами был сооружен в Бельгии через канал Альберта. В некоторых из них появились трещины, а один пролет 74,5 м внезапно обрушился при отсутствии на нем полезной нагрузки. В качестве причин разрушения были признаны: применение хрупкой томасовской стали, значительные по величине остаточные напряжения. После этого подобных катастроф в мостостроении не было, но трещины образовывались нередко.

Разрушения имели место в крупных сварных судах типа "Либерти", построенных в большом количестве в США во время войны в начале 40-х годов. Эти разрушения были вызваны главным образом наличием резко выраженных концентраторов напряжений, а также недостаточной стойкостью материала против хрупкого разрушения. Во многих судах появлялись трещины, несколько судов переломилось. В результате учета этих недостатков крупные разрушения сварных судов прекратились.

Разрушения сварных соединений при низких температурах почти при полном отсутствии внешних нагружений явления редкие, но все же имеющие место в эксплуатации. Как правило, они наступают при понижении температуры и наличии ветра, способствующего охлаждению конструкции с одной стороны. Были единичные примеры подобных разрушений на Севере сварных кранов, известно самопроизвольное разрушение сварных сферических сосудов в условиях мороза.

§ 1.3. Проблема обеспечения надежности сварных констукций

К факторам, вызывающим разрушения в несварных конструкциях, использование сварки добавляет факторы,связанные как с конструктивным оформлением сварных соединений, так и с технологией их изготовления.

Так, на стадии проектирования выбранный тип соединения предопределяет появление конструктивных концентраторов напряжений, а назначение метода и приемов сварки — появление характерных технологических дефектов, вероятность обнаружения и исправления которых в процессе изготовления будет определяться уровнем культуры производства. Естественно, эти концентраторы напряжений, как конструктивного, так и технологического характера, в условиях эксплуатации сварной конструкции становятся потенциальными источниками разрушений.

Из вышесказанного следует, что обеспечение надежности машин и конструкций, понимая под этим вероятность безотказной работы в эксплуатации до наступления предельного состояния разрушения, является особенно острой проблемой при наличии сварных соединений.

Решение этой весьма сложной задачи применительно к сварной конструкции конкретного типа требует как освоения опыта проектирования, изготовления и эксплуатации данного вида конструкций, так и учета достижений науки в области теплофизики, металлургии, металловедения, прочности, теории упругости и пластичности, механики разрушения, автоматики и электроники.

Источники разрушений, связанные с применением в конструкциях сварных соединений, достаточно разнообразны.

Прежде всего это технологические несплошности (дефекты), которые могут возникать в процессе производства сварных конструкций.

Наличие несплошностей, а также конструктивных концентраторов напряжений, связанных с резкими переходами от основного металла к металлу шва или от одного элемента к другому, может способствовать снижению надежности сварного соединения. Их отрицательное влияние иногда проявляется даже в случае статического приложения нагрузок при неблагоприятном сочетании с собственными напряжениями при действии низких температур или агрессивных сред. Наиболее сильное влияние наличия несплошностей имеет место при работе конструкции под усталостной нагрузкой. В этом случае даже небольшой дефект или концентратор может стать источником зарождения трещины.

Ни один из существующих способов сварки не обеспечивает гарантированного бездефектного сварного соединения без последующего исправления. Это обьясняется тем, что на качество сварных соединений оказывают влияние многие факторы не только металлургического, но и технологического, а также организационного характера, задача регулирования и поддержания которых в необходимых пределах полностью не решена.

Рациональное и квалифицированное использование существующих методов контроля обычно дает достаточно обьективную информацию о состоянии контролируемых сварных соединений. Сопоставление

данных контроля качества конкретного изделия с данными нормативных документов отрасли позволяет решать вопросы приемки этого изделия или исправления тех дефектов,параметры которых выходят за пределы допустимости.

Ограниченность такого подхода заключается в отсутствии непосредственных связей между данными нормативно-технологических документов и процессами разрушения в случае наличия тех или иных дефектов. Поэтому надежность приходится обеспечивать косвенно, путем регламентации уровня качества технологического процесса, а не уровня работоспособности сварной конструкции в эксплуатации.

Соблюдение требований нормативно-технологических документов необходимо как средство поддержания дисциплины производства, ограничивающее допуск к эксплуатации изделий по уровню дефектности. Однако этот уровень дефектности условен. Если обнаруженный при приемочном контроле или в процессе эксплуатации дефект несколько выходит за пределы норм, то нередко возникает сомнение, насколько обоснована браковка изделия, когда исправление дефекта оказывается трудно осуществимо или невозможно. Решение о допуске к эксплуатации без исправления дефекта может быть принято, только если выполнен контрольный расчет, показывающий, что в процессе эксплуатации изделия зарождение трещины от дефекта и последующий рост этой трещины еще не приведут к наступлению предельного состояния разрушения в пределах заданного ресурса. До настоящего времени такие подходы в расчетах еще не получили достаточно систематизированного изложения даже применительно к однородному металлу, не говоря об учете возможной неоднородности механических свойств сварных соединений. Изложению подобных вопросов применительно к оценке работоспособности сварных соединений и конструкций, посвящен ряд последующих глав настоящей монографии.

Глава 2

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

§ 2.1. Виды требований к сварным конструкциям

Различают требования технологические, регламентирующие уровень качества технологического процесса на стадии изготовления конструкции, и требования эксплуатационные, которые имеют целью обеспечение работоспособности конструкции.

В определенной мере технологический характер имеет требование равнопрочности сварного соединения основному металлу. Оно включает в себя не только требование не уступать основному металлу по прочности. В широком смысле этого понятия речь идет о полной равноценности сварного соединения и основного металла. Требование равнопрочности может служить своеобразной целью или эталоном качества технологического процесса, даже если в этом нет особой необходимости, являться стимулом к разработке новых методов сварки, сварочных материалов, технологий и сварочного оборудования. Под влиянием этого требования проводятся различные мероприятия, направленные на устранение недостатков, свойственных сварочному процессу, например применение термической обработки для снижения остаточных напряжений или устранения механической неоднородности.

Для некоторых металлов с особыми свойствами, главным образом для высокопрочных,требование равнопрочности обеспечить не удается.

Ко многим сварным конструкциям предьявляются требования в отношении термической обработки после сварки. Они в той или иной мере связаны с повышением прочности, пластичности и вязкости металла, точности изготовления, обрабатываемости, предотвращения образования дефектов и т.д. Применение термической обработки для сварных конструкций, ее режимы и эффекты, достигаемые ею, составляют крупную проблему, рассмотрение которой далеко выходит за пределы настоящей монографии. Перечислим лишь основные случаи применения термической обработки в плане достижения конкретных результатов.

1. Снижение уровня остаточных сварочных напряжений путем отпуска сварных конструкций [25]. Для сталей низкой и средней прочности одновременно устраняются последствия наклепа, вызванного пластической деформацией, значительно восстанавливается пластичность металла, утраченная в результате деформационного старения. Для

ряда других сталей отпуск полезен главным образом как средство для уменьшения твердости закаленных участков и повышения вязкости металла.

2. Нормализация или закалка с целью повышения прочности, пластичности и вязкости металла сварного соединения [98]. Применяют эти виды термической обработки, в частности, после электрошлаковой сварки для измельчения зерна, повышения ударной вязкости и прочности сварных соединений. При сварке высокопрочных сталей эти операции необходимы для получения высокой прочности сварных соединений.

3. Отпуск с целью стабилизации структур. Используется для предотвращения образования холодных закалочных трещин, если проводится непосредственно после завершения сварки для распада неустойчивых структур [179] или если ставится цель добиться стабильности размеров во времени [271].

4. Термическую обработку выполняют также для повышения жаропрочности сварных соединений [92], коррозионной стойкости [289] и др. Мотивированное и грамотное принятие решения о необходимости проведения термической обработки в ряде случаев требует учета противоречивых требований.

Ко многим сварным конструкциям предъявляют различные требования точности. Одна из групп этих требований относится к конструкциям, которые после сварки не могут быть выправлены или обработаны механически, например при изготовлении сварных деталей крупногабаритных машин и механизмов, удовлетворительная работа которых существенно зависит от точности исполнительных размеров. Предотвращение отклонений от этих размеров требует не только точной сборки, но и ограничения деформаций и перемещений от сварки. Другую группу составляют требования, предъявляемые к сварным конструкциям, идущим на механическую обработку. Отклонения от заданных размеров в этом случае не должны превышать припуски на механическую обработку.

Определенную группу составляют требования точности в отношении формы поверхностей для вагонов, автомобилей, корпусов судов, предметов бытовой техники и др.

Характерными для сварных соединений являются требования по сплошности металла шва. Эти требования встречаются практически почти во всех технических условиях на сварные конструкции, поскольку непровары, несплавления, поры и другие несплошности являются следствием нарушения сварочного процесса. Анализ этих требований показывает, что они имеют как эксплуатационное, так и технологическое происхождение.

Требования контроля качества сварных соединений неразрушающими методами, как по объему контроля, так и по выявляемости различных дефектов, в первую очередь связаны с требованиями по сплошности металла. Существуют также требования, определяющие правила контроля, испытания и приемки различных сварных конструкций.

Значительную часть перечисленных выше требований в конкретных формулировках содержат нормативные документы, методические указания, технические условия, ОСТы, ГОСТы.

Обеспечение минимальной массы изделия или детали также может оказаться весьма важным требованием. Оно не является чем-то специфическим именно для сварных конструкций, но реализация этого требования в сварных деталях и конструкциях имеет некоторые особенности.

Один из основных путей получения минимальной массы — это использование материалов с высокой удельной прочностью. Следует подчеркнуть, что существует общая закономерность, состоящая в том, что чем выше удельная прочность металла, тем сложнее обеспечить условия сварки и термической обработки, позволяющие полностью использовать преимущества высокой удельной прочности.

Подход к выбору металла с позиций обеспечения минимальной массы сварной конструкции оказывается различным для разных групп изделий. К первой группе, для которой требование минимальной массы является безусловно необходимым, поскольку оно определяет саму возможность создания прогрессивной конструкции, могут быть отнесены различные детали и конструкции летательных аппаратов — ракет, самолетов, вертолетов. Вторая группа более многочисленна. В нее входят транспортные конструкции — суда, вагоны, автомобили, грузоподъемные, строительные и добывающие машины — краны, экскаваторы, тракторы, а также военная техника, для которых снижение массы связано с повышением эксплуатационных показателей изделия. В третью группу могут быть отнесены все остальные изделия, для них масса металла определяет стоимость производства и незначительно влияет на эксплуатационные характеристики.

При выборе металла, удовлетворяющего требованиям минимальной массы, необходимо избегать противоречий с другими требованиями. Так, например, ограничением в некоторых случаях оказывается низкий модуль упругости металла, определяющий жесткость и устойчивость элемента конструкции, а также невысокая жаропрочность или коррозионная стойкость металла в определенных средах.

Наивысший результат в снижении массы сварной конструкции или детали достигается в тех случаях, когда обеспечивается равнопрочность сварного соединения и присоединяемого элемента из основного металла. В наибольшей мере этому отвечают стыковые сварные

соединения. Наиболее трудно обеспечить требование равнопрочности при переменных нагрузках.

При создании сварной конструкции, то есть в процессе проектирования и изготовления, стремятся наделить ее такими характерными особенностями, которые обеспечили бы ей требуемую работоспособность и экономичность изготовления. При этом, естественно, приходится учитывать действие факторов, предопределяющих эти характерные особенности. Главные из них — это служебное назначение сварной конструкции, условия ее эксплуатации, стоимость и условия производства.

§ 2.2. Служебное назначение сварных конструкций и деталей

Значительную группу составляют сварные конструкции, предназначенные для хранения газообразных, жидких и сыпучих материалов. По своему назначению это должны быть оболочки. Для газообразных продуктов, создающих равномерное внутреннее давление, наиболее экономичной формой в отношении массы материала является сфера. Однако многие оболочки для хранения газов имеют цилиндрическую форму. Жидкие материалы создают гидростатическое давление, но могут также находиться под равномерным внутренним давлением. Если имеется только гидростатическое давление, то наиболее рациональной формой является каплевидная форма оболочки, но по экономическим соображениям такая форма резервуара используется крайне редко. Для хранения жидких материалов наибольшее применение получила цилиндрическая форма вертикальной оболочки с переменной толщиной стенки по высоте.

Для хранения сыпучих материалов крупных сварных емкостей обычно не сооружают. С целью обеспечения возможности ссыпать материал за счет их веса, оболочки нередко делают коническими. В этом случае удачно сочетается удобство транспортировки с требованием минимального веса — стенка конической оболочки может иметь постоянную толщину, что при соответствующем уменьшении радиуса оболочки обеспечивает мало изменяющиеся окружные напряжения.

Форму оболочек имеют также многие элементы различных сооружений, если они предназначены для хранения или удержания сыпучих материалов. Это корпуса домен, различные ковши, бункеры, засыпные аппараты, корпуса цементных печей и др.

Транспортные сварные конструкции по своему назначению являются вместилищем транспортируемых предметов или сред, но одновременно должны быть приспособлены к определенному способу их передвижения. Они подразделяются на две крупные группы: группа, в которой движется только продукт, а основная масса конструкции

остается неподвижной, и группа, в которой транспортная конструкция перемещается вместе с перевозимым продуктом.

Первую группу составляют различные трубопроводы, в которых движение осуществляется за счет перепада давления. Когда транспортируемыми продуктами являются газы, жидкости или материалы с относительно некрупными частицами, давление оказывается значительным. В этом случае поперечное сечение трубы целесообразно иметь круглым.

