

## РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТРУБОПРОВОДОВ С НАКЛАДНЫМИ УСИЛИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Шмаков В.А., Гумеров А.К., Хайрутдинов Ф.Ш., Чахеев А.Л.

*В статье рассматриваются особенности напряженного состояния усилительных элементов, используемых при ремонте трубопроводов: заплат, муфт, воротников и др. Методом гидроиспытаний исследовано влияние формы заплат на прочность. Методами механических испытаний и фотоупругости исследовано влияние формы углового сварного шва на концентрацию напряжений и прочность. Предложены способы упрочнения усилительных элементов изменением формы углового шва за счёт обратной разделки кромок и дополнением углового шва до стыкового путём наложения дополнительных валиков.*

При ремонте действующих магистральных трубопроводов нередко используют накладные усилительные элементы – заплата и муфты. Однако прочность и долговечность участков трубопровода с накладными усилительными элементами, как правило, ниже, чем прочность неповрежденной трубы. Это вызвано тем, что заплата и муфты создают концентрацию напряжений и деформаций.

Одной из причин концентраций напряжений является резкое изменение конфигурации стенки трубы на участке с усилительным элементом, что приводит к непостоянной жесткости и сопротивляемости деформациям трубы. Уменьшить эту концентрацию можно, подбирая размеры и форму усилительного элемента.

Другой причиной концентрации напряжений является сварной шов с развитой поверхностью. Подбирая различные конструктивно-технологические варианты выполнения сварного шва, очевидно, можно также снизить концентрацию напряжений и повысить прочность отремонтированного участка трубы.

В данной работе исследовали влияние различных геометрических факторов на прочность заплата. При этом рассматривали наиболее неблагоприятный для заплата случай, когда продукт перекачки через сквозной дефект на стенке трубы попадает под заплату, что приводит к выпучиванию заплата и перегрузке сварных швов.

С целью изучения влияния формы заплата на прочность провели следующий эксперимент. На толстую плиту (толщиной 20 мм) приваривали заплата из пластин меньшей толщины (12 мм). Заплата изготавливали различных

форм, но все из одного материала – трубной стали 17Г1С. Сварные швы выполняли по единой технологии электродами марки УОНИ 13/55. Затем под заплатой создавали давления до разрушения. Разрушение во всех случаях происходило по сварному шву со значительным выпучиванием заплаты. Разрушение сварного шва происходило по линии ОС (рисунок 1). Результаты эксперимента приведены в таблице.

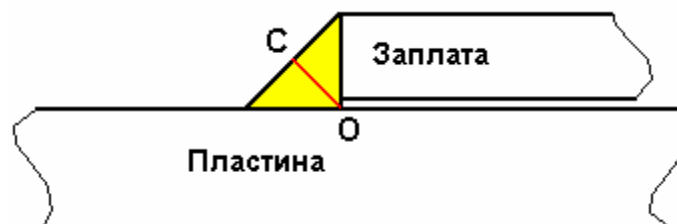
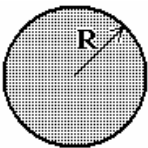
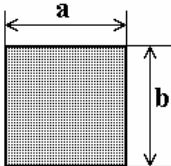
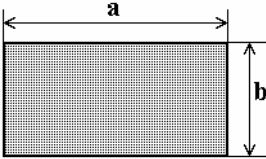
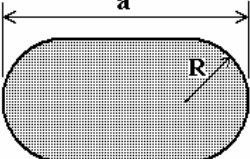


Рисунок 1. Схема сварного углового шва по периметру заплаты и линия его разрушения O→C

