

КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ С МНОГОСЛОЙНОЙ СТЕНКОЙ. 2. ВЫБОР СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ И СОЗДАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ю. Н. ПОСЫПАЙКО

Проведен анализ наиболее перспективных способов контроля герметичности сварных соединений многослойных изделий, предложены критерии их оценки. Описаны лабораторные стенды и оборудование для исследования способов контроля.

Analysis of the most promising methods of monitoring the tightness of welded joints in multi-layer products has been performed, and criteria for their evaluation are proposed. Laboratory facilities and equipment for studying the monitoring methods are described.

Разработка, изготовление и эксплуатация изделий с многослойной стенкой — аппаратов химических производств, трубопроводов, резервуаров и т. п. — вызваны растущими требованиями к повышению производительности, мощности, надежности и безопасности оборудования высокого давления [1–3]. Особенность технологического контроля таких изделий заключается в том, что необходимо проводить испытания на герметичность внутренних сварных соединений [4]. Это обусловлено возможностью возникновения в процессе сварки сквозных дефектов во внутренних сварных швах, что может привести к проникновению рабочего, хранящегося или транспортируемого вещества из полости изделия в полость межслойных зазоров многослойной стенки. Его накопление может стать причиной нарушения нормальной работы изделия или его разрушения.

В статье [5] проанализированы наиболее характерные сквозные дефекты сварных соединений изделий с многослойной стенкой и факторы, определяющие параметры межслойных зазоров. Приведены также методы расчета сближения двух контактирующих поверхностей в межслойном зазоре; описаны результаты моделирования, расчета и исследования газопереноса по межслойным зазорам. В данной статье рассмотрены вопросы анализа и выбора способов контроля герметичности сварных соединений, описаны лабораторные стенды и оборудование для их исследования.

Выбор способов контроля герметичности. Процесс принятия решения о применении того или иного способа контроля герметичности конкретного изделия или сооружения, понимаемый как выбор одной из альтернатив, является наиболее важным в работе специалистов-разработчиков. Специалист, пользуясь своим опытом и интуицией, учитывая мировой опыт и полезные советы коллег, делает выбор на основе своей оценки ситуации под влиянием целого ряда факторов: новизны рассматриваемой проблемы; трудности получения полного списка альтернатив; многокритериального характера их оценок; трудности выявления всех критериев сравнения альтернатив; трудности сопоставления разнородных критериев; субъективного характера многих оценок альтернатив. Сложность

проблемы выбора нарастает с увеличением количества альтернатив и критериев их оценки.

Наиболее известный подход к решению таких сложных проблем получил название многокритериального анализа альтернатив [6–8]. Методы многокритериального анализа определяют четкую последовательность действий: анализ целей и средств; выделение и последовательное рассмотрение альтернативных вариантов решения проблемы; их сравнение по отдельным критериям; стремление к рациональному выбору альтернативы путем объединения оценок отдельных критериев в общую оценку ее полезности.

Таким образом, выбор способа контроля герметичности конкретного изделия или сооружения можно проводить не субъективно, а методом расчета. Для этого необходимо установить перечень альтернатив-способов, а также критериев их сравнения, определить оценки по отдельным критериям для каждой альтернативы и объединить эти оценки в общую оценку ее полезности. Если эти перечни разрабатывает один специалист, то он же и определяет, как оценить каждый критерий, т. е. строит шкалу оценки; если же несколько специалистов, то их оценки сводятся к единой, обычно средней. Переход к получению общей оценки альтернативы осуществляется, как правило, на основании формул, объединяющих оценки по отдельным критериям в общую оценку полезности альтернативы. Выбор той или иной формулы чаще всего определяет специалист. Расчет общих оценок альтернатив целесообразно выполнять на ЭВМ — исходными данными для него являются общий вид формулы и оценки альтернатив по критериям. Наиболее распространенные методы принятия решения при многих критериях, отличающиеся формулой перехода к единой оценке полезности альтернатив, проанализированы в [9, 10]. Нами выбраны два метода.

