

УДК 624.014.25

Усеинов Б. К., Измаилова Г. М.,
Ниметулаева Г. Ш., Муратов М. А.

РАСЧЕТ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

У статті розглядаються питання визначення механічних характеристик титанового сплаву ОТ4 і розрахунок зварених з'єднань у конструкціях типу оболонок із цього ж сплаву.

Ключові слова: *зварене з'єднання, діаграма розтягання, апроксимація діаграми, поздовжній і поперечний шви, пружний-пластичний матеріал, оболонка, тонкостінна посудина, титановий сплав ОТ4.*

В статье рассматриваются вопросы определения механических характеристик титанового сплава OT4 и расчет сварных соединений в конструкциях типа оболочек из этого же сплава.

Ключевые слова: *сварное соединение, диаграмма растяжения, аппроксимация диаграммы, продольный и поперечный швы, упруго-пластический материал, оболочка, тонкостенный сосуд, титановый сплав OT4.*

Questions of the determination of the mechanical features of the titanium alloy are considered in article OT4 and calculation of the welded join in design of the type shell thereof alloy.

Key words: *welded join, diagram of the sprain, approximation diagrams, longitudinal and transverse seams, springy-plastic material, shell, thinwallary container, titanium alloy are considered in article OT4.*

Постановка проблемы. Титан и титановые сплавы широко применяются в современном машиностроении, так как обладают высокой прочностью, коррозионной стойкостью, хорошо свариваются. Однако изготовление сварных конструкций из них требуют серьезной защиты от азота, кислорода и водорода. Кроме того, сварные швы обладают высокой чувствительностью к термическому циклу сварки, что приводит к образованию крупнозернистой структуры в шве и зоне термического влияния, образованию хрупких фаз. Газонасыщение способствует замедленному разрушению сварного шва.

При подготовке кромок заготовки также возникают серьезные трудности. Поэтому важно сравнение механических свойств сварных швов титановых сплавов при использовании различных способов сварки и обработки кромок, свариваемых элементов.

Анализ публикаций. В [1] приведены сведения о процессе сварки титановых сплавов, способы и режимы сварки, обеспечивающие наиболее оптимальные параметры сварных соединений. В [2] приводятся сведения по аппроксимации экспериментальных кривых напряжения – деформации и на их основе оценке напряжений в сварном шве, обеспечению прочности тонкостенных сосудов. В [3] разработана технология лазерной сварки по кромкам, полученным лазерной резкой, результаты испытаний образцов с поперечным и продольным швом с использованием различных видов сварки.

Целью статьи является сравнительный анализ механических свойств поперечных и продольных сварных швов на примере тонколистового титанового сплава OT4 с использованием результатов для оценки прочности оболочечных конструкций, работающих под внутренним давлением.

Изложение основного материала. Методами сварки получают изделия разнообразной сложности с высокими эксплуатационными характеристиками.

Качество сварных соединений достигается рациональным конструированием, совершенствованием технологических процессов сборки

и сварки, созданием новых технологичных приемов сварки, установлением рациональных форм соединений, совершенствованием методов их расчета на прочность.

В последние годы для изготовления особо ответственных конструкций нашли широкое применение титан и титановые сплавы, которые обладают высокой удельной прочностью, стойкостью к высоким температурам коррозии. Однако наряду с достоинствами они обладают и рядом существенных недостатков технологического характера, связанных с процессом сварки и в заготовительном производстве [1]. Большинство этих недостатков можно избежать, применяя лазерную резку и лазерную сварку с использованием инертных газов, при контроле качества и механических свойств, получаемого сварного шва.