Таблица 1

Результаты испытаний заплат разных форм

Форма и размеры заплат	Круглая	Квадратная	Прямоугольная	Овальная
 R=60 мм	 a=120 мм b=120 мм	 a=240 мм b=120 мм	 R=60 мм a=240 мм	
Разрушающее давление, P	58 МПа	43 МПа	27 МПа	21,5 МПа
Длина сварного шва, L	377 мм	480 мм	720 мм	617 мм
Площадь заплаты, S	113,1 см <sup>2</sup>	144 см <sup>2</sup>	288 см <sup>2</sup>	257,1 см <sup>2</sup>
Площадь разрыва по линии ОС, S <sub>ос</sub>	3199 мм <sup>2</sup>	4073 мм <sup>2</sup>	6109 мм <sup>2</sup>	5235 мм <sup>2</sup>
Сила, выдавливающая заплату, Q	656 кН	619,2 кН	777,6 кН	552,8 кН
Напряжение в сварном шве, $\sigma_{св} = Q/S_{ос}$	205 МПа	152 МПа	127,3 МПа	105,6 МПа

По результатам испытаний видно, что круглая заплата обладает наибольшей прочностью. Отсюда можно сделать следующий вывод: оптимальная форма заплаты должна соответствовать наибольшему отношению параметра  $L/S$  ( $L$  – длина шва или периметр заплаты;  $S$  – площадь заплаты).

Кроме того, замечено, что при данном виде нагружения разрушение не начинается в угловых точках заплаты, а происходит на наиболее протяженных участках шва.

В момент разрушения заплаты претерпевают заметное выпучивание  $h$ . Отношение  $h/b$  или  $h/2R$  достигает значения 0,125, что свидетельствует о достаточно большой прочности и пластичности сварных швов.

Из таблицы также можно сделать вывод, что для данной технологии сварки и данных материалов разрушающее давление заплат различных форм будет находиться приблизительно в диапазоне

$$P = (100 \div 200) \cdot \frac{L \cdot d_{oc}}{S}.$$

Здесь  $d_{oc}$  – ширина полосы излома (рис. 1);  $P$  – разрушающее давление, выраженное в МПа.

Эта формула позволяет оценить прочность заплаты или установить допустимые размеры заплаты по заданному рабочему давлению (с учетом запаса прочности).

Задача определения локальной концентрации напряжений в сварных швах и оптимизация формы шва решалась главным образом учениками школы профессора О.А. Бакши [1, 2 и др.]. При этом исследовались тавровые и нахлесточные соединения с лобовыми швами. В данной работе схема нагружения сварных швов накладных заплат отличается от схемы нагружения лобовых и фланговых угловых швов металлоконструкций. В данном случае исследования прочности сварных швов усилительных элементов трубопроводов целесообразно проводить на модели, указанной на рисунке 2.

Введем следующие параметры поперечного сечения шва: высота  $k=BD$ ; основание  $n=AD$ ; глубина проплавления  $m=DO$ ; угол перехода от шва к трубе  $\beta=45^\circ$ . Нагрузка  $Q$  образует момент  $M = Q \cdot \ell$ , где  $\ell$  – плечо относительно вершины непровара  $O$  (расстояние точки  $O$  от линии действия силы  $Q$ ). В

эксперименте варьировали параметры  $n$  и  $m$ , измеряли разрушающий момент  $M$ . Испытывали два типа образцов – из стали 17Г1С и из оргстекла – путем выпиливания из листа оргстекла, непровар имитировали пропилом. Стальные образцы разрушались вязко, образцы из оргстекла – хрупко.

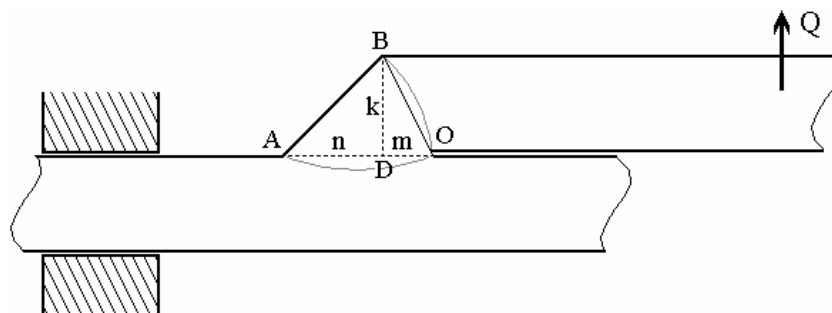


Рисунок 2. Основные параметры и схема нагружения углового шва нахлесточного соединения.