Метод взвешенной суммы предусматривает определение N критериев оценки альтернатив, назначение коэффициентов важности ω критериев и их нормирование:

$$\sum_{i=1}^N \omega_i = 1. \quad (1)$$



Полезность каждой из альтернатив определяется по формуле

$$U = \sum_{i=1}^N \omega_i x_i, \quad (2)$$

где x_i — оценка альтернативы по i -му критерию; ω_i — коэффициент важности (веса) i -го критерия.

Метод взвешенного произведения также предусматривает определение N критериев оценки альтернатив, назначение нормированных коэффициентов важности ω_i критериев, а полезность альтернативы определяется по формуле

$$U = \prod_{i=1}^N \beta_i^{\omega_i}, \quad (3)$$

где β_i — отношение фактической оценки i -го критерия x_i к наилучшему значению по i -му критерию y_i .

Таким образом, все учитываемые критерии, в том числе и экономические, выражают в относительных единицах:

$$\beta_i = x_i / y_i, \text{ если } x_i < y_i,$$

$$\beta_i = y_i / x_i, \text{ если } x_i > y_i.$$

Чем ближе оценка x_i к y_i , тем менее негативное влияние она оказывает на конечный результат.

Вне зависимости от достоинств и недостатков отдельных методов можно выделить некий общий положительный эффект, возникающий при применении многокритериального подхода к анализу альтернатив. Прежде всего несомненным достоинством является само разложение единого качества на совокупность его составляющих. Оценку по отдельным критериям определить гораздо легче. В случае, когда эти оценки вызывают сомнения, их легче проверить. Если несколько специалистов оценивают один критерий, то их мнения могут расходиться. Практика показывает, что при оценке альтернативы в целом расхождение будет значительнее. При оценке же по отдельным критериям совпадений точек зрения специалистов гораздо больше. Это естественно, поскольку оценка по отдельному критерию не столь сложна и имеет гораздо более четкое смысловое содержание.

В результате анализа нами отобраны десять наиболее перспективных способов-альтернатив для контроля герметичности сварных соединений многослойных конструкций (на основе масс-спектрометрического, пузырькового и химического методов контроля):

I — с помощью щупа масс-спектрометрического течеискателя;

II — вакуумирования с применением масс-спектрометрического течеискателя;

III — с помощью щупа галогенного, электронно-захватного, плазменного, катарометрического или оптико-абсорбционного течеискателя;

IV — вакуумно-пузырьковой камеры с нанесением на шов пенообразующего раствора;

V — вакуумно-пузырьковой камеры, заполняемой жидкостью;

VI — опрессовки межслойных зазоров воздухом;

VII — комбинированный способ опрессовки и вакуумно-пузырьковой камеры;

VIII — опрессовки межслойных зазоров химически активным газом;

IX — предварительного внесения химически активного пробного материала в межслойные зазоры;

X — опрессовки полости водным раствором химически активного пробного материала.

Определим их основные критерии оценки.

1. *Порог чувствительности.* Характеризуется наименьшим потоком, регистрируемым как сигнал о течи. Порог чувствительности x_1 каждого из рассматриваемого способов должен удовлетворять требованиям к контролю герметичности и обладать по отношению к ним определенным «запасом» — чем больше этот «запас», тем ближе оценка к единице.

2. *Производительность контроля.* Определяется протяженностью сварных соединений или количеством изделий, проконтролированных за определенное время. Оценка x_2 является результатом сравнения производительности различных способов.

3. *Надежность контроля.* Характеризуется его способностью выполнять заданные функции, сохраняя свои показатели в установленных пределах в течение требуемого промежутка времени. Оценка является также результатом сравнения различных способов с точки зрения их надежности в условиях трубоэлектросварочного цеха.