Во вторую группу транспортных конструкций входят автомобили, железнодорожные вагоны, суда, самолеты. Для этой группы одним из основных требований является требование минимальной массы, затем требование жесткости, а также прочности. Несмотря на то, что требование минимальной массы, казалось бы, должно являться решающим для транспортной конструкции, лишь самолеты изготовляют из легких сплавов. Экономические требования, а также требования в отношении жесткости конструкций в большинстве случаев оказываются более существенными, чем требование минимальной массы.

Значительная часть строительных сварных конструкций предназначена для восприятия и передачи нагрузок, возникающих от веса сооружений и транспортных средств. Это металлические элементы зданий промышленного или культурного назначения (стойки, балки, купола разнообразного вида), а также мосты, мачты, опоры линий электропередач и др.

Служебное назначение машиностроительных сварных конструкций многообразно. Значительную группу составляют так называемые корпусные конструкции — корпуса редукторов, корпуса двигателей, турбин, станины станков, прессов, молотов, агрегатов прокатного и металлургического оборудования. Для этих деталей одним из основных является требование высокой жесткости, в некоторых случаях также и прочности. В крупных машинах для обработки металлов давлением встречаются массивные детали, предназначенные для передачи больших усилий: валки, бабы, подштамповые плиты. Основным требованием для них является высокая прочность.

В определенную группу можно выделить толстостенные цилиндры давления, реакторы, котлы, полые валы, штоки, ротора. Для них характерно наличие продольных и кольцевых швов большого сечения. Отдельную группу составляют шестерни, для которых необходима высокая жесткость, а для зубчатых элементов — контактная прочность при переменных нагрузках. Нередко сваркой соединены детали из материалов разного химического состава.

В энергетических машинах значительный объем составляют трубопроводы, фланцы, соединения труб с плоскими и криволинейными поверхностями, для которых основным требованием является прочность и жаропрочность.

Большая часть элементов машиностроительных сварных конструкций подвергается термической и механической обработке, в том числе и упрочняющей. В этом одна из основных их особенностей.

§ 2.3. Условия эксплуатации

К условиям эксплуатации обычно относят нагрузки, температуру, среду, с которой соприкасается сварное соединение, радиацию и время, в течение которого происходит действие перечисленных факторов.

Условия эксплуатации влияют главным образом на выбор материала, типов сварных соединений, способов сварки и послесварочной обработки сварных конструкций.

Влияние нагрузок весьма многообразно. Нагрузки различают по скорости их приложения и по продолжительности действия. Для статической нагрузки характерно относительно медленное ее приложение. Многократные статические нагрузки, следующие с частотой не более одного нагружения в секунду, условно относят к повторно-статическим. Более частые нагрузки, естественно, осуществляются с более высокой скоростью и меньшей продолжительностью действия в одном цикле. Нагрузки могут быть созданы как внешними воздействиями, например силами, так и собственными деформациями, например, при неравномерных нагревах и структурных превращениях. Внешние воздействия, как правило, характеризуют значениями сил и значительно реже уровнем перемещений.

Нагрузки в сочетании с формой сварных соединений и элементов конструкций образуют сложные распределения напряжений, от которых в большинстве случаев зависят прочность и работоспособность сварных соединений.

На первое место по силе влияния следует поставить циклический характер нагрузок, в особенности при большом числе циклов.

Ударный характер приложения нагрузок также относят к числу наиболее тяжелых режимов работы сварных конструкций. Многие стали чувствительны к увеличению скорости приложения нагрузок в области умеренно низких или даже положительных температур, в особенности при наличии концентраторов напряжений. Это предопределяет необходимость выбора металла с учетом термической обработки до и после сварки, достаточно плавных форм сварных соединений, повышенных норм контроля сварных соединений и самого металла.

Своеобразны условия эксплуатации, когда сварная конструкция имеет большую накопленную энергию из-за того, что под нагрузкой находятся значительные участки металла с высоким уровнем действующих напряжений. Это в первую очередь газопроводы большого диаметра, крупные сосуды со сжатым газом, сосуды из высокопрочных сталей,

в которых накопленная энергия упругих деформаций весьма значительна, а также другие сварные конструкции, разрушение которых сопровождается значительным освобождением энергии.

Большие сжимающие нагрузки требуют таких форм сварных конструкций, которые обеспечивают устойчивость. Тип сварных соединений в этом случае особенной роли не играет. На первый план выступают толщина применяемого металла и формы конструктивных элементов, которые должны обеспечить по возможности более высокие рабочие напряжения, близкие к пределу текучести металла. Сходные ситуации возникают при обеспечении требования жесткости.

Необходимость учета температурного фактора существенно зависит от металла. Типичными в этом отношении являются черные металлы. Если рассматривать прочность при различных температурах, не привлекая временной фактор продолжительного действия температуры, но иметь в виду возможную концентрацию напряжений в сварных элементах, то зависимость прочности от температуры схематично выразится (рис.2.3.1) двумя линиями: линией *1*, соответствующей прочности гладкого образца, и линией *2*, относящейся к образцу с острым надрезом. Левая часть кривой *2* относится к так называемой низкотемпературной хрупкости, когда металл очень чувствителен к концентрации напряжений. В области, где эта хрупкость отсутствует, прочности гладкого и надрезанного образцов примерно одинаковы. При продолжительном действии температуры и нагрузки проявляется ползучесть металла, и прочность определяется пределом длительной

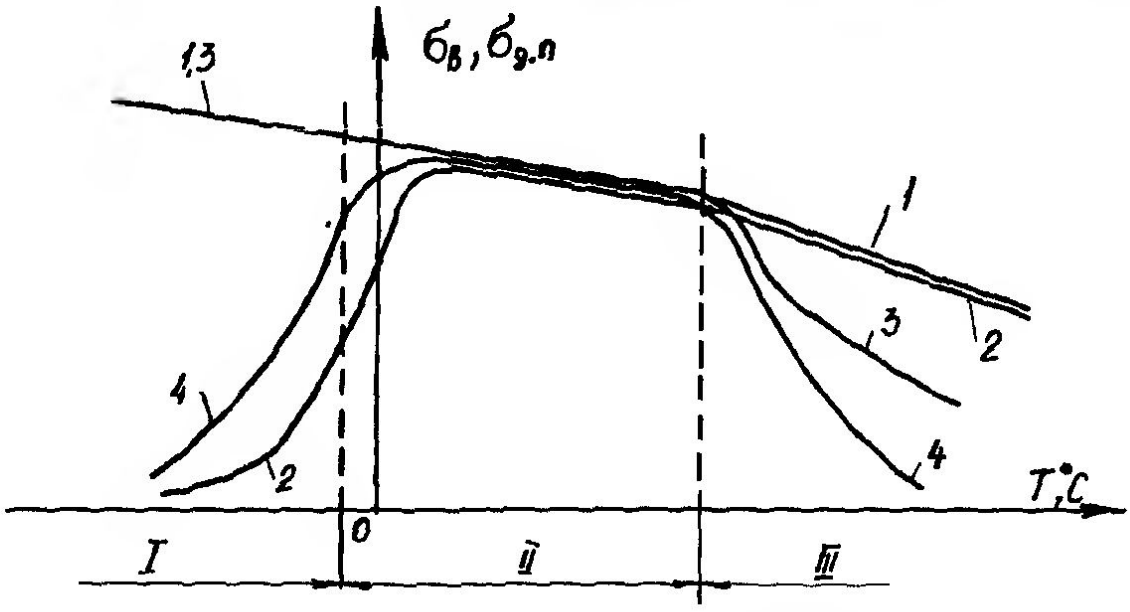


Рис. 2.3.1. Зависимость прочности от температуры:
1 — гладкий образец, кратковременное действие нагрузки; *2* — образец с острым концентратором при кратковременном приложении нагрузки; *3* — гладкий образец, длительное действие нагрузки; *4* — образец с надрезом, медленное и длительное приложение нагрузки.

прочности (кривая3). При этом прочность конструктивных элементов, имеющих концентрацию напряжений, выразится кривой *4*. В соответствии с рис.2.3.1 различают три характерные температурные области работы конструкций: область *1* — низкотемпературную (которая в общем случае может простираться и в область положительных температур), область *11*, где выраженная хрупкость и ползучесть отсутствуют, и область *111*, в которой рассматривается жаропрочность металла. Область низких температур диктует свои требования в отношении выбора металла из-за возможности отрицательного проявления низкотемпературной хрупкости. В области низких климатических температур (до минус 60-80 °С) удается обеспечить достаточно хорошую работоспособность сварных конструкций на основе применения сталей с невысокой степенью легирования, но, как правило, термически обработанных. Для диапазона умеренно низких температур (до минус 20-30 °С) при соответствующих видах соединений и конструктивных формах возможно применение дешевых конструкционных материалов. При криогенных температурах, как правило, необходимо использовать специальные стали и цветные сплавы, а также соответствующие им способы сварки.

В области высоких температур эксплуатации выбор соответствующего жаропрочного материала является решающим для обеспечения необходимой работоспособности сварной конструкции. По мере перехода к более высоким температурам применяют не только стали на железной основе, но и специальные сплавы на основе других металлов. Это влечет за собой использование специальных способов сварки и специальных сварочных материалов, а также последующей термической обработки.

К отдельному виду нагружения относят длительно действующие нагрузки в условиях высоких температур. Основным здесь является выбор металла, обладающего длительной жаропрочностью, и способа сварки, обеспечивающего получение сварных соединений, не уступающих по свойствам основному металлу [92]. Длительное воздействие температуры или ее изменение во времени по определенному закону, в том числе и без нагрузок, в ряде случаев может вызвать существенные изменения прочности и пластичности под влиянием изменения структурного состояния.

Сопутствующее эксплуатации действие температуры может вызывать весьма неблагопрятные аномальные ухудшения свойств металла вследствие протекания таких процессов, как деформационное старение металла, тепловое охрупчивание, отпускная хрупкость, замедленное разрушение и другие.

Воздействие фактора среды также крайне многообразно. Оно может иметь отрицательные последствия даже при отсутствии нагрузок,

вызывая, например, коррозию металла. В сочетании с нагрузками возможны коррозионное растрескивание и усталость.

Значительное влияние на выбор металла оказывает характер агрессивной среды [189]. Для ряда сред выбор соответствующего им металла является совершенно обязательным условием для создания работоспособной конструкции. Нередко необходима термообработка после сварки.

§ 2.4. Стоимость и условия производства

Стоимость изготовления сварной конструкции представляет собой один из главных факторов, который предопределяет выбор материала.

Наглядным примером в этом отношении является проблема хладостойкости сварных конструкций, изготавливаемых из обычных конструкционных сталей и эксплуатируемых в атмосферных условиях с температурами не ниже минус 60-70 °С. Эти конструкции довольно многочисленны — опоры линий электропередач, некоторые трубопроводы, мосты, строительная техника, транспортные конструкции, машины добывающей промышленности, работающие на открытом воздухе, и др. Многие из них работают при температурах ниже первой критической температуры хрупкости, когда не исключено внезапное разрушение с выходом конструкции из строя. Между тем существуют более дефицитные и дорогие марки сталей и технологии их производства, при которых хрупкие разрушения сварных конструкций при климатических низких температурах могут быть полностью исключены. Таким образом, проблема хладостойкости в определенной мере является не столько проблемой технической, сколько экономической. Значительное влияние фактор стоимости оказывает на сварные конструкции массового выпуска. Здесь проявляется возможность обеспечить существенную экономию средств за счет механизации и автоматизации производства, применения специальных приспособлений и транспортных средств, методов сварки, удобных для автоматизации, и т.д. Например, стоимость сложного по форме кузова автомобиля в десятки раз меньше, чем стоимость аналогичных конструкций при единичном способе их производства.

Экономический фактор влияет и в другом направлении. Более долговечные конструкции, если это не связано с их моральным старением, более выгодны. Именно более высокое качество сварных соединений в изделиях, для которых длительный ресурс их работы является одним из основных показателей, вызывает к жизни применение новых и специальных методов сварки, таких, как электронно-лучевая, лазерная, диффузионная и другие.

Условия производства сказываются и на некоторых особенностях сварных конструкций. От того, какие элементы технологического

процесса выполняются в цеховых, а какие в монтажных условиях, зависит характер расчленения сварной конструкции, формы конструктивных элементов и монтажных стыков, приемы выполнения сборочно-сварочных операций

§ 2.5. Материалы

Можно выделить три основных свойства материала, которыми он должен обладать по возможности одновременно.

1. Способность выполнять служебные функции, предусмотренные при создании сварной конструкции. Это качество зависит от прочности и пластичности металла при статической нагрузке, вязкости при его разрушении, выносливости при переменных нагрузках, жаропрочности и хладостойкости, коррозионной стойкости, удельной плотности и ряда других свойств.

2. Способность образовывать высококачественные сварные соединения при использовании разных способов сварки. Данное свойство часто называют свариваемостью, вкладывая в это понятие несколько различное содержание в зависимости от трудностей, которые приходится преодолевать в каждом конкретном случае. При этом подчеркивают либо равноценность сварных соединений с основным металлом по механическим и другим свойствам, либо возможность образовывать сварные соединения без дефектов технологического происхождения, либо простоту получения необходимых сварных соединений без особых операций защиты расплавленного металла, подогревов, последующей термической обработки и т.п.