Во всех случаях разрушение распространялось от вершины непровара (точки  $O$ ). Результаты испытаний представлены на рисунке 3 в виде отношения  $M/M_0$ , где  $M_0$  – разрушающий момент при равнокатетном шве без проплавления ( $n=k$ ;  $m=0$ ). Сплошные кривые на графиках соответствуют образцам из стали, пунктирные – образцам из оргстекла.

Как следует из зависимостей, показанных на рисунке 3, существует два способа повышения прочности сварных швов – увеличение горизонтального катета (основания)  $n$  и увеличение глубины провара  $m$ . По-видимому, совместное увеличение размеров  $m$  и  $n$  еще больше увеличивает прочность сварного шва.

Эти выводы для вязких материалов практически очевидны, т.к. при увеличении параметров  $m$  и  $n$  происходит увеличение площади разрушения, которое всегда начинается от вершины непровара  $O$  и распространяется приблизительно перпендикулярно к поверхности сварного шва (по линии  $OC$ , рис. 1).

Отметим, что углубить вершину непровара (увеличить параметр  $m$ ) можно двумя способами: путем глубокого проплавления и путем применения специальной разделки. Во втором случае кромки привариваемой заплаты должны

быть разделаны по линии ОВ (рис. 2), т.е. должен быть создан обратный скос. При первом способе достигается экономия сварочных материалов, но расходуется больше электроэнергии; при втором способе требуется специальная разделка кромок заплата. Выбор того или иного способа должен определяться исходя из экономии общих затрат и технической возможности реализации способа в конкретных полевых условиях.

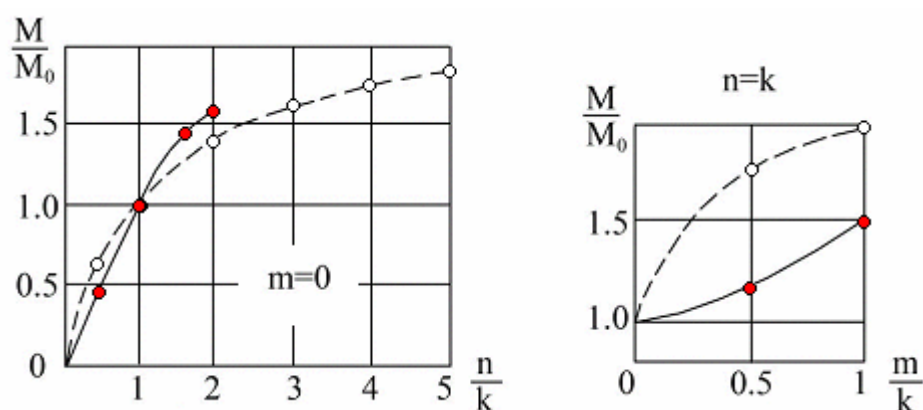


Рисунок 3. Зависимость разрушающего момента от соотношения параметров сварного шва

В случае хрупких или усталостных разрушений в условиях циклических нагрузок причину упрочнения следует искать не в увеличении площади разрушения, а в снижении локальной концентрации напряжений в очаге разрушения, т.е. в вершине непровара (в окрестности точки О). Чтобы проверить этот факт для рассматриваемых соединений, выполнили эксперимент на фотоупругих моделях. Схема нагружения соответствует рисунку 2.

На рисунках 4 и 5 приведены картины изохром, наблюдаемые на этих моделях под нагрузкой в поляризованном свете. Момент нагрузки и все размеры моделей были одинаковыми, кроме параметра  $m$ .

Из этих картин наглядно видно, что вершина непровара является сильным концентратором напряжений. С приближением к вершине непровара (к точке О, рис. 1) растут порядки полос изохром, что свидетельствует о пропорциональном увеличении напряжений.

