

Возможности оценки и снятия остаточных напряжений в трубах больших диаметров

А.А. Антонов
к.т.н., доцент¹
av64364@akado.ru

А.П. Летуновский
генеральный директор²
mail@magnitsp.ru

¹РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

²ООО "МАГНИТ плюс", Санкт-Петербург, Россия

В статье рассмотрены вопросы применения известных методов оценки и снятия остаточных напряжений применительно к трубам больших диаметров, трубным плетям и т.п. Зона сварного соединения труб имеет особенности, ограничивающие возможность применения большинства известных методов. Предложены комплексные методики, включающие несколько методов оценки и снятия остаточных напряжений, основанных на разных физических принципах, отличающиеся высокой производительностью, малой повреждаемостью поверхности, при сохранении достоверности получаемых результатов. Применение комплексной методики позволило получить информацию о полях остаточных напряжений в сварных швах и ремонтных наплавках, выполненных при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов. Также в статье рассмотрены вопросы эффективности применения ультразвуковой ударной обработки и виброобработки на резонансных частотах, позволяющие снизить уровень опасных остаточных напряжений. Комплексная методика оценки уровня остаточных напряжений прошла проверку при изучении полей остаточных напряжений, возникающих после завершения процесса сварки, на трубах магистральных трубопроводов. Она показала возможность надежного получения достоверной информации. Показано, что применение методов снижения остаточных напряжений позволяет уменьшить их опасное влияние на несущую способность сварных конструкций.

Ключевые слова
лазерная интерферометрия, шумы Баркгаузена, магнитная анизотропия, остаточные напряжения

Рабочие нагрузки, действующие на магистральные трубопроводы, вызывают возникновение в них внутренних механических напряжений. Обычно именно по предельным значениям рабочих нагрузок ведется расчет работоспособности любой конструкции. В этом расчете, кроме известных значений внутренних напряжений от рабочих нагрузок, присутствует коэффициент запаса. Его роль — учет факторов, влияние которых на несущую способность невозможно предвидеть.

Одним из таких факторов являются внутренние остаточные напряжения. Они отличаются от рабочих напряжений временем действия. Рабочие напряжения — временные напряжения. Они действуют до тех пор, пока к изделию приложены внешние нагрузки. В отличие от них, остаточные напряжения присутствуют в трубе независимо от наличия или отсутствия внешнего воздействия. Они возникают в результате локальных пластических деформаций, локального внешнего механического воздействия, локальных структурно-фазовых изменений и т.п. Напряжения видны не только в зоне сварного шва, но и по линиям пошаговой формовки при изготовлении трубы. Остаточные механические напряжения приводят к деградации металла. При эксплуатации трубопроводов в местах концентраторов напряжений более интенсивно развиваются дефекты, такие как коррозионные растрескивания под напряжениями (КРН), питтинги, интенсивное протекание коррозионных процессов и др.

Влияние остаточных напряжений на несущую способность не столь прямолинейно, как влияние рабочих напряжений. Наиболее сильно оно сказывается на ограничении несущей способности при циклических рабочих нагрузках, при малом запасе пластичности материала, при низких температурах.

Приближение расчетного значения коэффициента запаса к единице ведет к снижению металлоемкости конструкции, снижению ее массы и габаритов. Одним из направлений снижения коэффициента запаса — это учет имеющихся остаточных напряжений.

В большинстве случаев именно в зоне сварного шва наблюдаются максимальные

уровни остаточных напряжений. А в поперечном к шву направлении обычно фиксируется их максимальный градиент (рис. 1). На базе, соответствующей ширине шва, значение напряжений может меняться от нулевого (на линии сплавления) до максимального, близкого к пределу текучести материала (в центре шва). По некоторым данным, градиент в поперечном направлении в сварном шве может достигать 200 МПа/мм [1]. Следовательно, возникает требование к величине базы усреднения методов. Для зоны сварного шва она не должна превышать 3–5 мм.

Зоне сварного шва присущи и другие особенности, которые серьезно ограничивают применение стандартных методов оценки остаточных напряжений. Это, во-первых, чешуйчатость поверхности сварного шва, что усложняет или делает невозможным контактные способы измерения напряженного состояния. Во-вторых, иной структурно-фазовый и химический состав шва и зоны термического влияния (далее — ЗТВ) по сравнению с основным металлом, что не позволяет применять для физических методов тарировочные кривые, полученные на основном металле. Поэтому применение методов, основанных на измерении какого-либо физического показателя материала, зависящего от значения остаточных напряжений, для оценки напряженного состояния в шве и ЗТВ однозначно приводит к получению некорректного результата измерения. Получение тарировочных кривых для ЗТВ невозможно в принципе.