3 Низкая чувствительность металла к различного рода концентраторам напряжений в разнообразных условиях эксплуатации.

Указанными выше свойствами металл сварной конструкции должен обладать не только в исходном состоянии, но и после сварки, не только за пределами шва, но и самом шве и в зоне термического влияния. Проблема пригодности металла для сварных конструкций и получения композиций сварочных материалов, обеспечивающих необходимые свойства шва, всегда была одной из главных при проектировании и производстве сварных конструкций. Этому вопросу посвящены многие труды [245, 150, 301].

В частном случае, когда идут по пути получения металла шва того же химического состава, что и основной металл, круг возникающих вопросов оказывается уже, но возможности выполнения сформулированных выше требований уменьшаются. Следует иметь в виду, что основные затруднения вызывает не столько обеспечение того или иного состава и механических свойств металла шва, сколько получение соединений, которые в целом не уступали бы исходному металлу.

Для большинства используемых в сварных конструкциях материалов характерно такое решение вопроса о сочетании основного и присадочного металлов, когда химический состав металла шва, хотя и отличается от основного, но не настолько сильно, чтобы эти металлы принадлежали к разным структурным классам. В отдельных случаях используют соединения, в которых шов существенно отличается от основного металла. Например, при сварке ряда среднелегированных сталей используют аустенитные электроды.

Реакция многих металлов высокой прочности на сварочный термический цикл такова, что околошовная зона становится слабым звеном сварного соединения. В ней происходит разупрочнение основного металла, заметное ухудшение вязких свойств, появление трещин в процессе сварки. Поэтому одним из главных свойств основного металла является его свариваемость.

§ 2.6. Сварные соединения и способы сварки

Одно из основных назначений сварки — укрупнение листовых, стержневых и объемных элементов. Причины укрупнения довольно разнообразны, например невозможность получения проката, отливок и поковок достаточно больших размеров, невозможность термически обработать деталь большой протяженности. В последнем случае сварку выполняют после термической обработки отдельных частей, и возможность использования такой технологии зависит от степени равноценности сварных соединений основному термически обработанному металлу.

С помощью сварки решают также проблему сочетания в одной детали различных по свойствам металлов. Это не только комбинированные детали, отдельные элементы которых получены различными технологическими способами, например ковкой или литьем, но и детали, состоящие из существенно различных по механическим свойствам элементов. Это также наплавленные детали, детали со специальными покрытиями и многие другие, объединяющие в себе различные свойства.

Использование сварки для тех или иных целей всегда должно сопровождаться ясным представлением о комплексе свойств сварного соединения, которые должны быть получены в результате сварки.

Так, связующие сварные соединения обеспечивают совместную работу отдельных элементов конструкции без существенных силовых нагрузок поперек шва. Поскольку по площади поперечного сечения сварное соединение составляет небольшую часть полного сечения детали, то зоны связующего соединения и шов могут иметь более низкую прочность, чем основной металл. Для них более важным является достаточная пластичность, чтобы не вызвать преждевременное

начало разрушения от какого-либо концентратора напряжений или случайного дефекта.

Роль связующего соединения выполняют также плоскости сопряжений в слоеных биметаллических деталях. Хотя перпендикулярно этим плоскостям или поверхностям могут действовать некоторые нагрузки, в большинстве своем они не являются расчетными, в первую очередь для этих мест важна пластичность и вязкость.

Для рабочего сварного соединения основной функцией является передача нагрузок. Поэтому требование равнопрочности становится главным. Если сварное соединение уступает по прочности, то это может приводить к увеличению массы конструкции, недоиспользованию возможностей основного металла.

Выбор тех или иных методов сварки зависит от конкретных условий производства, наличия оборудования, экономических соображений, доступности мест сварки, возможности обеспечить те или иные свойства сварных соединений. Круг учитываемых при этом вопросов огромен; он относится к металловедению, металлофизике и металлургии сварки. В конечном итоге все указанные соображения относятся к учету свойств сварных соединений, которые они будут иметь в условиях эксплуатации.

Выбор и разработка конкретной технологии всегда включает в себя некоторый компромисс между требуемыми свойствами и реальными возможностями их получения.

§ 2.7. Контроль качества

При производстве сварных конструкций широко применяют различные методы неразрушающего контроля, главным образом с целью обнаружения разного вида несплошностей, которые являются одной из основных причин понижения работоспособности сварных конструкций.

Как было показано в главе 1 (см. §1.3), технологические нормы качества и эксплуатационные требования должны существовать параллельно, так как преследуют различные цели. Нередко конструктора удовлетворяют нормы качества, изложенные в заводских или отраслевых инструкциях, и поэтому дополнительные требования ими не указываются. Это не должно давать повода к объединению этих двух видов документов. Нередко встречаются ситуации, когда эксплуатационные требования оказываются выше технологических. Тогда необходимо организационно-техническими мероприятиями повышать культуру производства и контроля качества.

Существующие ГОСТ 22368-77 "Контроль неразрушающий. Классификация дефектности стыковых сварных швов по результатам ультразвукового контроля" и ГОСТ 23055-78 "Контроль неразрушаю-

щий. Сварка металлов плавлением. Классификация сварных соединений по результатам радиографического контроля" имеют структуры классификации, приспособленные к особенностям указанных методов контроля и построенные в порядке возрастания уровня дефектности. Эти структуры, отвечающие технологическим требованиям, не могут быть приспособлены к эксплуатационным требованиям. Например, в один и тот же класс дефектности по ГОСТ 23055-78 включены дефекты диаметром 0,2 и 5,0 мм для различных толщин. Такие дефекты с позиций прочности могут представлять совершенно различную опасность для многих видов предельных состояний. Поэтому рекомендация о "целесообразности одновременного использования двух расчетных моделей — технологической и эксплуатационной" [28] может быть использована только в том случае,если технологические и эксплуатационные требования совпадают структурно как по видам дефектов, так и по ступеням размеров дефектов. Такое вряд ли возможно, так как с помощью одного и того же процесса сварки выполняют одинаковые швы, работающие в разных условиях и при различных напряжениях. Эксплуатационные требования здесь будут различными, в то время как технологические окажутся одинаковыми. Достигнутый уровень науки о прочности таков, что он позволяет разработать процедуру определения предельных размеров дефектов, исходя из эксплуатационных требований. Рассчитывать на то, что эти требования можно будет расклассифицировать на группы и указывать каждый раз лишь класс дефектности, не следует, так как слишком велико число вариантов нагрузок и условий эксплуатации. Не следует также рассчитывать на то, что каждый раз дефектоскописты смогут давать исчерпывающую информацию о кривизнах несплошности по всей ее поверхности. Известно,что наибольшую опасность представляют участки несплошности, имеющие малый радиус кривизны (менее 0,2 мм). Эти участки равноценны трещине. Несплавления и непровары по характеру своего влияния также должны быть приравнены к трещине, а в некоторых случаях при хрупких разрушениях они даже более опасны.

Нередко при принятии решения, к какой категории дефектов отнести ту или иную несплошность, лица, несущие ответственность за качество выпускаемой продукции, в том числе и сами дефектоскописты, будут склонны рассматривать неясный дефект как трещину. Таким образом, одной из характерных особенностей сварных конструкций следует считать присутствие у них трещиноподобных несплошностей. Следует заметить, что в этом повинен не только процесс сварки, но и предшествующие ему процессы получения заготовок: литье, ковка, прокатка, термическая обработка, многие дефекты от которых также должны быть приравнены к трещиноподобным. В свете изложенного многие требования (как технологические, так и эксплуатационные), строго указывающие на необходимость полного отсутствия в конструк-

ции трещин, звучит наивно. Так как в качестве трещин могут выступать и другие виды дефектов, правильнее было бы указывать, что в конструкции не должны быть несплошности выше определенного размера, но при этом, естественно, необходимо ориентироваться на возможно более высокий уровень выполнения сварного соединения, а не на те размеры несплошностей, которые можно допустить при благоприятных условиях эксплуатации. Такой подход существенно упростил бы как технику контроля, так и структуру требований к качеству продукции. Следует также заметить, что выполнение требования о полном недопущении какого-либо дефекта автоматически предполагает 100 %-ный контроль не только участков сварных соединений, но и всего объема металла конструкции, находящегося под опасным уровнем напряжений.

Эксплуатационные требования, даже если они совпадают с технологическими, диктуют совершенно иные объемы контроля. Контроль технологического процесса почти всегда может быть выборочным, по объему незначительным и по точности определения размеров дефектов нестрогим. Устранение выявленных при технологическом контроле дефектов, как справедливо подчеркнуто в [28], не имеет смысла, так как в непроконтролированной части продукции их сохраняется столько же. Отнесение к браку изделий, у которых дефекты выходят за пределы технологических норм, безусловно, необходимо как форма санкций против лиц, ответственных за допущенный брак. Контроль по эксплуатационным требованиям может быть не 100 %-ным, если назначение контролируемых деталей таково, что их разрушение и замена в условиях эксплуатации вызывает умеренный материальный ущерб и не нарушает безопасности людей. В этом случае возможна оптимизация объема контроля с учетом стоимости производства деталей и возможности выхода их из строя во время эксплуатации [28]. Когда выход из строя конструкций, к которым предъявлены обоснованные требования по сплошности, сопряжен с большим материальным ущербом, то применение 100 %-ного контроля становится оправданным. Способы определения предельных размеров несплошностей в сварных соединениях, которые могут быть допущены конструктором в особых условиях с учетом эксплуатационных требований рассмотрены в главе 14.

Глава 3

ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

§ 3.1. Предельные состояния и свойства сварных соединений

Состояния конструкций или деталей, когда их эксплуатация считается невозможной, опасной или нежелательной, носят названия предельных состояний. Наступление текучести, потеря устойчивости, появление течи, образование трещины в детали — все это примеры предельных состояний. Чаще всего наступление предельного состояния связывают с появлением в металле, детали или элементе конструкции какого-то явления или процесса. Но в некоторых случаях в качестве предельных состояний принимают момент, когда достигается определенный количественный уровень того или иного параметра, например прогиб балки заданной величины, определенное удлинение металла при ползучести и т.д.

Следует подчеркнуть различие между предельным состоянием и допустимым эксплуатационным состоянием. Между ними должна существовать некоторая разница, например в уровне нагрузок или температур, которая регламентируется техническими условиями, путем установления требуемых коффициентов запаса, т.е. конкретных значений отношения нагрузок предельных и эксплуатационных.

Иногда приходится рассматривать возможность наступления в одной и той же детали нескольких предельных состояний. Например, в сварном раскосе фермы, работающем при переменных растягивающих и сжимающих нагрузках, возможными предельными состояниями будут: наступление текучести, потеря устойчивости (при сжатии), появление трещины усталости или разрушение в момент приложения максимальной растягивающей нагрузки.

Наиболее опасными предельными состояниями следует считать различные виды разрушений [285]. Наступление текучести, хотя и используется часто в расчетах для определения требуемого сечения элементов, не относится к аварийно опасным, так как вызывает лишь нарушение размеров вследствие пластических деформаций.

В большинстве случаев конструкции проектируют так, чтобы предельное состояние в них в период эксплуатации не наступало. В некоторых случаях, если достижение предельного состояния не вызывает аварийной ситуации, предусматривают возможность ремонта конструкции или замены узла тогда, когда предельное состояние уже наступит.

Степень близости эксплуатационного состояния к предельному может быть различной, что оценивают вероятностью ненаступления предельного состояния. Считается, что чем больше вероятность ненаступления предельных состояний, тем выше уровень работоспособности сварной конструкции.

Под работоспособностью сварных конструкций понимают их способность сопротивляться наступлению тех предельных состояний, которые ограничивают их нормальную эксплуатацию. Имеются в виду не только предельные состояния, наступление которых связано с действием нагрузок, но также и такие, как коррозионная стойкость, герметичность,сопротивление потоку и другие. В отличие от работоспособности, под несущей способностью обычно понимают сопротивляемость конструкций наступлению предельных состояний, связанных с действием нагрузок. Понятие работоспособности и несущей способности относят не только к сварным конструкциям, но и к отдельным сварным соединениям.

В ряде случаев отождествляют понятие несущей способности и прочности, понимая под последней в широком (инженерном) смысле слова способность материала, сварного соединения, детали или конструкции сопротивляться не только разрушению, но и наступлению текучести, потере устойчивости, распространению трещин и другое. В более узком, научном смысле слова, под прочностью следует понимать только сопротивление разрушению.

Сварные соединения характеризуются рядом свойств. Для несущей способности наиболее важны механические свойства сварных соединений, т.е. их способность сопротивляться деформированию и разрушению под действием внешних механических сил. Прочность, пластичность, вязкость, жесткость — это все отдельные виды механических свойств. Высокая работоспособность сварных конструкций во многих случаях зависит от механических свойств сварных соединений, реже от их физических или химических свойств, например таких, как электропроводводность, сопротивление коррозии, плотность и др.

Свойства сварных соединений отличаются от свойств основного металла, так как они формируются под влиянием весьма многочисленных факторов. Это исходный основной металл, сварочные материалы, воздействие источников энергии, сложные процессы плавления и кристаллизации металла в процессе сварки, взаимодействие его с окружающими жидкими и газовыми компонентами, структурные превращения при воздействии изменяющихся температур, случайное возникновение разного рода несплошностей и другие. Ввиду большого числа факторов, свойства сварных соединений могут изменяться в крайне широких пределах. Основная задача при организации технологического процесса состоит в ограничении возможных вариантов и смещении их в по возможности в благоприятную сторону, имея в виду,

что одной из характерных особенностей механических свойств сварн соединений по сравнению с основным металлом является их бо значительное рассеяние.