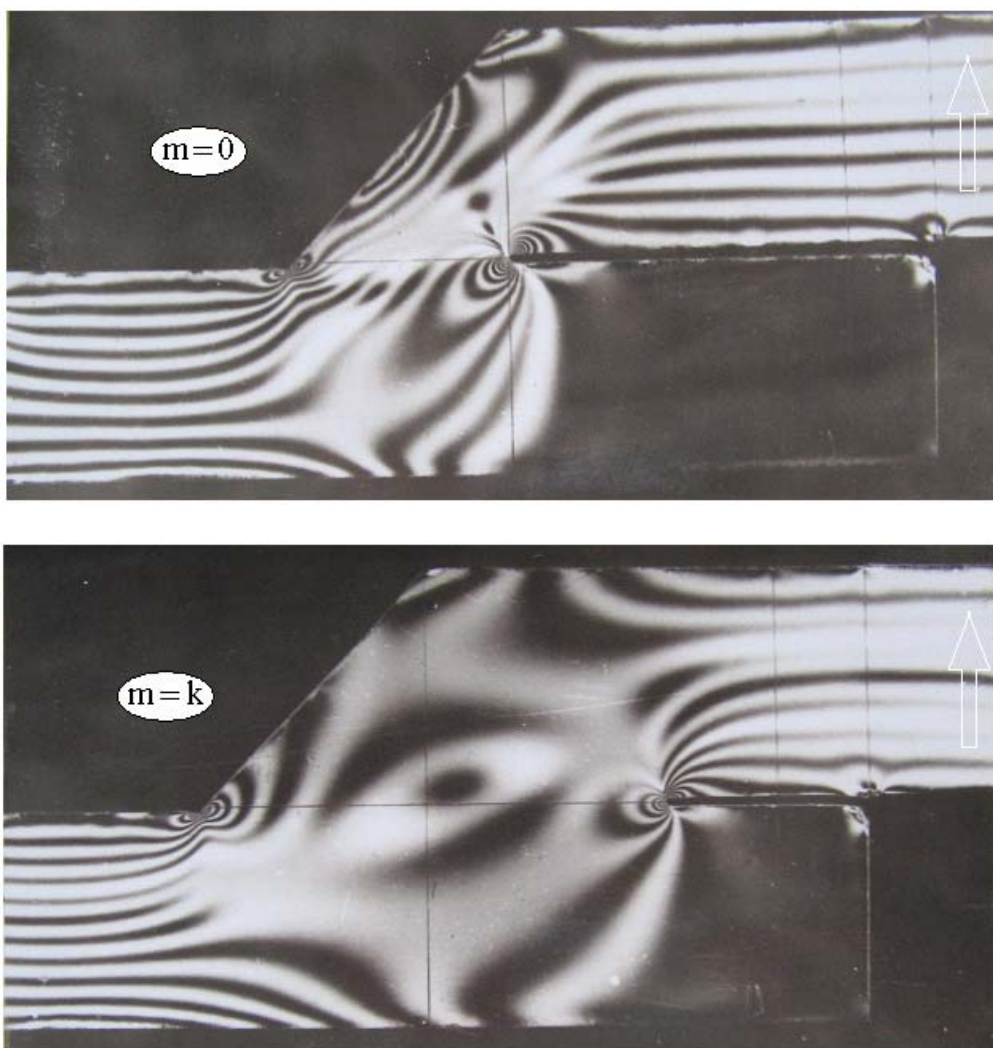


Рисунок 4. Поля изохром, соответствующие распределению напряжений в сварных швах усилительных элементов

