

М178249

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

Анатолий Алексеевич СТЕПАНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОСУДОВ ИЗ СТАЛИ СП28
ПРИ НАЛИЧИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
КОНЦЕНТРАТОРОВ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

(05.04.05 — «Машины и технология сварочного производства»)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



1178249

Степанов А.А. Исследования

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель — д. т. н., профессор С. А. Куркин.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Н. В. Шиганов,
кандидат технических наук Ю. Л. Яровинский.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета

Автореферат разослан « 9 . » *ноября* . . 1972 г.

Защита диссертации состоится « 21 . » *декабря* 1972 г.
на заседании Совета Московского ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшего технического училища
имени Н. Э. Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бау-
манская ул., 5.

С диссертаци-
ей имени Н. Э. Б

МВТУ

Ваши отзы-
мы рецензи-
онные печать

заве-
дущему

Ученый секрет

К. Т. Н., доц

НОВ

M178249

Сталь СП28 обладает высокой удельной прочностью, хорошими технологическими свойствами и широко используется для изготовления сварных тонкостенных емкостей, применяемых в установках с малым запасом прочности. Наличие сварных соединений неизбежно сопровождается присутствием технологических концентраторов металла — лургического и геометрического характера (различие механических свойств и структуры в основном и наплавленном металле, поры, непровары, форма шва, депланации кромок и т.п.).

Нормами на качество сварных соединений из высокопрочных сталей не допускают никаких дефектов в продольных швах цилиндрических сосудов и жестко регламентируют размер и количество дефектов допустимых к исправлению.

Как показал наш опыт изготовления цилиндрических сосудов из стали СП28 толщиной 1 мм в условиях отлаженного мелкосерийного производства, около 10% сосудов имеют в стыковых швах недопустимые к исправлению дефекты согласно норм (в основном поры диаметром до 0,3 мм и ослабление швов). Следовательно, если пользоваться нормами, то брак по сварке составит 10 + 15% и соответственно увеличится стоимость изготовления сосудов.

Существующие нормы на качество сварных соединений из высокопрочных сталей составлены из технологических соображений и их обоснованность, с точки зрения влияния дефектов на прочность соединения, не является несомненной.

Имея информацию о наличии дефектов в шве, необходимо решить: допустить узел или деталь к эксплуатации или направить его в исправление? Для объективного решения данного вопроса необходимо знать: как квалифицировать дефекты по воздействию на механические свойства? Даст ли исправление дефектов требуемое повышение несущей способности или ухудшит ее? Влияние дефектов на прочность сварных соединений в большинстве случаев оценивают по результатам испытаний простых образцов на одноосное растяжение и загиб. Такая оценка не учитывает особенностей работы продольных и кольцевых швов в цилиндрическом сосуде, так как тонкостенным сосудам свойственно двухосное напряженное состояние и неоднократное нагружение внутренним давлением. Поэтому для каждого типа шва влияние одного и того же дефекта может быть различным и должно изучаться отдельно, в условиях, наиболее полно отражающих характер и условия нагружения.

В работах Г.А.Николаева, И.И.Макарова, Г.В.Лемчужникова, В.И.Труфякова, И.В.Кудрявцева, Д.М.Шура и др., показано, что основным фактором, определяющим место разрушения статически проч-

ных сварных конструкций в условиях переменного и, в том числе, низкочастотного нагружения, являются концентраторы напряжений. В сварных соединениях таким концентратором могут быть поры, непровары, усиления и т.д. Поэтому прежде чем вынести окончательное решение о работоспособности сварного соединения необходимо знать, при каких условиях дефект становится источником трещины, как быстро трещина растет при повторных нагружениях и какой ее критический размер при заданном уровне напряжений. Знание этих вопросов поможет обосновать требования к качеству сварных соединений и изготовить конструкцию более экономично при высокой надежности.

Целью настоящей работы является исследование конструктивных технологических факторов, определяющих прочность тонкостенных сварных цилиндрических сосудов из стали СП28.

Задачи исследования следующие:

1. Исследовать несущую способность при статическом и повторно-статическом нагружении внутренним давлением сварных тонкостенных сосудов из стали СП28 в зависимости от конструктивных и технологических факторов.