Второй и, пожалуй, главной особенностью большинства сварн соединений является неоднородность свойств отдельных участк сварного соединения. Это относится как к механическим, так и физическим и химическим свойствам.

Третья особенность сварных соединений связана с их форм вызванной не только условиями их образования, но и возможны дефектами сплошности, что предопределяет в ряде случаев весь высокую концентрацию напряжений. Концентрация пластическ деформаций в процессе сварки и термическое воздействие мог вызывать у ряда сталей деформационное старение, что край неблагоприятно сказывается в отношении их хладостойкости.

Четвертая особенность сварных соединений связана с наличи в них в большинстве случаев высоких остаточных собственных напряж ний. Остаточные напряжения сами по себе не способны измени свойства металла, но в некоторых случаях могут существенно влия на механические свойства сварного соединения в целом, когда возн кает взаимодействие остаточных напряжений с эксплуатационными.

Необходимо также указать на особенность листовых сварн конструкций, которая связана с третьей и четвертой особенностям сварных соединений, а также с условиями их сборки. Имеется в ви такое искажение формы листовой конструкции, вызывающее пружинение, которое не устраняется пластическими деформациям возникающими при приложении нагрузок (рис. 3.1.1).

Таким образом, механические свойства сварных соединен зависят от свойств металла отдельных его участков, геометрическ форм сварного соединения, остаточных напряжений и степени рассе ния каждого из указанных факторов.

Следует различать простейшие механические свойства метал отдельных участков сварного соединения и механические свойст сварного соединения в цело Простейшие механические свойс ва металла отдельных зон оценив ют временным сопротивлением пределом текучести, относител ным удлинением и поперечны сужением, определяемыми н круглых цилиндрических образц при статическом растяжении.

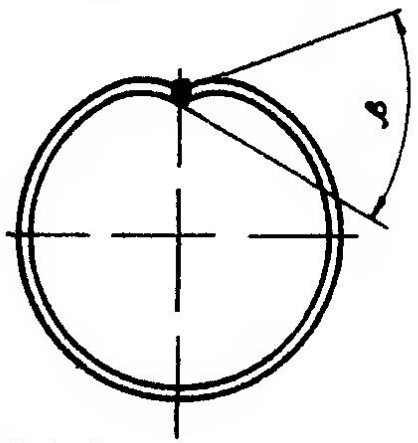


Рис. 3.1.1. Угловая деформация при сварке продольного шва обечайки

Сравнительно экономной в определении и достаточно информативной является твердость металла. Ее распределение в сечении сварного соединения при наличии корреляционных зависимостей между твердостью и другими простейшими механическими свойствами позволяет судить об уровне прочности отдельных зон, а также о степени неоднородности механических свойств. По твердости можно приближенно судить о структурном состоянии металла.

Свойства однородного металла оценивают также многими другими характеристиками: ударной вязкостью, волокнистостью поверхности разрушения, сопротивлением усталости, вязкостью разрушения при наличии в металле трещины и т.д.

Свойства сварных соединений оценивают в ряде случаев теми же характеристиками или критериями, что и однородный основной металл, но при этом в них вкладывают иное содержание. Например, распространенной характеристикой прочности является временное сопротивление $\sigma_в$. Можно говорить о временном сопротивлении металла шва или металла околошовной зоны, если образцы взяты достаточно малыми, чтобы содержать в себе относительно однородный по свойствам металл. Временное сопротивление сварного соединения $\sigma'_в$, напротив, следует определять на достаточно крупных образцах, которые бы включали в себя все типичные зоны сварного соединения и обеспечивали такое взаимодействие их между собой, которое характерно для работы сварного соединения в конструкции. Такая характеристика, как предел текучести сварного соединения, в большинстве случаев вообще не может быть определена, так как, во-первых, из-за неоднородности механических свойств пластические деформации возникают не по всей длине образца одновременно, во-вторых, пластические деформации неравномерны в поперечном сечении образца из-за эффекта контактного упрочнения, в-третьих, натуральное сварное соединение с неснятым усилением создает концентрацию напряжений и даже может иметь собственные напряжения, что в принципе делает поле напряжений в образце неоднородным. Предел выносливости сварного соединения следует определять для практических целей также на достаточно крупных образцах, содержащих в себе все особенности сварного соединения, в том числе и остаточные напряжения, хотя последнему условию часто трудно удовлетворить из-за необходимости увеличения размеров образца.

Таким образом, механические свойства сварных соединений — это их способность сопротивляться деформировнию и разрушению под воздействием внешних и собственных механических сил в условиях характерной для сварных соединений концентрации напряжений, неоднородности свойств и собственных напряжений.

§ 3.2. Целевое назначение испытаний и расчетов сварных соединений и конструкций

Одна из главных задач науки о прочности состоит в определении степени соответствия материала и, в частном случае, сварных соединений тем эксплуатационным условиям, которые возникают в конструкциях. Наиболее естественным путем определения свойств является экспериментальный. Однако воспроизведение реальной обстановки в условиях лаборатории осложняется несколькими существенными обстоятельствами. Во-первых, сложным характером воздействий, которые встречаются в условиях эксплуатации. Во-вторых, многообразием вариантов эксплуатационных условий. В-третьих, тем, что деталь в процессе работы, как правило, не должна переходить в предельное состояние нередко многие годы. Следовательно, испытание должно быть ускорено путем усиления действия тех или иных факторов. Но каких — нагрузок, размеров дефектов, частоты нагружения? По крайней мере, только для решения этих последних вопросов уже требуется расчетный аппарат науки о прочности. Сложилась определенная система взаимодействия экспериментального и расчетного начал в науке о прочности. Эта система непрерывно изменяется в зависимости от успехов в той или иной отрасли знаний. Цель ее состоит в определении разнообразными средствами свойств материалов, деталей, сварных соединений и конструкций. Частные задачи, которые ставят перед испытаниями, обычно состоят в следующем.

1. Контроль свойств при приемке и сдаче продукции. Для этой цели отбирают отдельные изделия или изготовляют специальные образцы, чтобы путем испытаний определить их соответствие установленным требованиям. При этом используют, как правило, простейшие и недорогие виды испытаний, обычно стандартные.

2. Сравнение между собой различных металлов, вариантов технологических процессов, способов сварки, термической обработки с целью выбора лучшего варианта. Эти испытания также часто являются стандартными, но в некоторых случаях сравнение ведут на основе специальных критериев, которые более точно отвечают условиям эксплуатации, или даже на основе данных натурных испытаний.

3. Получение количественных характеристик, которые предназначены для оценки несущей способности соединения, узла или сварной конструкции. Результаты таких испытаний используются либо для непосредственной оценки испытуемого объекта, либо должны служить в качестве исходной информации для последующих расчетных оценок на основе теории или расчетной схемы.

4. Оценка опасности дефектов. Исследования в этом случае проводят, чтобы установить закономерности влияния различных видов дефектов в конкретных условиях нагрузок, сред, температур.

5. Установление причин непредвиденных разрушений. Испытания в этих случаях могут иметь самый различный характер: от простейших, когда необходимо определить стандартные свойства, до совершенно оригинальных, если необходимо раскрыть и понять природу ранее неизученного явления.

6. Поисковые исследования, когда путем испытаний в различных условиях пытаются найти причины слабо изученных явлений, установить или вскрыть новые закономерности.

Очевидно, что сложившееся "разделение труда" между испытателями и расчетчиками выдвигает определенные требования к организации испытаний, по крайней мере в той части, которая связана с количественной оценкой уровня работоспособности конструкций. Так как экспериментальные данные являются первичной информацией и их использованием строится вся система оценок науки о прочности, грамотный подход в вопросе о том, что и как испытывать, должен быть основным в организации испытаний.

К сожалению, в литературе опубликовано огромное количество экспериментальных данных, которые были получены без предварительных глубоких размышлений о целях исследования и которые не могут быть использованы ни для практических, ни для научных целей.

Рассмотрим некоторые вопросы организации испытаний Обычно стремятся поставить испытуемый объект в такие условия, чтобы достичь наступления предельного состояния. Во время эксплуатации сварных конструкций такое явление в общем случае довольно редкое и оно обычно вызывается либо серьезным нарушением нормальных условий эксплуатации, либо отклонением размеров, форм и свойств сварных соединений от предусмотренных, либо ошибками в проектировании и изготовлении. Регистрировать наступление предельных состояний конструкций с соответствующей аппаратурной записью происходящих процессов удается лишь при специальных испытаниях. Вследствие высокой стоимости таких испытаний чаще идут по другому пути. На основе какой-либо теоретической модели разрабатывают методы испытаний, пригодные для лабораторных условий. При этом стремятся обеспечить по возможности более близкое соответствие лабораторных условий испытаний реальным, чтобы уменьшить количество принимаемых допущений.

Важным вопросом является выбор способа усиления фактора, действующего в условиях эксплуатации. Если ограничиться воспроизведением эксплуатационных условий, то предельное состояние может вовсе не наступить или для его возникновения необходимо весьма продолжительное время. В ситуациях, связанных с действием нагрузок, чаще всего прибегают к их увеличению по сравнению с эксплуатационными. Могут быть и другие пути, например усиление действия того или иного фактора. Однако использование усиливающего действия

факторов обязательно должно выполняться на базе какой-либо теории или обоснованной расчетной модели. Проведение форсированных испытаний без четкой теоретической модели может привести к серьезным недоразумениям и ошибкам.

Должен быть обоснован выбор критерия или нескольких критериев, по которым ведется оценка свойств. Критерии должны быть достоверно регистрируемыми, а если их определяют путем последующего промежуточного расчета, то должна быть уверенность, что этот расчет не содержит в себе существенных допущений. Уместно в связи с этим подчеркнуть, что во время большинства механических испытаний регистрируют непосредственно только две величины — силу и перемещение, все остальное многообразие критериев получают путем последующих пересчетов.

Крайне желательно, чтобы выбранные критерии могли быть использованы для расчета наступления предельных состояний, а не служить только мерой сравнения при однотипных условиях.

Достаточность свойств сварных соединений для обеспечения их нормальной работы в конструкциях, т.е. меру или уровень работоспособности можно оценивать различными способами. Один из прогрессивных современных методов заключается в определении надежности — вероятности ненаступления предельных состояний, ограничивающих нормальную работу изделия. Менее совершенным методом оценки, но весьма распространенным в практике, является определение коэффициента запаса как отношения численного уровня критерия, при котором наступает предельное состояние, к численному уровню аналогичной величины, достигаемой в процессе эксплуатации.

В практике часто применяют и более простые, но менее совершенные критерии работоспособности. Например, требование в отношении достаточной работоспособности сварного соединения часто сводят к тому, чтобы свойства металла отдельных зон сварного соединения и сам шов совпадали со свойствами основного металла или были весьма близкими к нему. В этом случае фактор неоднородности свойств исключают.

Достаточно элементарным в случае наличия неоднородности свойств является также подход, когда о прочности, пластичности или вязкости соединения судят по свойствам наиболее слабой зоны. Ограничиваются при этом определением прочности и пластичности наплавленного металла, ударной вязкости и угла загиба отдельных зон соединения, хотя при этом участвуют в работе и соседние участки, и по ним судят о свойствах соединения в целом.

Хотя в большинстве случаев свойства отдельных зон или свойства соединения не совпадают со свойствами основного металла, однако это не означает, что работоспособность сварной конструкции должна

оказаться ниже работоспособности аналогичной конструкции без сварных соединений.

Значительным шагом вперед в оценке свойств сварных соединений по механическим свойствам отдельных зон явились работы О.А.Бакши, позволившие установить ряд расчетных и экспериментальных корреляционных зависимостей между размерами зон и уровнем их свойств, с одной стороны, и свойствами сварных соединений, с другой [6]. При расчетном переходе от свойств отдельных зон к свойствам сварных соединений, от известных свойств сварных соединений к свойствам сварной конструкции в целом неизбежны неточности, вытекающие из неполного совершенства существующих теорий и недостаточности исходной информации. Это предопределяет несовпадение расчетной и конструкционной прочности и также должно приниматься во внимание при определении уровня работоспособности.

В методах оценки работопособности сварных соединений и элементов сварных конструкций, независимо от того, какое предельное состояние используется, в явном или неявном виде присутствуют два начала — одно, связанное с напряженно-деформированным состоянием объекта, другое — со свойствами металла.

Напряженно-деформированное состояние в большинстве случаев определяют расчетным путем аналитически или численно; реже используют экспериментальные методы. Следует подчеркнуть, что знание только напряженно-деформированного состояния еще не позволяет дать ответ на вопрос о прочности соединения, о возможности его разрушения. Это вытекает хотя бы из того обстоятельства, что в расчетах напряженно-деформированного состояния участвуют такие характеристики металла, как модуль упругости, диаграмма деформирования металла и другие, которые не имеют прямой связи с характеристиками, ответственными за разрушение металла.

Механические свойства металлов и сварных соединений определяют обычно экспериментальным путем. Роль расчета состоит в том, чтобы с его помощью определить так называемую левую часть равенства, в которой находится та или иная характеристика напряженно-деформированного состояния, а в правой части присутствует характеристика механического свойства. Сравнение этих двух величин является заключительной стадией расчета при принятии решения о допустимости тех или иных состояний.

