

УДК 620.179.18

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Александр Владимирович Пересторонин

Магистр 1 года,

кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Б.М. Фёдоров,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Сварочные процессы – эффективный метод создания неразъемных соединений в судостроении. Они позволяют существенно ускорить сборочные операции при постройке судна. Однако, одним из наиболее важных факторов, влияющих на эффективность его применения, является формирование при сварке остаточных напряжений и деформаций, существенно влияющих на технологичность этих процессов [1].

Расширение или сокращение металла от неравномерного нагрева или охлаждения, а также от структурных превращений образуют так называемые собственные, или внутренние деформации и напряжения при сварке. Они существуют в теле без приложения внешних нагрузок [2].

Как правило, остаточные напряжения рассматривают как компоненты тензора, и выделяют следующие величины, характеризующие напряженное и деформированное состояние металла:

- Нормальные напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$
- Касательные напряжения $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$
- Линейные деформации $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$
- Сдвиговые деформации $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$
- Перемещения точек тела по осям u – по оси Ox , v – по оси Oy , w – по оси Oz .

На рис. 1 показано расположение осей при рассмотрении остаточных напряжений.

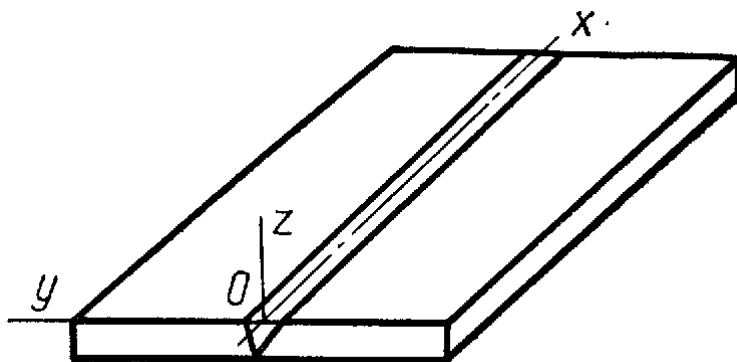


Рис. 1. Расположение координатных осей при рассмотрении остаточных напряжений

Если температурные напряжения в процессе нагрева будут выше предела текучести материала, то после снятия нагрева в теле останутся остаточные напряжения [3]. Этот механизм их образования характерен для всех процессов сварки, связанных с плавлением металла.

Интерес к исследованию остаточных напряжений в сварных конструкциях обуславливается тем, что они существенно влияют на прочность и долговечность сварного соединения. Как известно, для пластичных материалов остаточные напряжения практически не влияют на величину остаточных напряжений, однако в условиях хрупкого разрушения их влияние может быть значительным. В частности, хрупкому разрушению способствует объемное напряженное состояние металла [3].

Растягивающие остаточные напряжения снижают вибрационную прочность сварных конструкций. Если они действуют в зонах, где есть концентрация напряжений и неоднородность механических свойств, то там в первую очередь возникают разрушения от усталости [2].

На рис. 2 показаны зоны, остаточные напряжения в которых оказывают существенное влияние на временную и длительную прочность сварного соединения толстостенных конструкций.

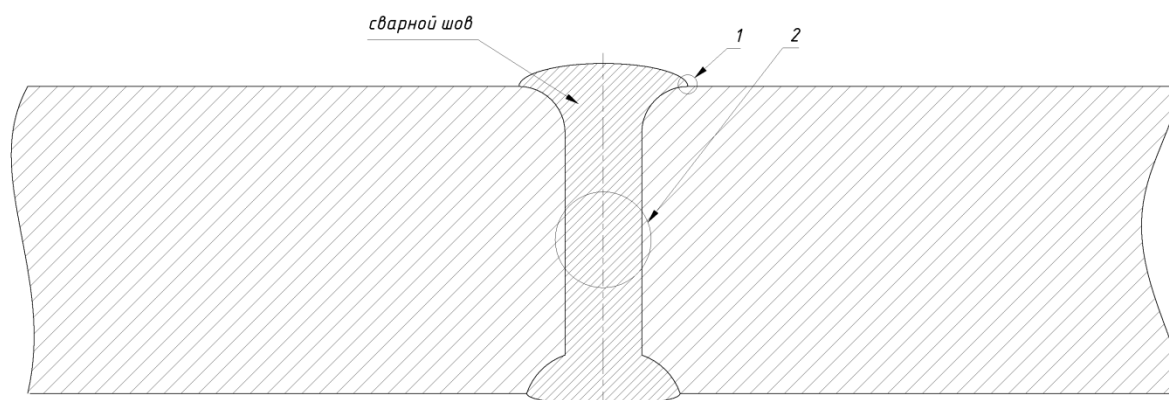


Рис. 2. Сварной шов в толстостенной конструкции.