2. Разработать методику исследования влияния дефектов в стыковых продольных и кольцевых швах на несущую способность тонкостенных цилиндрических сосудов из высокопрочных сталей при статическом и повторно-статическом нагружении внутренним давлением.

3. Обосновать требования на браковку, исправление и приемку сварных соединений сосудов из стали СП28 толщиной 1 мм.

Глава I. Оценка технологии сварки с позиций прочности цилиндрического сосуда, нагруженного внутренним давлением.

В качестве объекта исследования были выбраны цилиндрические сосуды трех конструктивных вариантов, изготовленные из тонколистовой стали СП28 толщиной 1 мм. Диаметр сосудов всех трех типов 80±200 мм, а длина сосудов I и III типа в 3±4 раза больше диаметра, а сосуда тип II – в 9±10 раз. Цилиндрическая часть сосуда состоит из обечайки, сваренной вдоль образующей стыковым швом. В сосуде тип II обечайка составная, из двух частей равной длины, сваренных встык кольцевым швом. К одному торцу обечайки приваривается эллиптическое доннышко, а к другому – фланец. К наружной поверхности обечайки сосуда тип III короткими угловыми швами вдоль образующей привариваются 8 симметрично расположенных квадратных бобышек.

К сосудам предъявляются следующие требования:

- проходное сечение трубы должно быть в пределах 4-го класса точности, в том числе в зоне кольцевых швов и местах приварки бобышек;

- стрела прогиба образующей сосудов тип I не более 0,5 мм, а сосудов тип II не более 0,7 мм;

- шов бобышек должен выдерживать изгибающий момент

$M_{изг} = 900 \text{ кг.см}$;

- усиление продольных и кольцевых швов на наружной поверхности не более 15%, а на внутренней - не более 10% от толщины стенки сосуда;

- сосуды тип I и тип II должны надежно работать как при статическом, так и повторно-статическом нагружении внутренним давлением в пределах 1000 нагружений;

- напряжения, возникающие в материале стенки сосуда от рабочего давления, достигают 110 кг/мм², а при перегрузках - 130 кг/мм².

Основной задачей при разработке технологии сварки и после - дующей обработки являлось обеспечение однородности механических свойств сварного соединения и минимального отклонения формы сосуда от проектной.

Исследование механических свойств стыковых сварных соединений при одноосном растяжении, испытании на загиб, симметричном ($\sigma_1 = \sigma_2$) и несимметричном ($\sigma_1 = 2\sigma_2$) двухосном растяжении показали, что оптимальной технологией выполнения продольных и кольцевых швов сосудов всех трех типов является автоматическая аргоно-дуговая сварка без присадочной проволоки с последующим высоким отпуском и прокаткой шва между роликами. Для прокатки продольных и кольцевых швов сосуда разработана и внедрена специальная машина.

Для приварки бобышек к цилиндрической поверхности сосудов тип III разработана специальная оснастка, обеспечивающая точную фиксацию бобышек на трубе, предотвращающая сквозное проплавление и коробление в местах приварки бобышек и позволяющая выполнять как автоматическую, так и ручную аргоно-дуговую приварку бобышек.

Сварные соединения, выполненные по разработанной технологии, имели удовлетворительную форму и размеры.

После закалки сосуды подвергали гидротестированию до разрушения с измерением окружных деформаций ϵ_1 .

Результаты статических испытаний сосудов оценивали по степе-

ни приближения несущей способности (оцениваемой конструктивной прочностью σ_k и величиной окружной деформации ϵ_r) к их предельной величине, определяемой по результатам испытаний основного металла и сварных соединений на симметричное двухосное растяжение методом выпучивания. Предельной несущей способности ($\sigma_k \geq 165 \text{ кг/мм}^2$ и $\epsilon_r \geq 1,5\%$) достигли:

1. Сосуды тип I и II с прокатанными продольными и кольцевыми швами.

2. Сосуды тип III с приваренными бобышками, если выполнены следующие условия:

а) очертание шва бобышек имеет плавный переход к основному металлу при величине вертикального катета $I \pm 1,5 \text{ мм}$, а горизонтального $I \pm 3 \text{ мм}$;

б) глубина проплава стенки обечайки в пределах $20 \pm 80\%$.