Из изложенного выше положения о том, что расчет на прочность в общем случае состоит из сравнения двух характеристик, каждая из которых принадлежит к своему классу величин, вовсе не вытекает, что расчет напряженно-деформированного состояния не играет никакой роли в определении механических свойств металлов. Напротив, подавляющее большинство современных характеристик механических свойств может быть определено и вычислено только путем привлечения расчета

напряженно-деформированного состояния испытываемого образца. Например, определение критического коэффициента интенсивности напряжений K_c и многих других критериев механики разрушения возможно лишь в том случае, если результаты испытаний обработаны с применением расчетов, позволяющих определить деформированное состояние в момент достижения критических условий.

Следует четко различать между собой критерии напряженно-деформированного состояния и критерии механических свойств, если даже они имеют близкое звучание и буквенное обозначение. В этом отношении характерным является положение в механике разрушения. Иногда слова "коэффициент интенсивности напряжений," которые в прямом своем значении относят к характеристике напряженно-деформированного состояния K, могут в контексте означать и механическую характеристику металла K_c — критический коэффициент интенсивности напряжений, т.е. совершенно другое понятие. Для определения тех и других используют один и тот же расчетный аппарат, и те и другие называют критериями механики разрушения. Однако это не должно давать повода для их отождествления и создавать впечатление, что для расчета на прочность достаточно лишь найти напряженно-деформированное состояние рассчитываемого объекта без привлечения механических характеристик металла.

Простейшие методы расчета по средним напряжениям обычно не нуждаются в каких-либо сложных методах определения напряженно-деформированного состояния.

Учет концентрации напряжений, определение напряжений вблизи трещин, расчет за пределами упругости, в особенности при неоднородных механических свойствах и сложной геометрической форме тел, привели к развитию многих эффективных методов расчетного и экспериментального определения напряженно-деформированного состояния, без которых невозможно использование современных методов расчета на прочность. Этому посвящена гл. 5.

§ 3.3. Неравнопрочность сварного соединения и требования к испытаниям

Главная задача испытаний сварных соединений со свойствами, не совпадающими со свойствами основного металла, состоит в том, чтобы установить действительную степень неравнопрочности. Искусственно воспроизведенная неравномерность свойств, не соответствующая возможным ситуациям, порождает необоснованное сомнение в отношении действительной работоспособности сварного соединения. Поэтому выбор усиливающего воздействия при организации испытаний, предназначенных для использования в расчетах, имеет не только теоретическое, но и большое практическое значение.

Обсуждаемые ниже вопросы относительно рациональных и обоснованных подходов к испытаниям сварных соединений в значительно меньшей мере относятся к испытаниям, предназначенным для контроля или выбора подходящих вариантов технологического процесса, когда требуется лишь качественная оценка, не влияющая на принимаемые конструкционные решения.

Рассмотрим статически нагруженный элемент, имеющий сварное соединение Основным предельным состоянием для случая статического нагружения принимают в расчетах наступление текучести металла, которое является нежелательным из-за большой изменяемости размеров детали после начала ее текучести. Допускаемое напряжение устанавливают, ориентируясь на предел текучести основного металла, с учетом возможного его рассеяния, превышения нагрузки и уменьшения поперечного сечения элемента. Коэффициент запаса $n_т$ по предельному состоянию наступления текучести составляет при этом отношение $\sigma_т$ к эксплуатационному напряжению $\sigma_э$. Существует большое число факторов, вызывающих снижение прочности сварного соединения по сравнению с основным элементом. Это и пониженные значения $\sigma_т$ в зонах высокого отпуска, неоднородность механических свойств, значительное рассеяние механических характеристик вследствие колебаний параметров режима сварки, химического состава, присутствие различных концентраторов как неизбежных (форма шва), так и дефектов в виде различных несплошностей.

По указанным причинам для сварных соединений при статических нагрузках необходимо рассматривать оба предельных состояния как наступление текучести, так и разрушение. Рассмотрим роль этих двух предельных состояний в обеспечении нормальной эксплуатации и уместные подходы к их определению опытным путем. Наступление текучести сварного соединения, если оно происходит при $\sigma < \sigma_т$ ($\sigma_т$ — предел текучести основного металла), представляет куда меньшую опасность, чем текучесть основного металла. Объясняется это тем, что текучесть сварного соединения охватывает очень небольшой объем металла и поэтому играет небольшую роль в изменяемости формы конструкции.

Таким образом, не сам факт наступления текучести сварного соединения, а уровень изменяемости размеров и формы конструкции является определяющим для суждения о допустимости течения сварного соединения. Наступление текучести в основном элементе априорно означает из-за его, как правило, больших размеров, возможность существенного искажения конструкции. В сварном соединении это является исключением.

Рассмотрим особенности наступления предельного состояния разрушения. В основном металле при вязком его состоянии разрушение

считают наступающим по достижении напряжением уровня временного сопротивления $\sigma_в$. Получающийся при этом коэффициент запаса по разрушению $n_р = \frac{\sigma_в}{\sigma_э}$ следует рассматривать не как требуемый, а как естественно сложившийся. При другом соотношении $\sigma_в$ и $\sigma_т$ он мог бы оказаться другим.

Существенными являются условия определения уровня разрушающей нагрузки для сварного соединения, которое, как правило, не является однородным ни по механическим свойствам, ни по напряженному состоянию. Условия работы сварного соединения радикальным образом изменяются при переходе основого металла элемента из упругого состояния в пластическое. Но в действительности во время эксплуатации такое состояние исключено из-за невозможности перехода основного элемента в состояние общей текучести. Поэтому определение уровня разрушающей нагрузки для сварного соединения в условиях, когда основной металл течет, неправомерно. Исследование несущей способности сварного соединения при статической нагрузке должно выполняться путем усиления действия тех отрицательных факторов, которые в действительности на практике могут привести к его разрушению. Это в первую очередь уменьшение сечений угловых швов, снижение $\sigma'_т$ и $\sigma'_в$ наплавленного металла в стыковых и угловых швах, усиление степени разупрочнения мягких прослоек, увеличение их размеров, присутствие различных концентраторов или дефектов, в том числе трещиноподобных.

Неприемлемость уровней нагрузок, создающих в основном металле при испытаниях $\sigma_э > \sigma_т$, может быть показана на примере стыковых соединений с мягкой прослойкой. После начала текучести основного металла эффект контактного упрочнения в мягкой прослойке существенно ослабевает и может быть сделано неверное заключение о значительной неравнопрочности сварного соединения.

Во многих случаях неравнопрочность сварных соединений существенно зависит от концентрации напряжений. Это, во-первых, случаи статического нагружения сварных соединений с ограниченной пластичностью металла, вызванной либо хрупким состоянием металла, например, от низких температур, либо высоким уровнем прочности и повышенной чувствительностью металла к концентрации напряжений. Во-вторых, это прочность при переменных нагрузках, которая в основном зависит от концентрации напряжений. Следует отметить особую роль испытаний для этих случаев, поскольку экспериментальный путь остается практически единственным для ее определения. С появлением численных методов расчета концентрации напряжений роль испытаний как инструмента для получения обобщающих данных возрастает.

Двоякая природа концентрации напряжений в сварных соединениях (от формы шва и от неравномерности передачи сил по длине

швов) позволяет ввести принципы расчленения в организацию испытаний сварных соединений. Этот принцип заключается в следующем. Испытанию подвергают отдельный участок соединения, например с лобовым или фланговым швом, чтобы определить его прочность или пластичность, зависящие только от концентрации напряжений, вызванной формой и размерами шва. Полученная информация в дальнейшем служит для предсказания прочности сложных сварных соединений, в которых имеет место концентрация напряжений по длине швов. Эта концентрация может быть определена расчетным или экспериментальным путем. Испытание сложных сварных соединений следует рассматривать как метод контрольной проверки предсказываемых результатов и как метод определения конструкционной прочности.

Метод расчленения в испытаниях сварных соединений особенно целесообразен для определения пределов выносливости. Наибольший перерасход металла ощущается в сварных конструкциях, работающих при переменных нагрузках, так как конструкторы, не располагая развитым расчетным аппаратом определения выносливости сложных соединений, вынуждены ориентироваться на наиболее неблагоприятные случаи и завышать сечения несущих элементов. Для практической реализации этого подхода необходим доступный метод определения обоих видов концентрации напряжений в сварных соединениях. Первые шаги в этом направлении сделаны на базе численных методов и введения понятия механической модели углового шва, что позволяет раздельно определять два вида концентрации напряжений (см. гл.5).

§3.4. Коэффициенты запаса

Понятие вероятности неразрушимости в практике проектирования сварных конструкций пока используют редко, обычно оценку ведут по коэффициентам запаса.

Следует различать требуемое (установленное) значение коэффициента запаса и его фактическое значение. Установленное значение коэффициента запаса формируется под влиянием очень многих факторов, не только технических, но также экономических, организационных, конъюнктурных и др .

Требуемый коэффициент запаса определяет как безопасность эксплуатации конструкций, так и их экономичность. Эти два требования находятся в некотором противоречии. Облегчение конструкции с целью повышения ее показателей возможно лишь в разумных пределах, пока это не идет во вред безопасности ее эксплуатации. Требуемые коэффициенты запаса обычно регламентированы нормативными документами и присутствуют в неявном виде, например в виде допускаемого напряжения, которое заметно ниже напряжения, соответствующего

возникновению предельного состояния. В некоторых случаях требуемый коэффициент запаса может быть указан в виде конкретного числа. Несмотря на то что практика расчетов с использованием коэффициентов запаса исчисляется многими десятилетиями, теория этого вопроса разработана еще недостаточно [148]. Обычно оценка коэффициента запаса в расчетах на прочность идет по уровню напряжений, например в виде отношения критического напряжения к эксплуатационному.

В проектных методах расчета часто используют нормативное значение предела текучести $\sigma_т$ или временного сопротивления $\sigma_в$ для определенных марок сталей. Эти значения приводят в качестве справочных для последующего определения по ним расчетных сопротивлений или допускаемых напряжений.

Указанное в справочниках нормативное сопротивление $\sigma_в$ означает тот уровень прочности, ниже которого металлургические заводы не должны выпускать конкретную марку стали. Сталь при этом часто имеет более высокий уровень прочности, чем нормативное значение. Графически распределение свойств фактически выпускаемой марки стали выглядит, как показано на рис.3.4.1. Сталь со значениями $\sigma_в$ ниже, чем $\sigma_{в\ норм}$, металлургическим заводом отбраковывается. Казалось бы, что в этом случае не следует вводить какие-либо коэффициенты запаса на механические свойства материала. На самом деле коэффициенты запаса на свойства материала $n_м$ несколько выше единицы вводятся. Объясняется это тем, что имеется рассеяние свойств металла даже в пределах одного листа, а тем более плавки. Отдельные детали, изготовленные из одного листа, могут иметь свойства несколько более низкие, чем $\sigma_{в\ норм}$. Смысл вводимого коэффициента запаса в этом случае заключается в учете неточностей, связанных с определением механических свойств металла на ограниченном числе образцов и невозможностью отыскания минимальных значений.

Введение коэффициентов запаса на размеры швов и на размеры выявленных несплошностей имеет различное назначение. Размеры швов, например угловых, имеют характер рассеяния, близкий к закону нормального распределения (рис.3.4.2). Нет полной уверенности, что в каждом соединении обязательно встретятся участки с отклонениями от K^* как в меньшую, так и в большую сторону. Кроме того, возможны непровары в корне угловых швов, что уменьшает расчетное сечение. Коэффициент запаса на расчетное сечение шва в этом случае призван увели-

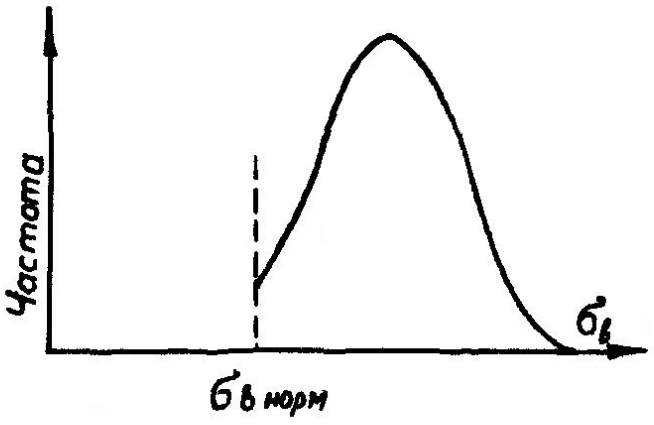


Рис. 3.4.1. Гистограмма распределений значений $\sigma_в$

чить катет, указываемый на чертежах, или толщину металла для стыковых швов.

Используемые в контрольных расчетах размеры уменьшающих прочность несплошностей, приходится увеличивать, вводя коэффициенты запаса, ввиду возможных ошибок и неточностей при определении их размеров неразрушающими методами. Здесь назначение коэффициента запаса иное, чем при определении необходимых размеров катетов угловых или сечений стыковых швов.