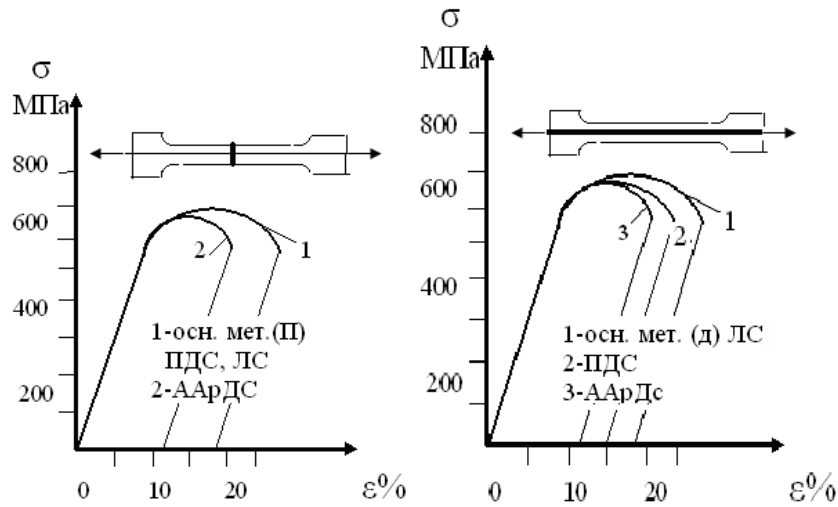
В данной работе мы рассматриваем вопросы, касающиеся конструкционных материалов, прочности сварных соединений и их механических свойств. В частности, нами проведены испытания на растяжение образцов из тонколистовой конструкции с продольным и поперечным расположением швов. Материал образцов – сплав OT4, легированный незначительным, до 0,8% алюминия и марганца. Данный сплав относится к псевдо- α -титановым сплавам и применяется в химическом машиностроении, в летательных аппаратах, в судостроении, приборостроении и пр. Механические свойства этих материалов зависят от степени загрязнения газами и скорости охлаждения сварных швов с образованием мелкоигольчатой мартенситной структуры. Были соблюдены требования к качеству кромок свариваемых половинок в двух случаях: механической обработке кромок и газолазерной резке кромок.

Проведена сравнительная оценка механических свойств сварных соединений, полученных автоматической аргодуговой (ААрДС), плазменно-дуговой (ПДС) и лазерной (ЛС) сварками по газолазерному резу. Первые 2 вида сварки проводились по штатной технологии [2]. Лазерная сварка (ЛС) и газолазерная резка (ГЛР) производились быстропроточным газоразрядным

CO₂ – лазером ЛСУ 5 с мощностью излучения 5 кВт с двухзеркальным внеосевым объективом Кассегрена с углом сходимости пучка излучения

6°. Сварка производилась в защитной газовой среде гелия [3]. Результаты испытаний приведены на рис. 1.

Механическая обработка кромок



Газолазерная резка кромок

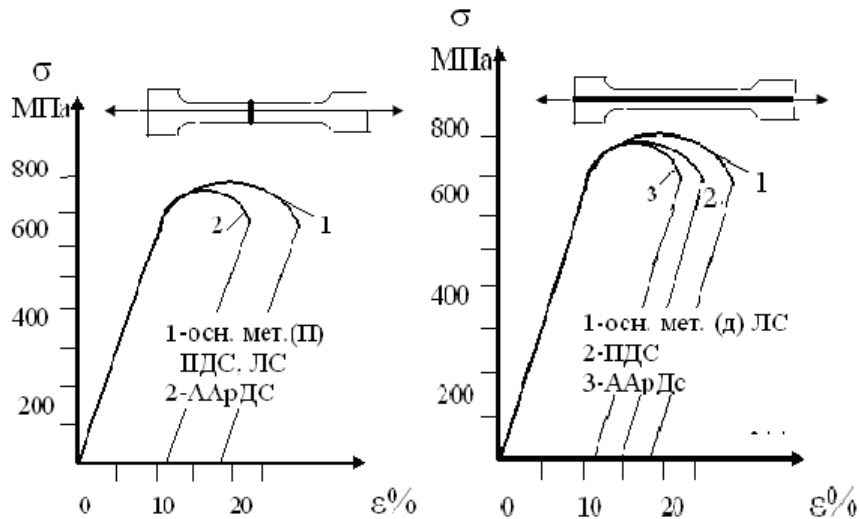


Рис. 1. Диаграммы растяжения образцов с поперечным и продольным швами.

Характер диаграмм растяжения показывает, что и материал, и сварные швы не имеют явно выраженной площадки текучести, и за начало пластических деформаций можно принять переходную точку прямолинейного участка диаграммы в криволинейную, а сам материал явно относится к упруго-пластическим. Диаграмма растяжения таких материалов аппроксимируется ломаной линией с двумя угловыми коэффициентами α и β в упругой и пластической стадии работы (рис. 2).

Точка перегиба a принимается за условный предел текучести. С позиций теории пластичности для конструкций из рассматриваемых материалов можно ставить и решать две задачи:

1. Изучение всего процесса деформирования.
2. Определение несущей способности.