В пределах одной плавки в листовой стали марки СП28 количество углерода может колебаться от $0,27$ до $0,40\%$. Испытания, выполненные при одноосном и двухосном симметричном и несимметричном растяжении сварных соединений толщиной 1 мм , показали, что предельная несущая способность обеспечивается, если количество углерода в стали СП28 находится в пределах $0,27 \pm 0,36\%$, в том числе и для сосудов с приваренными бобышками.

Увеличение содержания углерода сверх $0,36\%$ хотя и не снижает конструктивную прочность сосудов, но заметно уменьшает деформационные характеристики сварного соединения и основного металла, что увеличивает опасность преждевременного разрушения.

При повторно-статическом нагружении пульсирующим циклом ($\sigma = 0,1 \div 0,15$) с частотой 10 ± 15 циклов в минуту испытывали обечайки и сосуды тип I и тип II. В процессе испытаний, при помощи периметромера, измеряли приращение периметра в средней части обечайки или сосуда.

Результаты испытаний показали, что сталь СП28 даже при напряжениях цикла равных пределу текучести ведет себя как циклически упрочняющаяся (деформации накапливаются только при первых трех циклах, а при последующих циклах прирост деформаций ничтожен). Разрушение в процессе повторно-статических испытаний, как правило, начиналось по линии сплавления продольного шва. В разрыве четко видны усталостные трещины полуэллиптической формы, что позволяет с достаточной точностью определить их размеры. Несущая способность сосудов тип I и тип II с качественными продольными и кольцевыми швами при повторно-статическом испытании на

базе 1000 циклов соответствует 148 кг/мм².

Таким образом была отработана технология сварки сосудов и определена несущая способность при статическом и повторно-статическом нагружении сосудов внутренним давлением.

Глава II. Исследование влияния дефектов на несущую способность сварных соединений сосуда

Результаты анализа рентгеновских пленок стыковых (более 10000 штук) и угловых швов (3840 штук) сосудов тип I и тип III из стали Сп28 толщиной 1 мм, сваренных в условиях мелкосерийного и серийного производства, свидетельствуют, что избежать появления дефектов в швах практически невозможно: 18% сосудов тип III имели различные дефекты в швах бобышек, 8% – в продольных швах и 5% в кольцевых швах. Из общего числа дефектных швов пористость составляет более 70%. Поры в большинстве случаев имеют сферическую форму и располагаются по линии сплавления, близко к поверхности корня шва, либо частично выходя на его поверхность. В стыковых швах наиболее характерны цепочки пор и одиночные поры диаметром до 0,25 мм, а в швах бобышек – диаметром до 0,5 мм.

Частоту расположения пор характеризовали отношением $X = \frac{L}{d}$ (L – среднее арифметическое расстояние между порами в мм, d – диаметр пор в мм).

Согласно рентгенограммы каждый шов разбивали на участки в зависимости от длины цепочки L , и характеристики пористости X . Поры с $X \geq 5$ считали одиночными, а если $X \leq 3$ – такие участки считали цепочкой пор.

При статическом и повторно-статическом испытании обечаек и макетных сосудов исследовали влияние длины цепочки пор L и частоты расположения пор X на несущую способность продольных и кольцевых швов. Для этого была разработана методика испытаний. Особенности методики заключаются в следующем.

Объект испытания должен иметь протяженный шов, нагружаемый в условиях, близких к работе его в реальных условиях. Таким объектом может быть обечайка со съёмными торцевыми заглушками, нагружаемая внутренним давлением.

Наличие, размеры и взаимное расположение дефектов устанавливаются до испытания по рентгенограмме или другим методом неразрушающего контроля.

Статическое нагружение до разрушения позволяет установить:

а) величины σ_k и ϵ_1 , характеризующие несущую способность сосуда при однократном нагружении. При известном рабочем уровне напряжений имеется возможность определить запас прочности $n_1 = \frac{\sigma_k}{\sigma_{раб}}$, запас пластичности $n_2 = \frac{\epsilon_{1раб}}{\epsilon_1}$ и тем самым оценить влияние дефекта, ответственного за разрушение;

б) место начала разрушения и расположение линии разрыва относительно дефектов, зафиксированных на рентгенограмме. Начало разрушения устанавливается по местному вспучиванию кромок разрыва. Если в этом месте вскрывается дефект, его считают причиной разрушения;

в) если разрыв проходит в стороне от дефектов, то следует считать, что дефекты влияния не оказали.