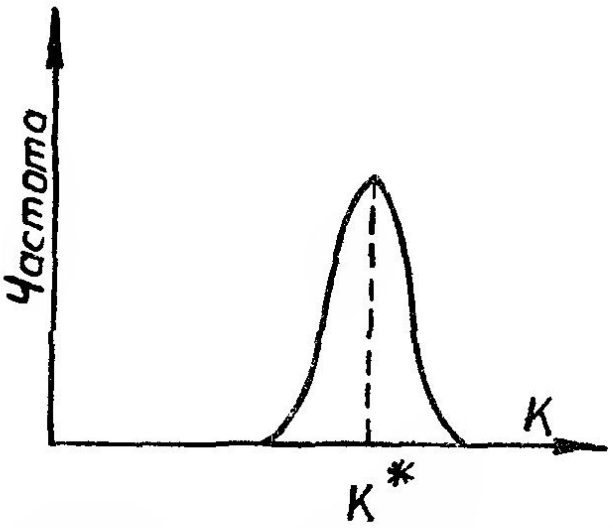


Рис. 3.4.2. Гистограмма распределений размеров угловых швов *K*

Необходимо также отметить целесообразность введения коэффициентов запаса при определении напряженно-деформированного состояния сварных соединений. Что касается установления уровня рассеяния максимальных нагрузок за длительный период эксплуатации сварных конструкций, то это прямого отношения к сварным соединениям не имеет, и в большинстве расчетов нагрузка считается заданной без необходимости введения коэффициента запаса Если запас необходим, то он должен быть учтен расчетчиками конструкций до выдачи нормативных нагрузок расчетчикам сварных соединений. Необходимость введения коэффициента запаса при определении напряженно-деформированного состояния (НДС) сварных соединений диктуется тем, что применяемые методы расчета НДС часто несовершенны, не учитывают концентрацию силовых потоков и концентрацию напряжений в *местах резких изменений сечений* Чем *в меньшей мере проявляется* пластичность и вязкость металла при наступлении разрушений, тем выше должны быть коэффициенты запаса на неточность определения НДС сварных соединений.

Запас на учет неконтролируемого изменения температур (низких или высоких) и влияние этого фактора на свойства металла осуществляют обычно не путем введения коэффициентов запаса, а изменением расчетной температуры в большую или меньшую сторону на ΔT

Подразумевается, что установленный коэффициент запаса должен компенсировать возможные отклонения нескольких параметров. нагрузки, свойств металла, сечений элементов и других. Поэтому при установлении требуемых коэффициентов запаса целесообразно пользоваться такими понятиями, как частные коэффициенты запаса и общий коэффициент запаса.

Рассмотрим указанные понятия на простейшем примере статического расчета нахлесточного сварного соединения с угловыми швами, передающего эксплуатационную силу $P_э$, для которой необходимо введение коэффициента запаса. Будем понимать под требуемыми частными коэффициентами запаса $[n] > 1$ числа, показывающие, во сколько раз нормативные значения должны быть изменены для устранения их возможных неблагоприятных отклонений:

$$[n]_р = \frac{P_{расч}}{P_э}; \qquad (3.4.1)$$

$$[n]_\tau = \frac{\tau_р}{[\tau]}; \qquad (3.4.2)$$

$$[n]_a = \frac{a_{пр}}{a_{расч}}, \qquad (3.4.3)$$

где $P_{расч}$ — расчетная сила; $P_э$ — эксплуатационная сила; $\tau_р$ — нормативное минимальное значение прочности швов на срез; $[\tau]$— допускаемое (расчетное) напряжение среза в швах; $a_{пр}$ — проектное сечение шва, указываемое на чертеже; $a_{расч}$ — расчетное сечение шва.

Здесь предполагается, что длина швов, которая легко может быть проконтролирована, точно соответствует указанной на чертеже. Общий требуемый коэффициент запаса равен произведению частных требуемых коэффициентов запаса:

$$[n] = [n]_р\,[n]_\tau\,[n]_a. \qquad (3.4.4)$$

Расчетная формула для определения необходимого (проектного) сечения шва будет иметь вид

$$a_{пр} = \frac{P_э\,[n]_р\,[n]_\tau\,[n]_a}{\tau_р\,l}, \qquad (3.4.5)$$

где l — длина периметра швов соединения.

Не во всех случаях расчетные формулы имеют такую структуру, что все параметры входят в первой степени. Например, при расчете стыкового сварного соединения с непроваром (рис. 3.4.3) на сопротивляемость разрушению при высокой чувствительности металла к концентрации напряжений формула имеет вид

$$\sigma_c = \frac{K_c}{A\sqrt{l}}, \qquad (3.4.6)$$

где σ_c — критическое напряжение, при котором происходит разрушение, K_c— критический коэффициент интенсивности напряжений, l — характерный размер непровара по толщине листа s, A — численный коэффициент, отражающий расположение непровара или трещины в соединении.

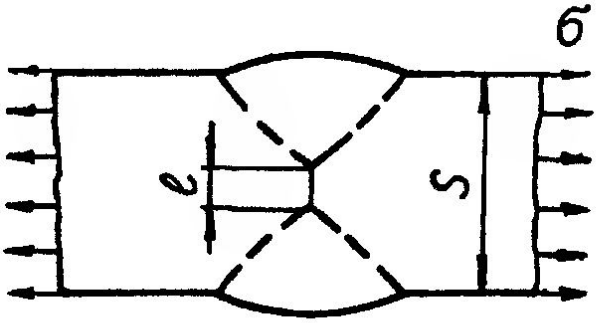


Рис. 3.4.3. Стыковое соединение с непроваром

Пусть заданы требуемые коэффициенты запаса по нагрузке (напряжению) $[n]_p$, механической характеристике $[n]_k$, возможному отклонению от установленного размера непровара $[n]_l$.

Тогда расчетная формула для определения допускаемого эксплуатационного напряжения примет вид

$$\sigma_э = \frac{K_c}{[n]_k [n]_p A \sqrt{l [n]_l}}. \qquad (3.4.7)$$

Общий коэффициент запаса, показывающий, во сколько раз возможно отклонение какого-либо из параметров для достижения критического состояния, если остальные параметры считать неизменными, будет в данном случае в отношении K_c и σ_c иметь одно значение, а в отношении l — другое. Для K_c и σ_c

$$[n]_1 = [n]_k [n]_p [n]_l^{1/2}; \qquad (3.4.8)$$

для l

$$[n]_2 = [n]_k^2 [n]_p^2 [n]_l. \qquad (3.4.9)$$

Если требуемые частные коэффициенты запаса обычно устанавливают директивным путем и они, как правило, никакому расчетному определению не подлежат, то фактические коэффициенты запаса могут быть определены либо экспериментально, либо расчетным путем.

Чаще всего в экспериментах определяют фактический коэффициент запаса как общий коэффициент по тому параметру, который определяют во время опыта. Если, например, в испытании регистрируют разрушающую нагрузку P_p сварного соединения с угловыми швами, а механические свойства и размеры катетов швов считают отвечающими нормативным значениям, то отношение $P_p / P_э$ дает общий коэффициент запаса.

Более прогрессивными, но и более трудоемкими являются методы проектирования, использующие в качестве расчетной базы вероятностные методы. Для таких расчетов необходимо располагать достаточно достоверной информацией о рассеянии участвующих в расчете величин. В простейших случаях это механические характеристики металла, нагрузки и сечения проектируемых элементов. Рассеяние каждого из указанных параметров должно быть описано соответствующими реаль-

ной действительности законами распределения с указанием количественных характеристик этих распределений. Если указанные условия выполнены и задана вероятность неразрушимости детали в виде конкретного числа, например 0,999 или 0,995, то метод расчета, вообще говоря, сводится к построению рациональной процедуры математических действий на основе аппарата теории вероятностей и математической статистики.

Представляется, что возможна такая система организации расчетов с использованием указанных выше принципов, при которой вся подготовительная часть работы проводится научно-исследовательскими отделами, а проектировщик пользуется формально коэффициентами запаса, численные значения которых соответствуют определенным уровням вероятности неразрушимости. Рассмотрим сказанное на примерах.

Пусть параметром, имеющим рассеяние по нормальному закону, является механическая характеристика, например предел выносливости σ_0 (рис.3.4.4, *а*), в то время как нагрузка, отнесенная к сечению $\sigma_э$, остается строго постоянной. Разным принятым проектировщиком сечениям будут соответствовать различные уровни напряжений $\sigma_{э_1}$, $\sigma_{э_2}$, которые будут давать различную вероятность разрушимости (зачерненная площадь левее $\sigma_{э_1}$ или $\sigma_{э_2}$). Значение предела выносливости может быть задано либо в виде математической зависимости $f(\sigma_0)$, либо в виде числа $\sigma_{0\,\min}$, взятого, например, на расстоянии 2 *s* от среднего значения σ_0^*. В последнем случае отношения $\frac{\sigma_{0\,\min}}{\sigma_{э_1}}$ и $\frac{\sigma_{0\,\min}}{\sigma_{э_2}}$ могут формально рассматриваться как коэффициенты запаса, соответствующие различным вероятностям неразрушимости (или разрушимости).

В другом примере (рис.3.3.4, *б*) пусть механическая характеристика σ_p — сопротивляемость хрупкому разрушению сварного соединения при низкой температуре имеет закон $f(\sigma_p)$. Пиковые максимальные нагрузки, например, при работе бульдозера дают распределение максимальных напряжений $\sigma_э$ в виде $F(\sigma_э)$. За счет выбора различных сечений элементов конструкций расчетчик может изменить положение кривой $F(\sigma_э)$ без изменения ее формы. Если минимальное значение $\sigma_{p\,\min}$ задать как отстоящее от σ_p^* на 2 s_p, а максимально возможную расчетную нагрузку также задать в виде числа, которое при каком-то значении сечения дает $\sigma_{э\,\max}$, то $\sigma_{p\,\min} / \sigma_{э\,\max}$ будет восприниматься как коэффициент запаса, отдельные значения которого будут соответствовать различной вероятности разрушимости — зачерненной площади на рис.3.4.4,*б*.

Представленные примеры показывают, что форма проведения расчетов еще не предопределяет его качество и достоверность. Можно было бы привести примеры, в которых расчеты ведутся по вероятностным моделям, в то время как достоверных численных значений в правой

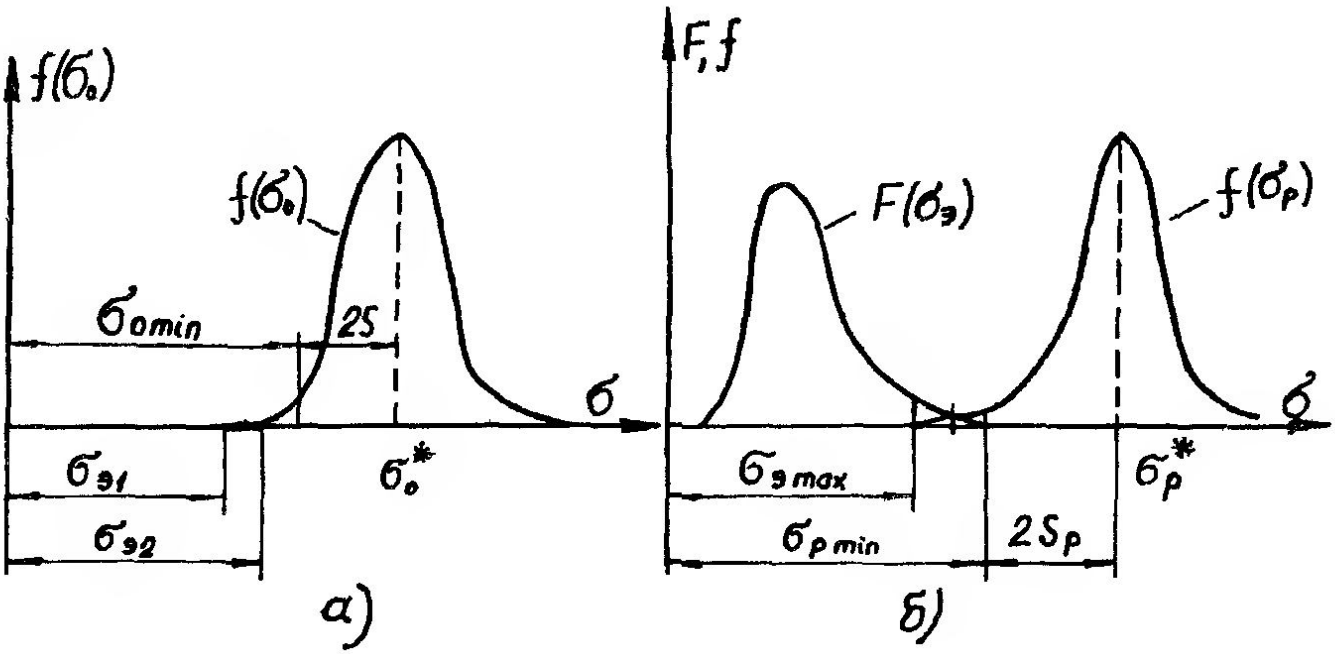


Рис. 3.4.4. Законы распределения:
а — предела выносливости; *б* — сопротивляемости хрупкому разрушению $\sigma_р$ и максимального напряжения $\sigma_э$

части кривой $F(\sigma_э)$ и в левой части кривой $f(\sigma_р)$ нет. Они априорно приняты как соответствующие каким-либо законам распределения, а численные значения получены путем экстраполяции кривых в области, где нет опытных данных.

В связи с изложенным представляется, что при построении конкретной процедуры расчета на первом этапе необходимо четко установить факторы, влияющие на прочность, и дать их связь на основе детерминированной модели. В последующем учет рассеяния факторов позволит учесть и вероятностный аспект происходящих процессов.