Оценка альтернативных способов контроля герметичности многослойных конструкций (на примере многослойных труб)

№ п/п	Критерий оценки	Весовой коэффициент ω	Оценка x_i способов-альтернатив									
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1	Порог чувствительности	0,20	0,9	1,0	0,8	0,9	0,9	0,7	0,9	0,8	0,8	0,7
2	Производительность	0,10	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8
3	Надежность	0,10	0,5	0,5	0,6	0,8	0,8	0,9	0,8	0,7	0,5	0,5
4	Вероятность	0,15	0,8	0,8	0,5	0,5	1,0	0,8	1,0	0,8	0,5	0,5
5	Экономичность	0,05	0,7	0,6	0,8	0,8	0,7	1,0	0,8	0,8	0,6	0,7
6	Трудоёмкость	0,10	1,0	0,8	0,9	0,8	0,8	1,0	0,8	0,9	0,7	0,8
7	Стоимость оборудования	0,05	0,5	0,5	0,7	0,8	0,7	1,0	0,7	0,8	0,5	0,5
8	Технологичность	0,10	0,9	0,5	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,6	0,8	0,8
9	Требования к персоналу	0,05	0,5	0,5	0,7	0,8	0,9	0,8	0,9	0,5	0,5	0,6
10	Механизация, автоматизация	0,10	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,8
			<i>Рассчитанные значения функции полезности:</i>									
по формуле (2)			0,81	0,76	0,76	0,78	0,85	0,82	0,83	0,73	0,64	0,68
по формуле (3)			0,78	0,73	0,75	0,76	0,84	0,81	0,82	0,71	0,62	0,66

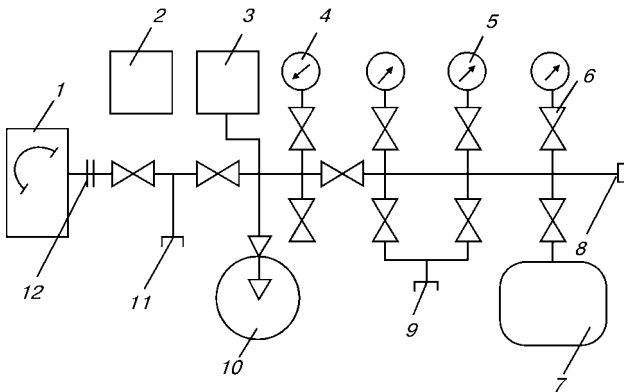


Рис. 1. Схема лабораторного стенда НК-129 для контроля герметичности: 1 – масс-спектрометрический течеискатель ПТИ-10; 2 – галогенный течеискатель ГТИ-6; 3 – вакуумметр электро-разрядный магнитный ВЭМБ-1П; 4 – вакуумметр образцовый ВО; 5 – манометр образцовый МО; 6 – газовый вентиль; 7 – ресивер; 8 – фланцевый вход для подвода пробных газов; 9 – штуцерный выход для заполнения пробными газами изделий; 10 – вакуумный насос 2НВР-5ДМ; 11, 12 – штуцерный вход соответственно для вакуумирования изделий (или вспомогательного оборудования) и подключения течеискателя

4. **Достоверность контроля.** Определяется вероятностью соответствия результатов контроля действительным значениям контролируемых признаков. Оценка x_4 основывается на физической сущности способа и техническом уровне оборудования, его реализующем.

5. **Экономичность контроля.** Характеризуется его свойством обеспечивать минимальные затраты на контроль при установлении достоверности и других технических требованиях к нему. Оценка x_5 определяется на основании сравнения затрат на контроль изделия.

6. **Трудоемкость контроля.** Определяется трудозатратами на проведение процесса контроля одного изделия. Оценка x_6 устанавливается на основании сравнения трудозатрат на контроль изделия.

7. **Стоимость оборудования и материалов для контроля** изделия различными способами определяет оценку x_7 .