Кроме физических выделяют механические методы. Они основаны на принципе упругой разгрузки, т.е. на законе Гука. Учет свойств конкретного материала в этих методах ведется через единственный показатель — модуль упругости, который остается практически неизменным для каждой группы материалов. Например, для сталей модуль упругости лежит в диапазоне 200–210 ГПа.

Проблема применения механических методов — нарушение целостности исследуемого изделия. Встречается разрезка на полоски, квадратики, создание линейной или кольцевой проточки. На сегодняшний день наиболее перспективным и малоразрушающим считается метод создания малого глухого отверстия [2]. Он предусматривает создание глухих отверстий диаметром 2–5 мм и глубиной, соизмеримой с радиусом отверстия. Разновидности этого метода регламентируют российский [3] и американский [4] стандарты. В [4] деформации, возникшие после создания отверстия, измеряют с помощью розетки из трех тензорезисторов. В [3] перемещения на кромке отверстия определяют бесконтактным оптическим методом лазерной интерферометрии. Для сварного шва тензорезисторы малоприменимы из-за сложного рельефа поверхности и большой базы усреднения.

Метод отверстия в сочетании с методом лазерной интерферометрии имеет малую базу усреднения (соответствует диаметру отверстия) и безразличен к форме поверхности. Данная технология обеспечивает минимальные повреждения изделия и максимальную производительность.

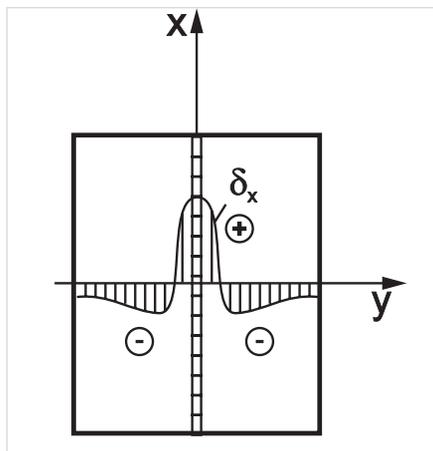


Рис. 1 — Характерное распределение продольных остаточных напряжений в зоне шва на пластине



Рис. 3 — Магнитошумовой прибор для измерения механических напряжений «Интроскан»



Рис. 4 — Сканер механических напряжений STRESSVISION EXPERT, основанный на методе магнитной анизотропии

Можно выделить еще третью группу методов — лучевые методы. Они основаны на измерении деформации кристаллической решетки, возникающей при наличии остаточных напряжений. Методы обладают достаточной достоверностью, но имеют несколько недостатков. Для рентгеновского метода — это малая глубина, на которой производят измерение напряженного состояния (до 20 мкм) и сложность в определении макронапряжений. Для метода нейтронной дифракции — невозможность выполнения работ в полевых условиях и длительность процедуры измерения.

Таким образом, на сегодняшний день не существует метода, который бы позволил достоверно измерить остаточные напряжения в сварной конструкции, не разрушая ее. Решение этой проблемы видится в разработке комплексной методики, включающей несколько методов. Такая методика должна основываться на преимуществах выбранных методов и максимально снизить влияние недостатков каждого из них.

Для получения достоверной информации об остаточных напряжениях в сварной конструкции, в том числе в области сварного шва, предлагается применить несколько методов, основанных на разных физических принципах. Каждый метод планируется к применению только для исследования напряженного состояния на определенной области изделия.

Область сварного шва, ЗТВ и прилегающую часть основного металла рекомендуется обследовать механическим методом лазерной интерферометрии с созданием зондирующих отверстий диаметром до 5 мм. А для основного металла рекомендуются неразрушающие физические методы. Среди физических методов рекомендуется обратить внимание на магнитные методы, например, на метод шумов Баркгаузена (прибор показан на рис. 3), магнитоанізотропный метод (прибор показан на рис. 4), позволяющие получать картограммы распределения поверхностных напряжений, коэффициента механических напряжений и разности главных механических напряжений.

Для указанных выше физических методов не требуется зачистка или специальная подготовка сканируемой поверхности. Видеть распределение напряжений на отсканированной площади металлической конструкции важно для понимания общего напряженного состояния конструкции.