При выполнении контрольных расчетов сварных соединений с несплошностями в большинстве случаев бывает достаточен альтернативный ответ, наступит или нет рассматриваемое предельное состояние при известных нагрузках, свойствах металла и размерах несплошностей. Однако в некоторых случаях бывает необходима количественная оценка фактического состояния по отношению к критическому. Ответ может быть дан в виде вероятности неразрушимости (разрушимости) либо в виде фактического коэффициента запаса. Анализ ситуации показывает, что для вероятностной оценки фактического состояния сварного соединения приходится задаваться законом распределения несплошностей, а также вероятности механических свойств при таких низких значениях их уровней, при которых никаких экспериментальных данных нет. Фактически дело сводится к сложному и весьма точному расчету по произвольно заданным зависимостям, что представляется нелогичным.

§ 3.5. Расчетная и конструкционная прочность

Большую часть сварных конструкций в процессе проектирования рассчитывают на прочность или жесткость. Существующие нормы расчета ставят проектировщика в определенные условия. При стремлении получить экономичную конструкцию с минимальной массой и недорогую в изготовлении у него остаются только возможности, связанные с выбором материала и конструктивных форм. Напротив, при желании перестраховаться и получить конструкцию более прочную, даже путем увеличения массы, проектировщик также ограничен нормами расчета.

Мерилом правильности использованного расчета является фактическая прочность конструкции, которая зависит не только от точности расчета, но и от конкретной технологии изготовления, наличия дефектов в конструкции, использованных методов контроля. Имеется диалектическая взаимосвязь между нормами расчета, достигнутым уровнем знаний в науке о прочности и фактическим уровнем технологии и контроля в конкретном производстве. Рассмотрим понятия расчетной и конструкционной прочности и причины их несовпадения.

Расчетная прочность — это установленная в результате расчета путем использования характеристик материала и аппарата теории способность сварного соединения или конструкции сопротивляться наступлению тех предельных состояний, которые соответствуют наступлению отказа в работе. Конструкционная (фактическая) прочность — это установленная в результате испытания или эксплуатации при конкретных свойствах материала, значений и характере действия нагрузок, температуре, среде, а также технологии изготовления способность сварного соединения или конструкции сопротивляться наступлению тех же предельных состояний, от которых зависят их служебные свойства.

Конструкционная прочность по своей природе является величиной, которая имеет рассеяние, поскольку имеют рассеяние свойства материала и размеры. Отсюда следует, что уровень рассеяния различных видов прочности может оказаться существенно разным. Например, если ведется оценка прочности по предельному состоянию наступления текучести стенки сосуда, работающего под давлением, то рассеяние будет находиться в пределах рассеяния свойств металла по $\sigma_т$ и толщины листового металла. Для многих марок металла это рассеяние обычно невелико. Если же оценка прочности будет проводиться по предельному состоянию разрушения сосуда, изготовленного из высокопрочной стали, чувствительной к концентрации напряжений, то рассеяние будет зависеть от концентрации напряжений, которая в свою очередь зависит от радиусов закруглений в зонах концентрации. Рассеяние в этом случае окажется более значительным. Сравнение по долговечности при испытании сосудов при переменном давлении даст еще большее

рассеяние результатов. Расчеты на прочность обычно ведут, используя детерминистический подход. Поэтому одному полученному расчетному уровню прочности будет всегда соответствовать некоторая совокупность неодинаковых значений фактически наблюдаемой конструкционной прочности. Это одна из основных причин несовпадения расчетной и конструкционной прочности, вытекающая из самого принципа построения расчета, не рассматривающего рассеяние факторов, участвующих в расчете. Не следует переоценивать значение отмеченного обстоятельства для практической деятельности. Если ориентироваться на статистически минимальное значение величины, например на $(\sigma_т^* - 3\ s_т)$, где $\sigma_т^*$ — среднее значение предела текучести, $s_т$ — среднее квадратическое отклонение значения предела текучести, что обычно и делают при расчетах с использованием $\sigma_т$, а значение конструкционной прочности брать также по статистически минимальному уровню, то отличие расчетной и конструкционной прочности при условии минимального влияния других факторов будет невелико.

Значительное влияние на различие уровней расчетной и конструкционной прочности оказывают дефекты. В современных расчетах не принято заранее включать дефект как фактор, подлежащий учету на стадии проектирования. Технологические требования к сварным конструкциям обычно таковы, что не допускают наличия в них опасных дефектов. Принципиально это может быть достигнуто применением 100% контроля качества неразрушающими методами. Поскольку даже в этом случае сохраняется некоторая вероятность пропуска дефекта, то, естественно, остается и вероятность отклонения расчетной прочности от конструкционной. При выборочном контроле вероятность несовпадения расчетной и фактической прочности будет еще значительней. Если поток дефектов в производстве является стабильным, а уровень максимально возможных дефектов не превышает какого-то значения, то может быть назначен определенный коэффициент запаса по прочности, который сделает вероятность разрушения при эксплуатационных нагрузках близкой к нулю, несмотря на значительное отличие расчетной и конструкционной прочности.

Следующая причина несовпадения расчетной и конструкционной прочности заключается в недостаточных знаниях комплексного влияния нескольких одновременно действующих факторов. Большая часть методов расчета развита для отражения влияния какого-либо одного фактора. Учет в расчетах каждого фактора в отдельности является недостаточным, что и порождает неизбежные расхождения между предсказанной и фактической прочностью. Недостаточность учета влияния слабо изученных факторов также является одной из причин несовпадения расчетной и конструкционной прочности.

Типичным примером может служить неучет низких климатических температур, существенно влияющих на чувствительность материала к

концентрации напряжений. Методы расчета, способные отразить это влияние, только создаются, тогда как разрушения конструкций при низких температурах довольно часты. Меры повышения сопротивления хрупким разрушениям при низких температурах состоят пока в использовании хладостойких металлов и термической обработки после сварки, если это возможно

Использование высокопрочных металлов, работающих при высоком уровне напряжений и весьма чувствительных к концентрации напряжений, послужило мощным стимулом для разработки научного направления механики разрушения при наличии трещин. Начальный опыт применения таких сталей без учета фактора трещиностойкости дал немало примеров разрушений.

Несовпадение расчетной и конструкционной прочности является также следствием неправильного выбора предельных состояний и критериев. Широко распространенным примером такого рода является расчет сварной конструкции по предельному состоянию наступления текучести, в то время как она должна быть рассчитана на выносливость по предельному состоянию разрушения от усталости или на сопротивляемость разрушению из-за концентрации напряжений.

При создании сварных конструкций необходимо стремиться к сближению уровней расчетной и конструкционной прочности. Если расчетная прочность выше конструкционной, то при небольших коэффициентах запаса не исключены выходы конструкций из строя по причине наступления предельного состояния. Если расчетная прочность ниже конструкционной, то это означает, что допущен перерасход металла. Проектировщик располагает большими возможностями, чтобы расчетные уровни прочности мало отличались от фактических. Необходимо принимать такие конструкторские решения, которые бы исключали действие неясных в расчетном и физическом плане факторов. При высокой чувствительности материала к концентрации напряжений обязательно должен быть установлен для расчета размер возможного невыявленного дефекта в виде трещины и проведена оценка опасности этого дефекта в условиях эксплуатации. Значительно влияние технологии на конструкционную прочность. Сварка относится к технологическим процессам, способным сильно повлиять на качество металла. Послесварочная термическая обработка, хотя и удорожает стоимость производства, в некоторых случаях является необходимой для улучшения, а главное для выравнивания свойств металла в различных частях сварных соединений и конструкции в целом. При создании новых изделий, в которых действуют слабо изученные факторы, расчет прочности может оказаться недостаточным ввиду его неполного соответствия реальной ситуации. В таких случаях следует прибегать к испытанию узлов и элементов конструкций на прочность, исследованию напряжений и деформаций в них.

Глава 4

КРИТЕРИИ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ В МЕХАНИКЕ РАЗРУШЕНИЯ

§ 4.1. Общие положения

Разрушение, наступающее при однократном приложении постоянно возрастающей нагрузки, может быть либо хрупким (разрушение сколом), либо вязким, связанным с развитием пластических деформаций.

Для вязкого разрушения Г.В.Ужик [323] приводит следующий критерий:

$$\sigma_i > \sigma_т;\ \sigma_1 = S_{раз} = f(\sigma_1 / \sigma_i)\ , \qquad (4.1.1)$$

где σ_i , σ_1 — интенсивность напряжений и максимальное главное напряжение; $S_{раз}$ — сопротивление разрушению деформированного металла; $\sigma_т$— предел текучести при растяжении.

При растяжении гладкого образца, когда $\sigma_1 / \sigma_i \cong 1$, разрушению предшествуют, как правило, значительные пластические деформации, наличие концентратора напряжений в той или иной степени увеличивает жесткость напряженного состояния в зоне вершины концентратора ($j = \sigma_1 / \sigma_i > 1$), что соответственно ограничивает развитие пластических деформаций перед возникновением трещины у вершины концентратора. В случае объемного растяжения с равными компонентами $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ интенсивность напряжений σ_i и деформаций ε_i оказываются равными нулю, развитие пластических деформаций становится невозможным, и разрушение должно происходить хрупко сколом при

$$\sigma_1 = S_{отр}\ , \qquad (4.1.2)$$

где $S_{отр}$ — сопротивление отрыву недеформированного металла, равное напряжению микроскола $R_{мс}$.

Условия наступления идеально хрупкого разрушения при $\sigma_i = 0$ и $\varepsilon_i = 0$, то есть при $j = \sigma_1 / \sigma_i = \infty$, в реальных условиях не реализуются. Максимально возможное значение коэффициента $j \approx 2{,}6 \ldots 3{,}0$ соответствует объемно-напряженному состоянию в условиях плоской деформации, которое может иметь место в локальной зоне у вершины трещины. В этом случае хрупкий отрыв может наступать при крайне ограниченной пластической деформации при условии

$$\sigma_i \geq \sigma_т\ ; \qquad \sigma_1 \geq S_{отр}\ . \qquad (4.1.3)$$

Записывая условия (4.1.3) в виде

$$\sigma_1 / \sigma_i \geq S_{отр} / \sigma_т , \qquad (4.1.4)$$

можно видеть, что левая часть неравенства (4.1.4) представлена в виде коэффициента $j = \sigma_1 / \sigma_i$, отражающего жесткость напряженного состояния, тогда как правая часть — отношением величин, характеризующих механические свойства металла. При этом величина $S_{отр} = R_{мс}$ представляет собой некоторую константу сопротивления хрупкому разрушению, инвариантную по отношению к виду напряженного состояния, температуре, скорости деформирования, времени выдержки под нагрузкой, и зависит только от структурного состояния стали [15], тогда как величина $\sigma_т$ может существенно меняться в зависимости от тех же параметров.

Следовательно, выражение (4.1.4) может служить основой для установления условий наступления разрушения реального конструктивного элемента. Однако для этого необходимо, во-первых, определить жесткость напряженного состояния в локальной зоне у вершины концентратора в упругой области, а во-вторых, учесть возможное изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) по мере роста нагрузки и развития в этой зоне пластических деформаций.

Подходы к решению таких задач для дефектов (концентраторов) трещиноподобных и нетрещиноподобных оказываются различными. Для трещиноподобных концентраторов, характеризующихся нулевым углом раскрытия и бесконечно большой остротой ($\rho = 0$), нашли использование подходы механики разрушения, для нетрещиноподобных концентраторов — подходы с позиций концентрации напряжений.

Настоящая глава 4 посвящена критериям механики разрушения элементов с трещиной. В главе 5 рассматриваются вопросы определения НДС применительно к концентраторам напряжений нетрещиноподобного типа.

Критерии механики разрушения могут иметь двоякое назначение: во-первых, дать описание напряженно-деформированного состояния в зоне вблизи конца трещины, во-вторых, характеризовать поведение материала в этой зоне, то есть его механические свойства [15, 200, 323].

Критерии различного назначения имеют различие в обозначениях. Так, если к буквенному обозначению критерия, предназначенного для описания НДС, добавить индекс "c", что соответствует слову "critical" (критический) или "p", что соответствует слову “разрушающий”, то это означает, что критерий характеризует не НДС, а механические свойства материала.

Практическое использование критериев механики разрушения для оценки свойств металлов и напряженно-деформированного состояния

распространяется не только на однородные конструктивные элементы, но и на сварные соединения. Следует иметь в виду, что широкое использование критериев механики разрушения для оценки работоспособности сварных конструкций и соединений сдерживалось и сдерживается рядом обстоятельств.

1. Механика разрушения, являясь сравнительно молодой отраслью механики, продолжает находиться в периоде становления, в особенности в части, относящейся к практическому определению свойств металлов и их использованию в инженерных расчетах на прочность. Продолжают развиваться представления о физической сущности некоторых критериев механики разрушения, расчетной связи между ними, предпочтительности или недостаточности отдельных критериев в конкретных условиях их использования, технике проведения испытаний и обработки результатов. Естественно, что в этом случае основные усилия многих исследователей направлены на решение принципиальных вопросов, не осложненных присутствием сварных соединений с неоднородностью их свойств.

2. Механика разрушения в расчетном плане развивается в основном как механика однородной среды. Главные ее положения исходят из того, что свойства металла вблизи конца трещины, где развивается зона пластических деформаций, одинаковы во всех точках тела. Сварные соединения, как правило, имеют неоднородность механических свойств, иногда очень значительную. Степень влияния этой неоднородности на результаты определения механических свойств по критериям механики разрушения оценить пока очень сложно. Некорректности, связанные с неучетом влияния неоднородности, являются также одной из причин, сдерживающей более широкое применение механики разрушения для определения свойств сварных соединений.