8. **Технологичность контроля.** Характеризуется удобством выполнения операций контроля конкретного изделия тем или иным способом с по-

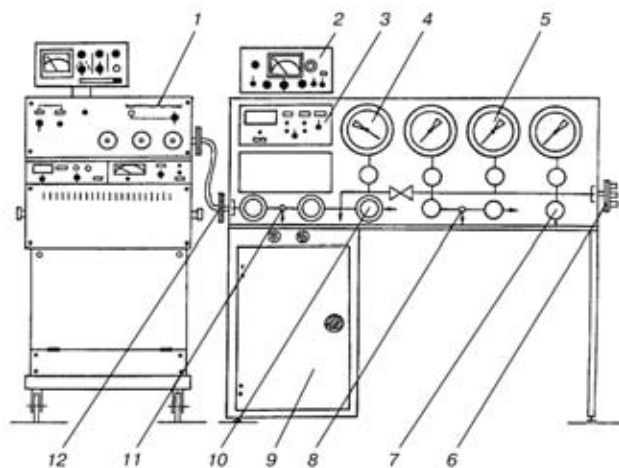


Рис. 2. Лабораторный стенд НК-129 для контроля герметичности (обозначения см. в тексте)

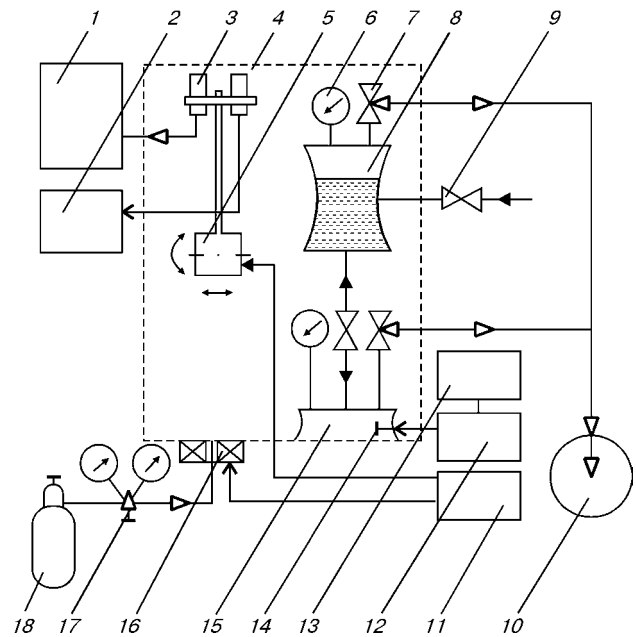


Рис. 3. Схема лабораторного стенда Об-2266: 1 – масс-спектрометрический течеискатель ПТИ-10; 2 – галогенный течеискатель ГТИ-6; 3 – датчики течеискателя; 4 – многослойная труба-образец; 5 – приспособление передвижения датчиков течеискателя вдоль швов; 6 – вакуумметр ОБВ1-100; 7 – трехходовой кран; 8 – бак для индикаторной жидкости; 9 – вентиль; 10 – вакуумный насос 2НВР-5Д; 11 – блок питания электромагнитного приспособления и управления передвижением датчиков течеискателя; 12 – блок ультразвуковой локации пузырьков; 13 – ультразвуковой дефектоскоп УД-11ПУ; 14 – ультразвуковой преобразователь; 15 – накладная вакуумная камера; 16 – электромагнитное приспособление заполнения межслойных зазоров трубы пробным газом; 17 – редуктор давления; 18 – газовый баллон

мощью оборудования, реализующего этот способ. Оценка x_8 определяется в результате сравнения технологичности контроля изделия тем или иным способом.

9. **Требования к персоналу, обслуживающему оборудование для контроля,** определяет оценку x_9 . Причем, чем эти требования выше, тем оценка ниже.

10. **Возможность механизации или автоматизации контрольных операций** определяет оценку x_{10} . Оценка будет выше, если способ контроля поддается механизации или автоматизации.