Особенно эффективно предварительное знание напряженного состояния, при проведении технологических работ по снижению уровня остаточных механических напряжений.

В предложенной комплексной методике для физических методов предусмотрена новая область их применения — поиск областей на шве и ЗТВ, где уровень напряжений максимальный. Наличие такой информации позволяет снизить объем повреждения поверхности при применении механического метода лазерной интерферометрии за счет уменьшения количества засверленных глухих зондирующих отверстий.

Комплексная методика предполагает следующую последовательность выполнения измерений плоского напряженного состояния:

1. Построение полей остаточных напряжений на основном металле неразрушающим физическим методом. С помощью соответствующих тарировочных кривых получаем информацию о полях напряжений в мегапаскалях, единицах измерения напряженного состояния.

2. Физическим методом

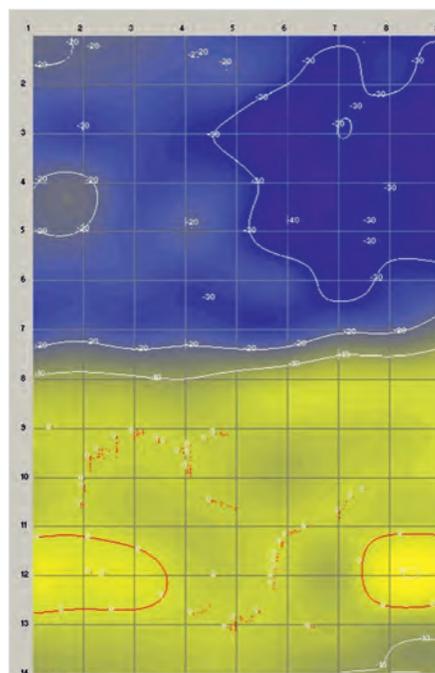
обнаруживаем зоны с высоким уровнем напряжений в шве и ЗТВ. Работы проводятся без тарировки. Полученная информация об областях с пиковым значением напряжений носит качественный характер.

3. Получение количественной информации о двухосном напряженном состоянии в шве и ЗТВ по результатам проведения работ механическим методом лазерной интерферометрии. Выбор точек на поверхности, где планируется выполнить зондирующие отверстия, определяется, в том числе, и результатами, полученным при выполнении п.2 данной методики.

4. Для некоторых выбранных точек при работе механическим методом определяем знак главных напряжений.

5. Механическим методом в нескольких точках поверхности на прилегающем к шву основному металлу, где уже была получена информация в соответствии с п.1 инструкции, измеряем величину и знак двух компонент плоского напряженного состояния.

6. Совмещаем результаты, полученные в п.п. 1 и 6 и строим эпюры распределения двух компонент напряженного состояния в шве, ЗТВ и прилегающем основному металлу.



А



Б

Рис. 6 — Карты РГМН (а) и КМН (б), полученные после проведения УУО

Что касается новых методов снятия остаточных напряжений, это — ультразвуковая ударная обработка (далее — УУО) и низкочастотная виброобработка (НВО). Комплексная методика была испытана при проведении работ по оценке эффективности УУО [5]. Результаты измерений полей остаточных напряжений показали, что УУО в ряде случаев является приемлемой альтернативой высокому отпуску. Из результатов проведенной работы установлено, что УУО, создавая в поверхностном слое сжимающие напряжения производит перераспределение напряжений в зоне сварки, что является положительным фактором с позиции эксплуатационной надежности сварной конструкции. На картах концентраторов (рис. 6) видно, что УУО оказывает эффективное воздействие на перераспределение остаточных сварочных напряжений.

Также из результатов проведенных работ установлено, что УУО производит в зоне ремонтного участка благоприятное перераспределение напряжений. На участке после УУО напряжения наплавленного участка, околшовной зоны и основного металла трубы были получены идентичны, близкие к равномерному распределению по всей площади, тогда как на участке без УУО наблюдались высокие концентраторы с большим уровнем градиентов.

Снижение остаточных напряжений основано на методике виброобработки на резонансных частотах. Она заключается в следующем: на трубу устанавливается вибратор или труба на вибростенд, через пульт управления включается режим «прогон» с помощью которого определяются собственные (резонансные) частоты трубы, после выбора частоты производится вибрационная обработка в течении 15–20 мин. Процесс вибрационного воздействия на металлоконструкцию колебаниями на резонансных частотах приводит к перераспределению и снижению напряжений в металле.

Проведенный в рамках оценки эффективности комплексной методики оценки и снижения уровня остаточных напряжений эксперимент показал возможность достижения нулевого уровня остаточных напряжений (рис. 7) [6].