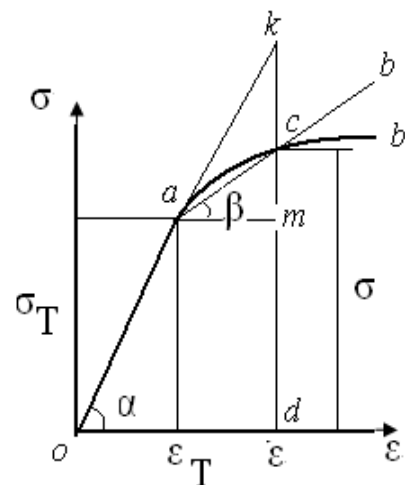


Рис. 2. Аппроксимация диаграммы упруго-пластического материала.

На участке диаграммы *oacb* ввиду роста напряжений деформации будут активными.

На экспериментальных диаграммах, представленных на рис. 1, активной деформации будут соответствовать восходящие участки диаграмм, и их описание будет соответствовать упруго-пластичному материалу. Нисходящие ветви будут соответствовать пассивной деформации в связи с уменьшением напряжений, и процесс будет плохо описуем, т. к. в конечном счете, это приводит к разрушению образца после неконтролируемого роста деформации. Описанное выше относится к качественной стороне проблемы. Количественная сторона приведена в работе [3] и дает возможность оценки прочности сварных швов в реальных конструкциях.

В качестве примера рассмотрим сварные швы тонкостенного сосуда, находящегося под внутренним давлением (рис. 3). Система напряжений в этих сосудах определяется безмоментной теорией оболочек, а сварные швы, соединяющие отдельные фрагменты оболочки соответствуют направлениям *m* и *t*. Они работают на растяжение, как образцы с поперечным и продольным швами и для их оценки можно применить результаты экспериментальных исследований, описанные выше.

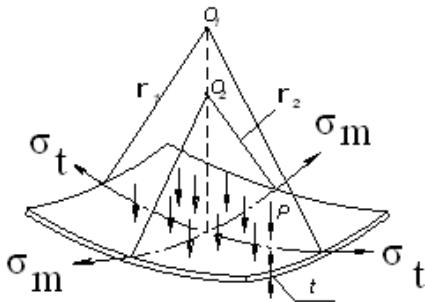


Рис. 3. Фрагмент безмоментной оболочки, находящейся под внутренним давлением *p*.

Поле напряжений в стенках тонкостенных сосудов обычно считается двухосным, с равномерным распределением по толщине.

Т. к. расчет ведется по безмоментной теории, и напряжения распределены по толщине равномерно, то, очевидно, что нормальные напряжения σ_t , σ_m и, будут главными напряжениями $\sigma_t = \sigma_1$, $\sigma_m = \sigma_2$, $\sigma_3 = p$, т. е. напряжение на внутренней поверхности будет равно внутреннему давлению *p*, а на наружной поверхности – будет равно нулю.

Согласно СНИП II-23-81 (Строительные нормы и правила) для тонкостенных сосудов величина внутреннего давления *p* на стенку сосуда не превышает 1–2% от величин σ_1 и σ_2 , поэтому σ_3 можно считать равным нулю, а материал оболочки считать находящимся в плоском напря-

женном состоянии. При расчете на прочность пользуются IV теорией прочности, согласно которой условие прочности будет иметь вид:

$$\sigma_{\text{эKB}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} - \sigma_1 \sigma_2 \leq R, \quad (1)$$

где *R* – расчетное сопротивление для материала сварного шва или материала сосуда.

Для цилиндрических сосудов радиус кривизны образующей цилиндра равен ∞ , а радиус кривизны обечайки *R*₁, толщина стенки сосуда *t*, *p* – внутреннее давление, и соответственно напряжения будут:

$$\sigma_1 = \frac{pR_1}{t}; \quad \sigma_2 = \frac{pR_1}{2t}, \quad (2)$$

т. е. окружное напряжение превышает осевое в 2 раза, иными словами поперечные сварные швы обечаек находятся в более напряженном состоянии, чем продольные швы.

Для сферического сосуда:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pR_1}{2t}, \quad (3)$$

где *p* – внутреннее давление в сосуде; *R*₁ – радиус сферы.