3. Сварные соединения, за исключением стыковых без усиления шва или со снятым усилением, имеют концентрацию напряжений, вызванную формой соединения. Это также является осложняющим обстоятельством, так как в этом случае необходимо располагать методами определения характеристик напряженно-деформированного состояния для тел довольно сложной формы.

4. Механика разрушения в основном имеет дело с трещинами. Присутствие трещин в сварных соединениях большинством норм запрещено, а с точки зрения специалистов, как правило, является признаком недостатков технологии сварки, примененных материалов, нарушениями в технологии производства и т.п. По этой причине критерии механики разрушения используют в сварных конструкциях главным образом как средство оценки свойств металла и значительно реже — для расчетных оценок опасности имеющихся трещин или трещин, которые почему-либо окажутся не обнаруженными. С другой стороны, непровары в сварных швах встречаются относительно часто,

а в нахлесточных соединениях с угловыми швами они просто неизбежны. Между тем непровар практически мало чем отличается от трещины, за исключением редких случаев, когда он имеет плавное закругление у вершины. Неопределенности, вызываемые незрелостью представлений об опасности или неопасности отдельных дефектов или отклонений от нормы, также затрудняют квалифицированное использование механики разрушения в сварных конструкциях.

Наряду с перечисленными выше обстоятельствами нужно также отметить, что сама форма сварных соединений в зонах перехода от наплавленного металла к основному, малые радиусы в этих местах, а также упомянутые выше непровары в стыковых и угловых швах являют собой примеры, в отношении которых использование аппарата и положений механики разрушения должно рассматриваться как наиболее естественное.

§ 4.2. Критические коэффициенты интенсивности напряжений

Одним из основных критериев прочности в механике разрушения является критический коэффициент интенсивности напряжений, обозначаемый как K_{Ic} или K_c. Часто его называют также силовым критерием, так как его определение в основном связано со знанием напряжений или сил в испытуемом образце. Нередко критерий K_{Ic} и K_c ассоциируют с линейной механикой разрушения. Известны примеры, когда значение K_c определяют при напряжениях, превышающих $\sigma_т$; в этих случаях отнесение K_c к критериям линейной механики разрушения неправомерно.

Под критериями линейной механики разрушения следует понимать главным образом те, определение которых может быть выполнено при условии $\sigma_{ср.р} < \sigma_т$, а точнее когда полностью соблюдаются положения, базирующиеся на аппарате теории упругости, несмотря на протекание пластических деформаций вблизи вершины концентратора. В дальнейшем, употребляя для краткости условие $\sigma_{ср.р} < \sigma_т$, будем подразумевать выполнение требований корректного определения критериев линейной механики разрушения.

Силовой критерий механики разрушения K_{Ic} относится к наиболее теоретически обоснованным и точным критериям механики разрушения. Однако рекомендации по его определению, содержащиеся в ГОСТ 25.506-85, предусматривают использование образцов со сквозной или краевой трещиной, что нередко приводит к необходимости испытания образцов весьма крупных размеров. В главе 7 изложена методика использования образцов с поверхностной трещиной, позволяющая снизить требования к толщине элементов, пригодных для корректного определения критерия K_{Ic}.

Для целей сравнения различных технологий, режимов сварки и термической обработки, где требуется качественное сопоставление в однотипных условиях, часто используют другие, более экономно определяемые критерии механики разрушения.

Значение K'_{Ic} в шве может быть различным в зависимости от направления движения трещины (рис. 4.2.1, *а, б*) — по толщине, в прямом или обратном направлении по отношению к направлению $U_{св}$, а также от расположения трещины по линии сплавления или по околошовной зоне.

Причем эти различия зависят и от того, определены ли эти характеристики на однородном образце, который имитирует какую-либо зону, или они определены на образце из сварного соединения, в котором рядом с трещиной находятся зоны металла с другими свойствами. Значения K'_{Ic}, найденные для сварного соединения, соответствуют лишь принятым в эксперименте условиям. Степень влияния неоднородности свойств на значения K'_{Ic} пока исследована мало.

Толщина металла в сварных конструкциях нередко бывает такой, что корректное определение K_{Ic} невозможно и тогда определяют K_c. При переходе от одной толщины металла к другой значение K_c изменяется, то есть K_c представляет собой условную величину, характеризующую данный металл при конкретной его толщине. Значение K_c может зависеть и от длины трещины. С учетом этого фактора разработано понятие предела трещиностойкости [199], который зависит от длины трещины. Таким образом, K_c отражает не только влияние свойств металла, но также и размеров образца, трещины, конкретной совокупности механической неоднородности и т.д.

К основным очагам концентрации напряжений в сварных соединениях относят несплавления, плоские шлаковые включения и некоторые другие дефекты. Если непровары на рис.4.2.2,*а,б в* можно отнести в ряде случаев к дефектам, то непровары в нахлесточных соединениях и

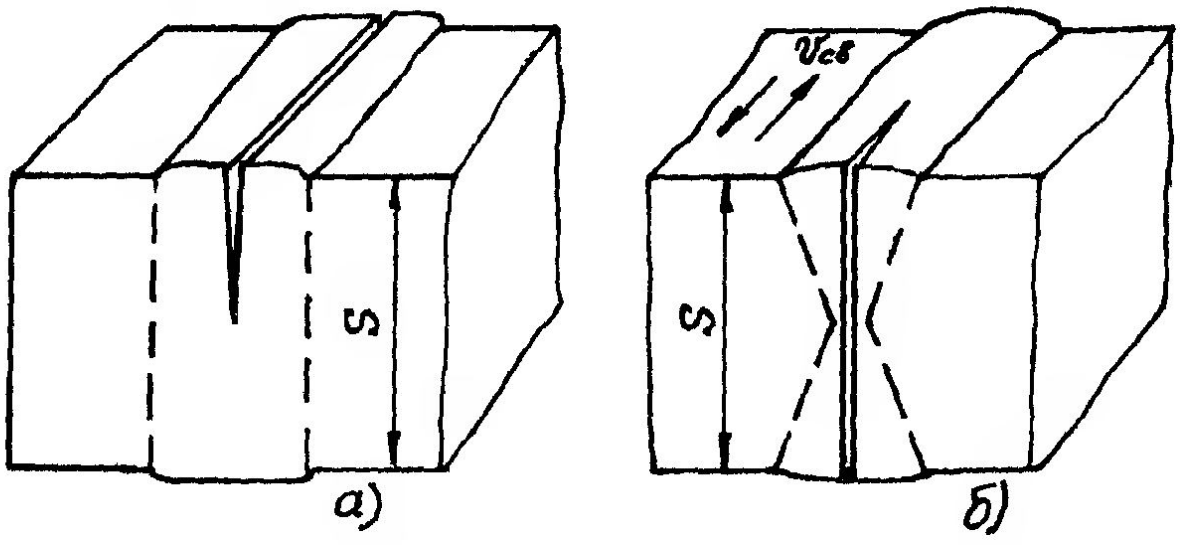


Рис. 4.2.1. Расположение трещины в стыковом шве

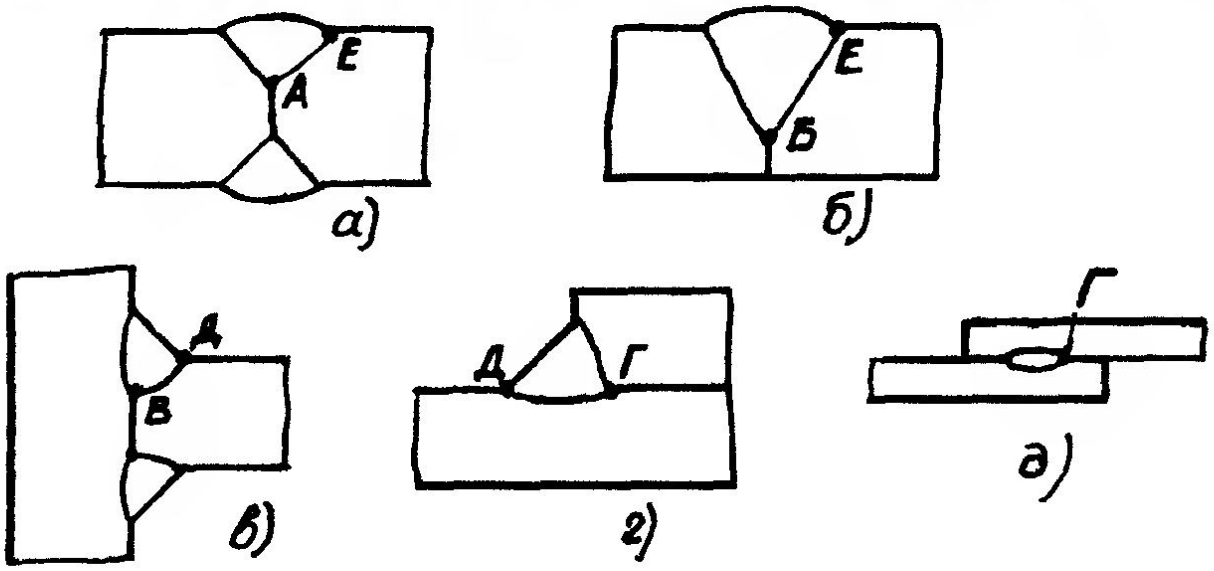


Рис. 4.2.2. Очаги концентрации напряжений в сварных соединениях

места переходов от швов к основному металлу (рис.4.2.2,*г,д*) органически присущи качественным сварным соединениям. Концентрация напряжений существенно зависит от радиусов закруглений в зонах *А, Б, В, Г Д, Е* на рис.4.2.2.

Осмотры и измерения радиусов под микроскопом показывают следующее. Места непроваров у всех типов соединений на рис. 4.2.2 нередко заканчиваются очень короткой трещиной или надрывом Естественно, что невозможно предсказать или установить обследованием в готовой конструкции наличие или отсутствие таких малых трещин во всех сварных соединениях Приходится допускать худшее и считать,что такие короткие трещины возможны. Места перехода от наплавленного металла к основному (точки *Д* и *Е* на рис.4.2.2) имеют, как правило, более благоприятное очертание. Однако и в этих случаях встречаются места со сварочными подрезами, радиусы которых весьма малы. Детальное исследование рассеяния радиусов перехода от шва к основному металлу, выполненное в [334], показало, что имеет место определенная закономерность в распределении значений радиусов.

Рассмотрим отдельные виды швов и сварных соединений в отношении возможности использования для их оценки критериев линейной механики разрушения.

Стыковые соединения. Оценку опасности непроваров для прочности элементов конструкций правильнее проводить на основе испытаний образцов, в которых вместо трещины присутствует непровар. Результат в этом случае может оказаться хуже или лучше, чем на образце с трещиной в металле шва, в зависимости от того, какой по свойствам основной металл находится вблизи непровара, каков радиус вершины непровара, какие термомеханические процессы сопровождали формирование вершины непровара. Оценку свойств металла шва как такового,

если ее необходимо выразить в виде K_{Ic}, целесообразно давать на образце, взятом из шва, с выращенной усталостной трещиной

Несплавления часто представляют собой трещиноподобные дефекты. Оценку опасности таких несплавлений следует проводить на образцах, у которых одна часть является основным металлом, а другая металлом шва. Такое сочетание необходимо из-за возможного влияния неоднородности механических свойств. Опасность несплавления между слоями шва может оцениваться по K_{Ic} металла шва.

Соединения с угловыми швами являют собой примеры, где у вершины непроваров реализуются схемы напряженного состояния I, II, III. Схема I нормального отрыва наиболее выражена в тавровых соединениях, когда плоскость непровара расположена перпендикулярно основному силовому потоку. Из-за особенностей формы углового шва в этом случае имеется и небольшая составляющая схемы II, но вследствие малости ею можно пренебречь.

Соединения внахлестку, когда угловой шов воспринимает нарузки по схеме II или III, в принципе не могут быть выполнены без непровара. Это же относится к нахлесточным соединениям с проплавными удлиненными швами или швами в виде круглых заклепок, а также к нахлесточным соединениям контактной сварки — точечным и шовным. При выборе форм образцов следует стремиться к обеспечению соответствия схемы нагружения образцов реальным нагрузкам в сварном соединении, в особенности в отношении составляющей нормального отрыва I Если эта составляющая присутствует, как, например, в соединении на рис. 4.2.2, *д*, то она должна воспроизводиться в испытаниях, так как именно нормальный отрыв является часто наиболее опасным. Наоборот, если эта составляющая отсутствует, то форма образца должна быть выбрана такой, чтобы исключить нормальный отрыв, так как он может внести существенные искажения в определение K'_{IIc} и K'_{IIIc}.

Необходимо отметить, что разрушение при испытаниях натурных сварных соединений в большинстве случаев происходит при $\sigma_{ср} > \sigma_т$, что не позволяет непосредственно выразить результат испытания в критериях линейной механики разрушения. Это заставляет использовать другие критерии, в частности деформационные, или прибегать к искусственным приемам, позволяющим перейти к критериям линейной механики, даже если разрушение произошло при $\sigma_{ср} > \sigma_т$.

Критерии в форме коэффициентов интенсивности напряжений используются для оценки механических свойств металлов и сварных соединений не только при однократном нагружении. Их применяют также при переменных нагрузках, при действии коррозионных сред, в условиях температур, отличающихся от нормальной. Прежде всего следует отметить пороговое значение размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{th_R} или $\Delta K_{кор_R}$, при котором начинается рост трещин при циклических нагрузках в зависимости от характеристики цикла R