Повторно-статическое нагружение производится при напряжении цикла на 10+15% выше максимального рабочего. Если разрушение произошло раньше заданного числа циклов (принятого за базу), то осмотр кромок разрыва позволяет установить:

а) место начала разрушения по вспучиванию кромок разрыва. Дефект, расположенный в этом месте, считается ответственным за разрушение, а размеры усталостной трещины от этого дефекта — критическими для данного напряжения цикла σ ;

б) размеры усталостных трещин от других дефектов, вскрытых разрывом, а также характер, размеры и расположение по толщине исходных дефектов. Хотя эти усталостные трещины и не явились непосредственной причиной разрушения, их размеры дают представление о процессе разрушения и взаимном влиянии соседних дефектов за данное число (N) циклов при напряжении цикла σ .

Статический разрыв образцов, прошедших различное число нагружений с последующим осмотром кромок разрыва и измерением размеров исходных дефектов и усталостных трещин, позволяет дать общую картину возникновения и развития разрушений при различных уровнях нагружений. Результаты исследования представляются в виде номограммы, позволяющей определить, какое число нагружений при напряжении σ способен выдержать шов, содержащий дефекты. Использование разработанной методики позволило получить конкретные данные о влиянии пористости в продольных и кольцевых швах, а также швах бобышек.

Результаты испытаний сосудов и обечаек показали, что статическая прочность сосудов тип I, тип II и тип III из стали СП28 толщиной I мм не снижается если:

а) на каждые 100 мм продольного шва имеется одна из перечис-

ленных ниже групп пор диаметром $d \leq 0,25$ мм;

- единичные поры ($X \geq 5$) в количестве до 10 штук, расположенные с интервалом $b \geq 5d$, но не менее 0,75 мм;

- две цепочки неслившихся пор протяженностью до $L = 6$ мм. Интервал между цепочками $b \geq 5L$, но не менее 10 мм;

- сочетание 5 шт. единичных пор ($X \geq 5$) и одной цепочки ($L \leq 6$ мм) неслившихся пор, если расстояние между цепочкой и близлежащей одиночной порой не менее L ;

б) в кольцевых швах, расположенных как вблизи жесткости (шов № 2), так и в среднем сечении обечайки (шов № 4); одиночные поры $d \leq 0,3$ мм, расположенные параллельно оси кольцевого шва. Расстояние между порами $b \geq 5d$, количество пор не более 5 шт. на каждые 100 мм шва. В кольцевом шве № 4 - I цепочка неслившихся пор $d \leq 0,3$ мм длиной $L \leq 5$ мм, на каждые 100 мм шва;

в) в швах бобышек-неслившиеся внутренние поры $d \leq 0,5$ мм общей площадью до $1,5$ мм² в каждом шве;

Для кольцевых швов в цилиндрическом сосуде, находящихся вблизи жесткостей, наиболее опасными являются цепочки пор, расположенные вдоль оси кольцевого шва, а для швов № 4 (в среднем сечении обечайки) - поры в одном поперечном сечении кольцевого шва. При повторно-статическом испытании сосудов или обечаек (на базе 1000 циклов) от каждой одиночной поры или цепочки пор протяженностью $L \leq 4$ мм, в продольном шве образовались усталостные трещины полуэллиптической формы, которые четко видны в изломе.

Анализ изломов позволил установить:

- поры, расположенные с интервалом $b \geq 4,2$ мм, не оказывают взаимного влияния на развитие трещин и могут считаться обособленно отдельными;

- две поверхностные трещины, развивавшиеся от единичных или групповых пор, начинают взаимодействовать, если их кончики соприкасаются;

- относительный размер трещин стремится к значению 4:7;

- отличительной особенностью развития трещин от пор в кольцевых швах является быстрое развитие глубины трещины, а ее длина не выходит за пределы ширины шва;

- сочетание внутренних и поверхностных пор в одной цепочке увеличивает скорость развития глубины усталостной трещины в продольном шве. Поры, не выходящие на поверхность шва, менее опасны, чем поверхностные, для продольных и кольцевых швов;

- превышение длины усталостной трещины по сравнению с исход-

ной длиной цепочки пор составляет $I+I,3$ мм на сторону. Провисание корня продольного шва сверх 18% от толщины свариваемого металла снижало несущую способность сосудов при повторно-статическом нагружении до $\sigma = 123 \text{ кг/мм}^2$ (на базе 1000 циклов), в то время как на статическую прочность такой дефект влияния не оказал.