Двухосные напряжения в зоне 1 влияют на долговечность сварного соединения;
трехосные напряжения в зоне 2 – на временную прочность

Различают одноосное, двухосное и трехосное напряженные состояния. На практике реализуется трехосное состояние, но в отдельных случаях, в частности, при рассмотрении поверхностных слоев, задачу часто упрощают. Так как один или два компонента остаточных напряжений могут оказаться намного меньше остальных, то такое упрощение позволяет, незначительно снизив точность, существенно упростить определение остаточных напряжений.

На сегодняшний день напряженное состояние можно определить как экспериментальными, так и теоретическими (расчетными) методами.

Существуют теоритические подходы, позволяющие оценивать напряженное состояние в различных конструкциях. В [4] приведены методики расчетного определения напряжений в зависимости от параметров теплового процесса. Таким образом, можно без проведения экспериментов оценить величину остаточных напряжений в сварных конструкциях различной конфигурации.

Однако, главным недостатком расчетных методов является невозможность учета влияния всех параметров технологического процесса, свойств металла и его состояния. Также сложно учесть влияние фазовых превращений, введения присадочного

материала и других важных факторов, существенно изменяющих характер распределения остаточных напряжений и деформаций.

В силу указанных причин, широкое распространение получили экспериментальные методы определения остаточных напряжений. Все эти методы можно разделить на две большие группы: механические и физические.

Механические методы – наиболее старые и глубоко изученные. Отдельные методики уже стандартизированы (пример: стандарт ASTM E837 - 08e1 «Стандартный метод тензометрического определения остаточных напряжений с использованием высверливаемого отверстия») и широко применяются во многих странах.

Механическими методами можно добиться высокой точности, определять на различной глубине напряжение вдоль всех осей. Кроме того, они позволяют получить абсолютное значение остаточных напряжений.

Общий принцип заключается в освобождении отдельных участков механическим путем, определении изменения показателей тензометров и по известным формулам определения остаточных деформаций и напряжений.

Главным недостатком методов является необходимость нарушения целостности контролируемого объекта разрезанием, высверливанием отверстий, нанесением меток и т. д. Это приводит к невозможности применения их к реальной конструкции, необходимости опосредованного исследования путем привлечения образцов-свидетелей.

Основными механическими методами являются разрезание (на полосы, квадраты и т. д. в зависимости от измеряемых компонентов напряжения) и высверливание отверстий.

Пример приведен на рис. 3 [5].

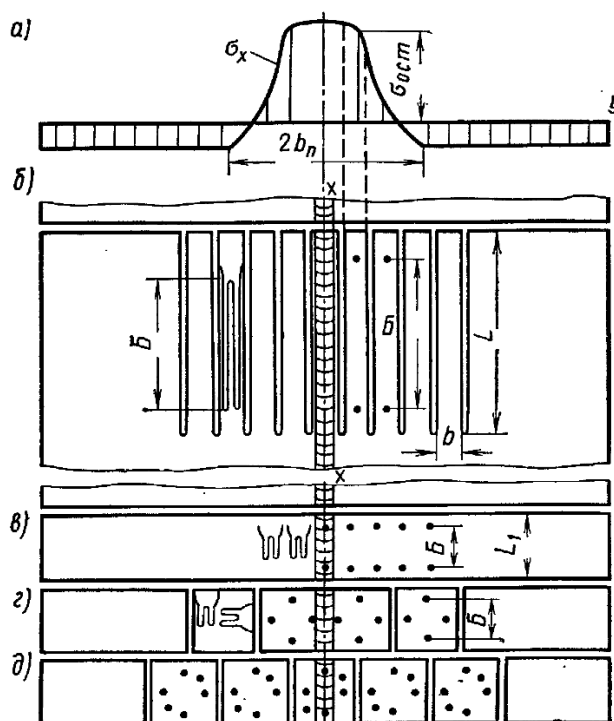


Рис. 3. Расположение мерительных баз и тензодатчиков при определении остаточных сварочных напряжений:
a – одноосные напряжения σ_x в пластине; *б* – разрезка на полосы;
в – вырезка поперечной полосы; *г* – разрезка на квадраты с измерением в двух направлениях;
д – разрезка на квадраты с измерением в трех направлениях вблизи шва