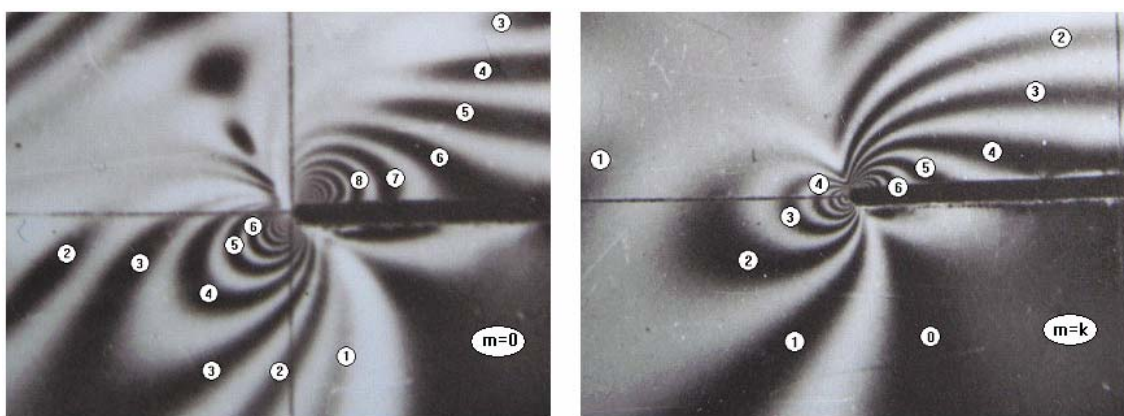


Рисунок 5. Концентрация напряжений в окрестности вершины непровара

Во втором случае (при  $m > 0$ ) этот концентратор несколько слабее. Там порядки полос изохром меньше, чем в первом случае (рис. 5). Поэтому критическое состояние в вершине непрямого угла достигается при большей нагрузке, что и подтверждает наше предположение о механизме упрочнения при хрупких и усталостных разрушениях.

Отметим, что в данной работе вместо трубы рассматривали пластину, тем самым пренебрегли кривизной поверхности, на которую приваривается заплата. Если внимательно проанализировать схему нагружения сварных швов с учётом кривизны поверхности трубы, то заметим, что любой участок сварного шва будет находиться под действием трёх взаимно перпендикулярных составляющих:  $Q$ ,  $N$ ,  $T$ . Из них действие силы  $Q$  рассмотрели выше.

Составляющая нагрузки  $N$  направлена перпендикулярно сварному шву, поэтому по отношению к этой части нагрузки угловой шов становится лобовым (рис. 6). Составляющая нагрузки  $T$  направлена параллельно сварному шву. По отношению к этой составляющей сварной шов становится фланговым.

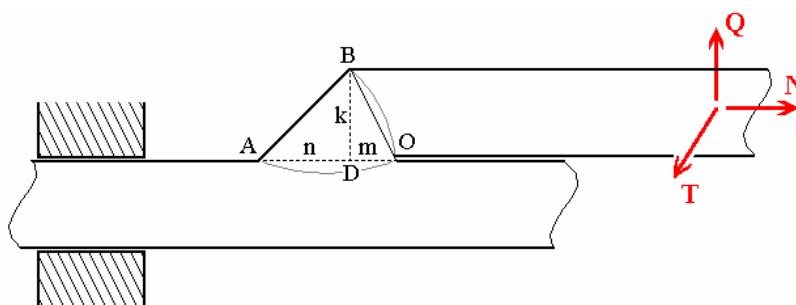


Рисунок 6. Разложение на составляющие нагрузки на сварной шов

Как отмечено выше, лобовые и фланговые угловые швы исследованы в трудах Бакши О.А. и его учеников. Полученные результаты качественно согласуются с вышеприведёнными выводами.

Таким образом, результаты данной работы позволяют оптимизировать как форму заплат, так и конструктивно-технологическое исполнение самих сварных швов накладных усилительных элементов при ремонте трубопроводов.

## Литература

1. Бакши О.А., Зайцев Н.Л., Шрон Р.З. Повышение несущей способности нахлесточных и тавровых соединений с лобовыми швами // Сварочное производство. 1977, № 9. 3-5.

2. Даминов И.А., А.В. Колесов А.В., Сираев А.Г. Повышение работоспособности накладных усилительных элементов нефтепроводов // Диагностика и работоспособность магистральных трубопроводов. – Уфа, ВНИИСПТнефть, 1989. С 72-77.