Результаты применения виброобработки на резонансных частотах приведены в таблице.

Таким образом показано, что в настоящее время имеется достаточно эффективная приборная база для определения уровня

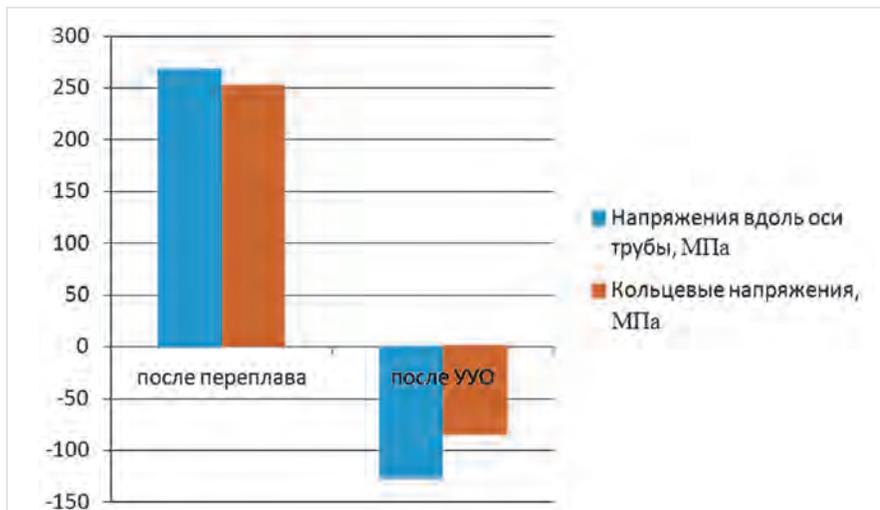


Рис. 7 — Результаты применения ультразвуковой ударной обработки для снижения уровня остаточных напряжений в ремонтной наплавке на поверхности трубы магистрального трубопровода

точка	Примечание	спродольные,	окольцевые,
		МПа	МПа
14-1	До виброобработки	+30	+30
14-2	После виброобработки	0	0

Таблица. Снижение напряженного состояния в результате виброобработки на резонансных частотах

напряженного состояния трубы. Параллельное применение нескольких различных методов оценки напряженного состояния позволяет получать достоверную информацию. Также имеется оборудование, позволяющее эффективно снимать остаточные механические напряжения в металле труб, что позволяет повысить надежность и срок службы трубопроводов.

Список литературы:

1. Gary S. Schajer. Practical residual stress measurement methods. UK: John Wiley & Sons Ltd, 2013, pp. 29–64.
2. Макаров Г.И., Антонов А.А. Метод лазерной интерферометрии для оценки уровня остаточных сварочных напряжений в сварных магистральных трубопроводах // Сварочное производство. 2018. №1. С. 38–42.
3. ГОСТ Р 52891-2007 Контроль остаточных

технологических напряжений методом лазерной интерферометрии. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2009. 12 с.

4. E837-13a Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. American Society for Testing and Materials, 2013, 19 p.
5. Антонов А.А., Летуновский А.П. Снижение остаточных сварочных напряжений методом ультразвуковой ударной обработки // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2012. №2. С. 21–26.
6. Летуновский А.П., Антонов А.А., Стеклов О.И. Снятие технологических остаточных напряжений в металлоконструкциях низкочастотной виброобработкой // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. №8. С. 12–16.



ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СНЯТИЯ ОСТАТОЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

ООО "МАГНИТ плюс", тел. +7 (812) 622 14 31(32), <https://magnitsp.ru>, mail@magnitsp.ru

Установка низкочастотной виброобработки ВТУ-01МП.2



Для снижения остаточных механических напряжений в металлоконструкциях методом низкочастотной виброобработки (НВО). Позволяет проводить обработку крупногабаритных деталей.

Сканер механических напряжений STRESSVISION EXPERT V.2.013



Для измерения и визуализации механических (остаточных) напряжений в основном металле, сварочных швах и околшовной зоне методом магнитной анизотропии.

Технологический комплекс ШМЕЛЬ



Для упрочняющей обработки сварных соединений методом ударного деформирования на ультразвуковой частоте (ультразвуковая ударная обработка).

Лазерный интерферометр «ДОН-5ЦЗ»



Лазерный интерферометр для определения величины, знака и направления главных осей напряжений путем регистрации полей малых перемещений в исследуемой зоне.