В основу анализа альтернативных способов контроля герметичности многослойных конструкций положены функции полезности, определяемые выражениями (2), (3). Исходные данные и результат расчета приведены в таблице, в которой номер способа-альтернативы (I-X) соответствует номеру приведенного ранее перечня. Для каждого критерия оценки способов контроля директивно установлены весовые коэффициенты ω_i . Они являются общими для всех десяти сопоставляемых способов контроля.

Как видно из таблицы, наибольшие значения функции полезности имеют способы V (вакуумной камеры, заполняемой жидкостью), VII (комбинированный способ опрессовки и вакуумно-пузырьковой камеры) и VI (способ опрессовки межслойных зазоров воздухом). Далее следует группа га-

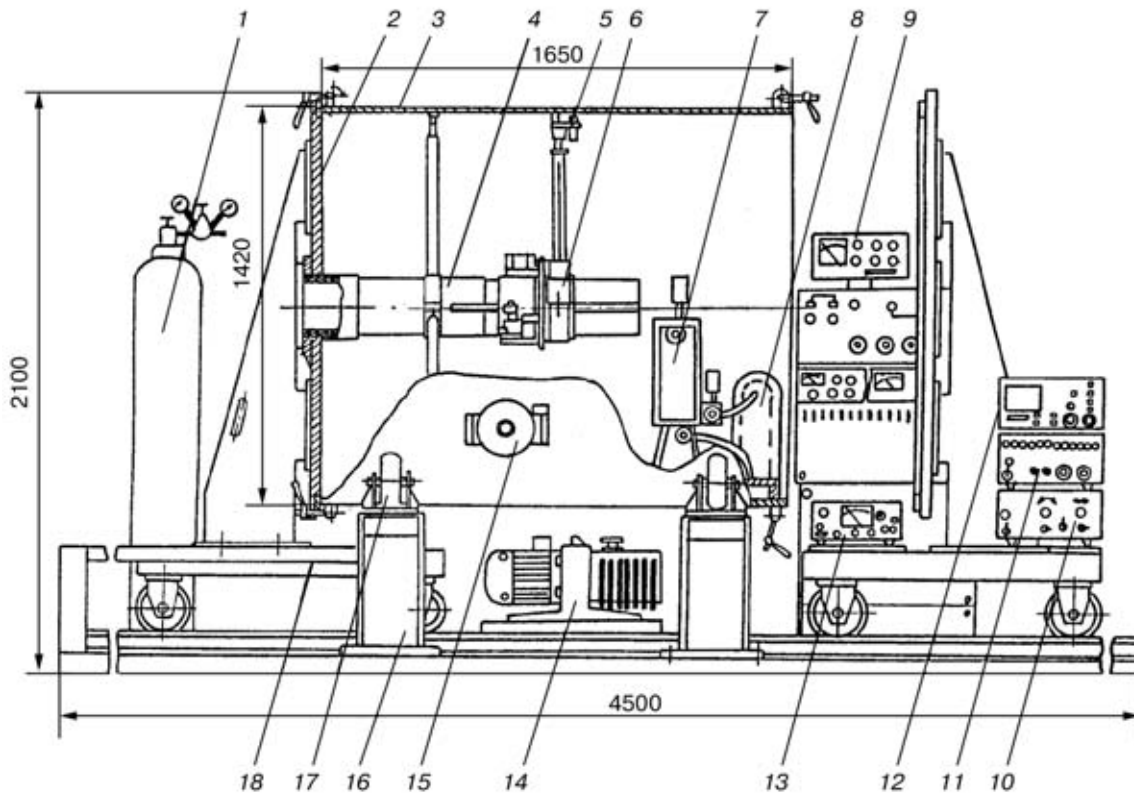


Рис. 4. Лабораторный стенд Об-2266 для испытания методов и средств контроля герметичности сварных соединений многослойных труб большого диаметра и других крупногабаритных изделий (обозначения см. в тексте)

зоаналитических способов. Ниже показатели у группы химических способов.