Влияние непроваров и надрезов исследовали при испытании коритообразных образцов. Оказалось, что чувствительность основного металла к надрезу и наплавленного к непровару практически одинакова. С увеличением толщины металла чувствительность стали СП28 как к надрезу так и к непроварам увеличивается. На основании полученных закономерностей развития трещин от пор выработаны требования на качество сварных соединений, составлена номограмма, позволяющая определить, какое число циклов N при напряжении σ способен выдержать шов, содержащий дефекты.

Глава III. Исследование допустимости исправления дефектов в швах сосуда.

Дефекты формы шва—депланации кромок, усиления, провисание корня шва и т.п. — достигающие 25% от толщины основного металла, эффективно устраняются прокаткой швов роликами. Прокатка швов попутно устраняла корсетное уменьшение проходного сечения в зоне кольцевых швов и уменьшала стрелу прогиба продольного шва. Эти обстоятельства позволили ввести прокатку швов как обязательную технологическую операцию после сварки и высокого отпуска.

Дефекты наплавленного металла — поры $d \leq 0,5$ мм независимо от их количества, трещины, непровары, ослабление и т.п. — устраняли методом повторного перевара без разделки дефектных мест. Перевар осуществляли (как всей длины шва так и его части) автоматической аргоно-дуговой сваркой без присадочной проволоки на повышенной погонной энергии (на 15+18% по сравнению с режимом сварки) для обеспечения сквозного проплавления. В некоторых случаях один и тот же шов переваривали 2+3 раза с последующим высоким отпуском после каждого перевара. После каждого перевара толщина шва увеличивалась, но шов оставался плавным, одинакового сечения без наплывов и чешуйчатости. После того как дефекты были устранены, шов прокатывали роликами с целью заглаживания усиления и проплава шва заподлицо.

Исследование влияния переваров шва на свойства сварных соединений проводили по следующим этапам:

1. Исследование хим. состава и твердости наплавленного металла.

2. Статические испытания при симметричном растяжении плоских образцов на выпучивание и цилиндрических сосудов до разрушения.

3. Повторно-статические испытания цилиндрических сосудов и обечаек.

Результаты исследований подтвердили возможность успешного устранения дефектов в пересекающихся продольном и кольцевых швах. Установлено:

а) Одно-двух и трехкратный перевар шва практически не изменяет хим. состав наплавленного металла.

б) Несущая способность продольных и кольцевых швов в цилиндрическом сосуде даже после трехкратного перевара достигает предельных значений как при статическом ($\sigma_k \geq 165 \text{ кг/мм}^2$; $\epsilon_r \geq 1,5\%$), так и повторно-статическом нагружении ($\sigma = 148 \text{ кг/мм}^2$ на базе 1000 циклов).

в) Если продольный шов уже дважды подваривали и требуется подварить пересекающийся с ним кольцевой шов, то подварку последнего можно допускать I раз.

г) В швах бобышек (сосуд тип III) такие дефекты, как поверхностные поры $d \leq 0,5 \text{ мм}$ и трещины, устраняются подваркой ручной или автоматической аргоно-дуговой сваркой с присадочной проволокой св ИХМА $\varnothing 1,2 \text{ мм}$ с предварительной разделкой дефектного места до удаления дефекта. В процессе подварки дефектного места следует избегать сквозного проплавления стенки обечайки, а величина горизонтального катета шва бобышки должна быть не более 4 мм. Поры и трещины, расположенные на внутренней поверхности трубы, устранить методом перевара практически невозможно, такие сосуды подлежат окончательной браковке.