Поскольку механические методы не могут быть применены для контроля состояния работающих конструкций, трудоемки и применяются, в основном, в лабораторных условиях, был разработан ряд методов, позволяющих использовать изменение какого-либо измеримого физического параметра при изменении напряженного состояния для его оценки.

Основными физическими методами, применяемыми для измерения остаточных напряжений в металлах, являются:

- Рентгеновские
- Ультразвуковые
- Электромагнитные
- Метод твердости
- Метод хрупких покрытий

Рассмотрим кратко каждый из этих методов с позиции его преимуществ и недостатков при измерении остаточных напряжений при сварке толстостенных конструкций из закаливающих судостроительных сталей.

Как известно, для таких сталей, ввиду протекания при охлаждении фазовых превращений, в общем случае формируется многофазная структура, в зависимости от зоны шва изменяются размеры зерна и схема кристаллизации. Это говорит о существенной неоднородности материала в сварном шве и околошовной зоне [6].

Рентгеновские методы основаны на прецизионном измерении изменений межплоскостных расстояний, определяемых по смещению дифракционной линии. Этот метод обеспечивает достаточно большую точность и позволяет измерять остаточные напряжения в изделиях сложной конфигурации, обладает высокой локальностью на глубине до 0,1 мм. С его помощью можно определять также градиенты напряжений [7].

К недостаткам рентгеновского метода следует отнести существенное влияние структуры и размеров зерна, что особенно критично для рассматриваемого случая. Для исследования подповерхностных слоев требуется удаление слоя металла, что делает его неприемлемым для неразрушающего контроля толстостенных конструкций [7]. Измерения занимают много времени (до 10 минут на точку), предъявляются высокие требования к чистоте поверхности. Непосредственно измеряемой в дифрактометре величиной является смещение дифракционного профиля, которое есть следствие напряженно-деформированного состояния исследуемого материала. Эта величина составляет доли градуса, и должна измеряться с погрешностью, не превышающей сотые доли градуса [8]. Это возможно либо в лабораторных условиях, либо с применением высокоточных механических систем для перемещения измерительного прибора, что усложняет применение для крупногабаритных конструкций. Кроме того, их использование связано с возникновением рентгеновского излучения, а оборудование достаточно дорого.

Ультразвуковые методы основаны на применении эффекта изменения скорости распространения звуковых волн в металле, в котором имеются остаточные напряжения. Связь скорости распространения ультразвука с параметрами напряженно-деформационного состояния можно установить как экспериментально (при тарировке), так и расчетными методами. Вид зависимости скорости звука от напряжений – нелинейный, поэтому для расчета применяется уравнения пятиконстантной теории упругости с использованием модулей нелинейной упругости Мурнагана [9]. Эти методы позволяют оценивать компоненты двухосного напряженного состояния в поверхностном слое и средние по глубине до 150 мм [10]. Они не предъявляют жестких требований к чистоте материала, оборудование устроено относительно просто и может быть мобильным [9, 10].

Существенным недостатком ультразвуковых методов является невозможность прямого независимого определения напряжений вдоль нескольких осей, а так же существенное влияние неоднородностей и дефектов в исследуемом металле.

Повысить локальность и точность ультразвуковых методов поверхностного контроля можно с применением лазерно-ультразвукового метода, основанным на применении оптоакустического преобразования. Этот метод также позволяет определить усредненные по толщине остаточные напряжения с применением мощных широкополосных акустических сигналов наносекундной длительности [11].

Электромагнитные методы позволяют определить одноосное напряженное состояние. Они основаны на изменении намагниченности под действием остаточных напряжений. Могут измеряться магнитная проницаемость, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила, величина магнитострикции и другие магнитные параметры [9].