Создание лабораторных стендов для проведения исследований. Для проведения исследований различных методов и средств контроля герметичности многослойных изделий нами разработаны и изготовлены ряд лабораторных стендов и промышленное оборудование.

На рис. 1 показана схема стенда НК-129 для контроля герметичности изделий, который позволяет: заполнять изделия или их изолированные полости пробными газами давлением до 2,5 МПа; готовить смеси различных пробных газов в ресивере и заполнять ими изделия; создавать разрезание в изделиях или во вспомогательном оборудовании.

Конструктивно стенд НК-129 (рис. 2) представляет собой рабочий стол и панель управления с коммутирующими элементами, измерительными приборами, вакуумным насосом и ресивером. В состав стенда включены гелиевый течеискатель ПТИ-10 1 и галогенный ГТИ-6 2. На панели управления стенда расположены: вакуумметры электроразрядный магнитный ВЭМБ-1П 3 и образцовый ВО ВТ-3 4 для измерения разрежения в диапазоне 1...1000 Па; три манометра образцовых МО 5 для измерения давления пробных газов в диапазоне 0,1...2,5 МПа; фланцевый вход 6 для подвода пробных газов; газовые вентили 7 и штуцерный выход 8 для заполнения пробными газами изделий; вакуумные вентили 10 ВРП2-25 и штуцерный вход 11 для вакуумирования изделий или вспомогательного оборудования; фланцевый выход

12 для подключения к стенду гелиевого течеискателя ПТИ-10. В шкафу 9 размещены вакуумный насос 2 НВР-5Д и ресивер объемом 0,03 м³.

Стенд Об-2266 (рис. 3, 4) предназначен для исследований методов и средств контроля герметичности многослойных труб большого диаметра и других аналогичных крупногабаритных изделий. Совместно со стендом НК-129 он позволяет:

вакуумировать трубу или заполнять ее пробным газом до давления 0,5 МПа;

вакуумировать полость межслойных зазоров стенки трубы или заполнять ее пробным газом до давления 2,5 МПа;

перемещать преобразователи газоаналитических течеискателей вдоль кольцевых и продольных швов;

вакуумировать отдельные участки трубы с помощью накладных вакуумных камер и заполнять вакуумные камеры жидкостью;

выполнять ультразвуковую локацию пузырьков в жидкости.

Стенд Об-2266 (рис. 4) включает поворотный рольганг (16, 17) для размещения на нем многослойной трубы-образца 3 или другого аналогичного изделия и их вращения; люки-крышки 2 для уплотнения торцов трубы с целью создания в ней разрежения или повышенного давления, расположенные на подвижных тележках 18; узел 5 крепления преобразователей течеискателей и каретку 6 для их перемещения вдоль кольцевых и продольных швов, размещенные на несущей штанге 4; течеискатели — масс-спектрометрический ПТИ-10 9 и галогенный ГТИ-6 13; электромагнитное уст-



ройство 15 заполнения межслойных зазоров трубы пробным газом, соединенное напорным рукавом с редуктором газового баллона 1; блок питания 10 электромагнитного устройства 15; накладную вакуумную камеру 8 и устройство 7 заполнения камеры жидкостью и ее откачки, соединенные с вакуумным насосом 2НВР-5Д 14; аппаратуру 11, 12 ультразвуковой локализации пузырьков в жидкостной камере. Схема электрических, вакуумных, пневматических и гидравлических соединений стенда Об-2266 показана на рис. 3.

Оба стенда позволяют изучать и испытывать различные известные способы и средства контроля герметичности многослойных изделий и разрабатывать новые. Кроме стендов, для выполнения испытаний были изготовлены специальные сварные образцы с естественными и искусственными сквозными дефектами, в которых пробный газ можно подавать со стороны корня шва.