Подставляя (2) и (3) в условие прочности (1) получим:

- для цилиндрической оболочки:

$$\sigma_{\text{эKB}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{pR_1}{t} \leq R. \quad (4)$$

- для сферической оболочки:

$$\sigma_{\text{эKB}} = \sigma_1 = \frac{pR_1}{t} \leq R. \quad (5)$$

В [3] приводятся экспериментальные данные по механическим свойствам сварных соединений сплава OT 4, полученных различными видами сварки. Так для поперечного шва, полученного лазерной сваркой по фрезерованным кромкам, предел прочности составил $\sigma_b = 789 \pm 3$ МПа, при относительной остаточной деформации $19,2 \pm 0,7\%$, что не отличается от основного металла. Для продольного шва $\sigma_b = 796 \pm 7$ МПа, что даже больше, чем в основном металле.

С учетом результатов испытаний предел текучести будет на 19,2% меньше и составит $\sigma_T = 637,5$ МПа.

При проектировании резервуаров применяют метод расчета прочности по предельному состоянию, согласно которого расчетное сопротивление в сварном шве *R_y* определяют:

$$R_y = \sigma_T \frac{\gamma_c}{n}, \quad (6)$$

где $\gamma_c = 0,8$ – коэффициент условий работы;

n – коэффициент перегрузки, принимаемый:

- 1,1 – для гидростатического давления жидкости;
- 1,2 – при учете избыточного давления газов и вакуума;
- 1,4 – при учете снеговой нагрузки.

Предельная прочность предполагает идеальную форму сосуда в отличие от реальной, имеющей отклонения от идеала. Поэтому реальная прочность сосуда ниже предельной. В расчетах это отличие учитывают назначением (нормированием) величины расчетного сопротивления R или увеличением коэффициента запаса.

Пример расчета. Баллон из титанового сплава ОТ4 находится под внутренним давлением. Диаметр баллона $D = 30 \text{ см} = 0,3 \text{ м}$. Толщина стенки баллона $t = 2 \text{ мм} = 2 \times 10^{-3} \text{ м}$. Определить давление газа, которое можно хранить в баллоне.

Для сплава ОТ4: $\sigma_t = 637,5 \text{ МПа}$. Согласно правил Госгортехнадзора [2], параметры баллонов подлежат проверке с таким расчетом, чтобы при гидростатическом испытании напряжения в его стенках не превышали 85% предела текучести, т. е. 542 МПа.

При гидростатическом испытании давление в баллоне доводят до $2p$, тогда на основании формул (4) и (5), полагая $R_y = 542 \text{ МПа}$, получим:

- для цилиндрического сосуда:

$$2p \leq \frac{2t \times R_y}{R_1 \sqrt{3}} = \frac{2 \times 10^{-3} \times 542}{0,15 \times \sqrt{3}} = 8,4 \text{ МПа}; p = 4,2 \text{ МПа}.$$

- для сферического сосуда:

$$p \leq \frac{t \times R_y}{R_1} = \frac{2 \times 10^{-3} \times 543}{0,15} = 7,2 \text{ МПа}.$$

Таким образом, сферический сосуд позволяет хранить газ под давлением в $\frac{7,2}{4,2} = 1,7$ раза

большим, чем в цилиндрическом сосуде из сплава ОТ4.

Выводы. Предлагаемое исследование позволяет оценить прочность сварных швов в конструкциях из титанового сплава ОТ4, выполненных лазерной сваркой, обеспечивающей равнопрочность с основным металлом.

На примере расчета цилиндрического и сферического сосудов показана методика определения безопасного давления в них; установлено, что сварной сферический сосуд из титанового сплава ОТ4 позволяет хранить газ под давлением в 1,7 раз большим, чем в цилиндрическом сосуде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моисеев В. Н. Сварные соединения титановых сплавов / В. Н. Моисеев, Ф. Р. Куликов, Ю. Г. Кириллов. – М. : Металлургия, 1979. – 248 с.
2. Усеинов Б. К. Сварные конструкции. Расчет и проектирование / Б. К. Усеинов. – Симферополь : Вперед, 2007. – 206 с.
3. Гаврилюк В. С. Лазерная сварка титанового сплава ОТ4 по лазерному резу / В. С. Гаврилюк, Г. М. Измаилова // Технология металлов. – 2005. – № 1. – С. 23–26.