Интересным представляется тот факт, что из общего числа обечаек с качественными и дефектными швами (в том числе и сосуды после исправления дефектов), подвергнутых повторным нагружениям, только пять разрушились при втором нагружении, тогда как все другие обечайки и сосуды даже при напряжениях, близких к статическому разрушению, выдержали не менее 46 циклов. Это позволяет предположить, что сосуды, предназначенные для однократного использования, целесообразно нагружать внутренним давлением при контрольных испытаниях не менее 3 раз.

Общие выводы

1. Разработана методика исследования влияния дефектов на не-

сущую способность тонкостенных сосудов из высокопрочных сталей при статическом и повторно-статическом нагружении.

2. Использование разработанной методики позволило получить конкретные данные о влиянии пористости, величины усиления швов и непроваров в типовых соединениях сосудов из стали СП28 толщиной 1 мм. Эти данные использованы при составлении технических условий на сварные соединения.

3. Экспериментальная работа, выполненная в соответствии с разработанной методикой, позволила установить следующие закономерности развития усталостных трещин в продольном шве при малоцикловом нагружении сосудов из стали СП28 толщиной 1 мм:

а) в диапазоне напряжений цикла $130+150 \text{ кг/мм}^2$ критическое значение глубины поверхностной трещины можно принимать 0,6 мм;

б) при росте усталостной трещины от отдельной поры и цепочек пор длиной менее 1,6 мм, отношение длины ее к глубине составляет 4+7. Для более протяженных цепочек поверхностных пор трещина растет преимущественно в глубину, а ее длина превышает начальную длину цепочки на 2+2,6 мм;

в) сочетание поверхностных и внутренних пор в одной цепочке увеличивает скорость развития глубины трещин при повторно-статическом нагружении цилиндрического сосуда внутренним давлением.

4. При статическом нагружении сосуда внутренним давлением одиночные поры $\leq 0,5 \text{ мм}$ в кольцевом шве могут явиться причиной нарушения герметичности при $\leq 60 \text{ кг/мм}^2$, в то время как такие же поры в продольном шве нарушение герметичности не вызывают. Отличительной особенностью развития усталостных трещин в кольцевых швах при повторных нагружениях является быстрое развитие глубины трещины, а ее длина, как правило, не выходит за пределы ширины шва.

5. Значительное провисание корня продольного шва является дефектом, заметно снижающим статическую выносливость на базе 1000 циклов. Например, провисание корня шва порядка 18% от толщины основного металла равносильно действию цепочки пор длиной 4 мм.

6. Отработана технология сварки и последующей обработки типовых сварных соединений, обеспечивающая высокую надежность сосудов из стали СП28 толщиной 1 мм с отклонениями по количеству углерода от 0,26% до 0,36%. С этой целью создана и внедрена в производство технологическая оснастка для автоматической приварки и контроля прочности швов бобышек, машина для раскатки продольных и кольцевых швов цилиндрических обечаек.

7. Исследование влияния исправлений дефектов наплавленного

металла и формы шва показало, что даже трехкратный перевар с последующей прокаткой шва не снижает несущую способность сварных соединений при статическом и повторно-статическом нагружении. Это позволяет рекомендовать не ограничивать количество дефектов в швах, допустимых к исправлению, методом перевара.

8. Из 200 сосудов испытанных пульсирующим циклом в диапазоне напряжений $135-160 \text{ кг/мм}^2$, только 5 разрушились на втором цикле. Остальные выдержали не менее 46 нагружений. Это позволяет предположить, что предназначенные для одноразового использования сосуды целесообразно нагружать внутренним давлением при контрольных испытаниях не менее 3 раз.

9. Результаты исследований внедрены на двух предприятиях. Экономический эффект по одному типу изделий в условиях мелкосерийного производства составляет 91 тыс.руб.

Диссертация содержит 146 страниц, 51 рисунок, 26 таблиц.

В списке литературы приведено 49 источников.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. А.А.Степанов, С.А.Куркин. Конструктивная прочность и надежность тонкостенных сосудов из стали СП28 после исправления дефектов в сварных швах. Сварочное производство № 12, 1970.

2. А.А.Степанов, С.А.Куркин. Влияние пор в продольных швах на прочность тонкостенных цилиндрических сосудов из стали СП28. Сварочное производство, № 7, 1971.