Использовались также стенды Об-981 и Об-1898 [11], разработанные и изготовленные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины ранее, и промышленные установки Об-2101 и Об-2102 [12, 13] для контроля герметичности многослойных труб большого диаметра на Выксунском металлургическом заводе.

ВЫВОДЫ

1. Выбор способа контроля герметичности конкретного изделия или сооружения можно свести к расчету на основе теории многокритериального анализа альтернатив. Для этого необходимо установить перечень альтернатив-способов и перечень критериев их сравнения, определить оценки по отдельным критериям для каждой альтернативы и объединить эти оценки в общую оценку полезности альтернативы.

2. В результате анализа нами отобраны десять наиболее перспективных способов-альтернатив контроля герметичности сварных соединений многослойных конструкций на основе масс-спектроскопического, пузырькового и химического методов контроля.

3. Каждый из этих способов-альтернатив оценивается по десяти основным критериям: порогу чувствительности, производительности, надежности, достоверности, экономичности, трудоемкости и технологичности контроля, стоимости оборудования и материалов для контроля, требованиям к персоналу, возможности механизации или автоматизации контрольных операций. Для каждого критерия директивно установлены весовые коэффици-

енты (общие для всех сопоставляемых способов контроля).

4. Наилучшие расчетные показатели имеют следующие способы: вакуумно-пузырьковой камеры, заполняемой жидкостью; комбинированный способ опрессовки и вакуумно-пузырьковой камеры; опрессовки межслойных зазоров воздухом. Далее следует группа газоаналитических способов. Ниже показатели у группы химических способов.

5. Для проведения исследований различных методов и средств контроля герметичности многослойных изделий в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработаны и изготовлены ряд лабораторных стендов и промышленное оборудование.

1. Новиков В. И. Многослойные сварные конструкции // Многослойные сварные конструкции и трубы. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 20–24.
2. Макаров В. М. Совершенствование рулонированных сосудов высокого давления // Там же. — С. 14–19.
3. Патон Б. Е., Билецкий С. М. Конструкция, технология и основные характеристики многослойных труб для магистральных газопроводов // Там же. — С. 5–14.
4. Трущенко А. А., Посытайко Ю. Н. Особенности контроля герметичности сварных соединений многослойных труб // Передовой опыт неразрушающего контроля качества сварных соединений. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 134–136.
5. Посытайко Ю. Н. Контроль герметичности сварных соединений изделий с многослойной стенкой. 1. Расчет и исследование газопереноса по межслойным зазорам // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 2. — С. 20–26.
6. Ларичев О. И. Наука и искусство принятия решения. — М.: Наука, 1979. — 200 с.
7. Ларичев О. И. Объективные модели и субъективные решения. — М.: Наука, 1987. — 144 с.
8. Кили Р. Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях предпочтения и замещения. — М.: Радио и связь, 1981.
9. Труцкий В. А. Количественная оценка уровня качества сварочных процессов и оборудования // Автомат. сварка. — 1983. — № 4. — С. 62–66.
10. Труцкий В. А., Посытайко Ю. Н. Выбор способов контроля герметичности на основе теории экспериментального многокритериального анализа // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1996. — № 2. — С. 22–26.
11. Трущенко А. А., Посытайко Ю. Н., Кавуценко П. М. Установки для контроля герметичности сварных соединений вакуумно-пузырьковым методом. — Киев, 1979. — 4 с. — (Информ. письмо № 3, ИЭС им. Е. О. Патона).
12. Посытайко Ю. Н., Трущенко А. А., Труцкий В. А. Установки для механизированного контроля герметичности многослойных труб. — Киев, 1983. — 4 с. — (Информ. письмо № 35, ИЭС им. Е. О. Патона).
13. Труцкий В. А., Посытайко Ю. Н., Нагайцев В. А. Механизированный контроль герметичности сварных соединений многослойных труб // Дефектоскопия. — 1988. — № 8. — С. 81–85.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев

Поступила в редакцию
05.03.2002