Их преимуществами являются простота и оперативность проведения измерений, невысокие требования к подготовке поверхности. Недостатки – высокие погрешности при работе с твердыми материалами и при небольших величинах деформации, применимость только к исследованию ферромагнетиков, чувствительность к величине немагнитного зазора между образцом и измерительным инструментом. Кроме того, глубина, на которой проводятся измерения, для отдельных методик достигает лишь 20...25 мм, а диаметр точки – около 3 мм, что говорит о малой степени локальности. Достаточно локально можно определять напряжения лишь на глубине 0,1...3 мм.

Метод твердости – достаточно прост в применении и основан на изменении твердости материала при действии в нем остаточных напряжений. Метод, несмотря на его простоту, практически не применяется, так как ввиду низкой точности позволяет лишь качественно определить характер распределения остаточных напряжений.

Метод хрупких покрытий применяют для определения наиболее нагруженных областей в металлическом изделии. Он состоит в нанесении на металл керамического покрытия и приложения нагрузки к образцу до появления в нем трещин. При этом нанесенные заряженные частицы порошка скапливаются в трещинах, обеспечивая их видимость. Позволяет визуализировать поле напряжений, но не дает точных количественных оценок их величины [7].

Существуют также другие методы, менее широко распространенные в силу определенных причин (недостаточная проработка, малая точность), связывающие остаточные напряжения с удельной электропроводностью [12], с применением покрытий из прозрачных сред и использованием оптических методов и другие. Но на сегодняшний день эти методы либо не удовлетворяют предъявленным требованиям по точности, быстрдействию и другим, либо находятся на стадии разработки.

Общим же недостатком всех физических методов является их относительность. Это вызывает необходимость проведения тарировки на образцах, идентичных рассматриваемым, что не только снижает быстрдействие, но вносит неточности, связанные с различием структуры основного металла, обычно используемого для тарировки, с металлом сварного шва.

На основе изложенных фактов, можно сделать вывод о том, что ни один метод в отдельности при нынешнем уровне развития методик не позволяет оперативно определять остаточные напряжения в зоне 2 (см. рис. 1) с достаточной точностью и без разрушения конструкции. Это приводит к необходимости применения для решения конкретной задачи, а именно контроля снижения остаточных напряжений по результатам операции их удаления, применять несколько методов. Наиболее перспективным видится производство тарирования физических методов (например, ультразвукового) по результатам разрушающего контроля механическими. Таким

образом, можно получать с определенной точностью оценку значений остаточных напряжений неразрушающими методами и использовать ее, например, для определения эффективности методов снижения остаточных напряжений в реальных сварных конструкциях.

Литература

1. Кузьминов С. А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций – Л.: Судостроение, 1974 г.
2. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.
3. Бигер И. А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 233 с.
4. Гатовский К. М. Теория сварочных напряжений и деформаций. – Ленинград: изд. Ленинградского Ордена Ленина кораблестроительного института, 1980. – 331 с.
5. Винокуров В. А. Сварочные деформации и напряжения. Методы их устранения – М.: Машиностроение, 1968 г. – 236 с.
6. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов. / Под ред. В. В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988 г. – 559 с.
7. Экспериментальная механика. / Под ред. А. Кобаяси. Перевод с английского под ред. Б. Н. Ушакова. – М.: Мир, 1990 г. – 552 с.
8. Трофимов В. В., Башкарев А. Я., Краус Иво. Неразрушающий метод рентгеновской тензометрии для контроля напряжений в поверхностных слоях деталей и изделий./ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Чешский университет (г. Прага). Опубликовано на сайте механико-машиностроительного факультета СПбПУ: www.mmf.spbstu.ru/konf_2011/38.pdf
9. Никитина Н. Е., Казачек С. В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин // Вестник научно-технического развития. 2010. № 4(32) С. 18 – 28.
10. Интернет – сайт <http://www.encotes.ru> компании ООО «ИНКОТЕС».
11. В. А. Быченко. Лазерно-ультразвуковая диагностика остаточных напряжений в тонкостенных элементах изделий ракетно-космической техники // изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, №7.
12. Васильков С. Д. Разработка и исследование метода неразрушающего контроля остаточных напряжений в металлах и сплавах и его метрологическое обеспечение. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики. СПб.: «Университетские телекоммуникации», 2010 г. – 24 с.