

## ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА ТОНКОСТЕННЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СТАЛИ 08X18H10T\*

В. Д. ШЕЛЯГИН, В. Ю. ХАСКИН, А. В. БЕРНАЦКИЙ, А. В. СИОРА

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Работа посвящена повышению надежности и долговечности эксплуатации аппаратов химического производства за счет замены процесса пайки сваркой при изготовлении фильтрующих элементов. Проведен сравнительный анализ трех способов сварки (аргонодуговой, электронно-лучевой и лазерной) в применении к соединению тонкостенных трубчатых конических заготовок для фильтрующих элементов из нержавеющей стали 08X18H10T. Изучены дефекты, характерные для указанных способов сварки, и предложены методики их устранения. Установлено, что наибольшую производительность, в совокупности с высокой стабильностью формирования швов, имеет лазерная сварка, что делает целесообразным ее использование в качестве промышленного технологического процесса при изготовлении тонкостенных конических фильтрующих элементов. Библиогр. 9, рис. 5.

*Ключевые слова:* нержавеющая сталь, тонкостенные изделия, лазерная сварка, производительность, кромки, технологическая оснастка, механические свойства, коррозионная стойкость

В химической, атомной и других отраслях промышленности для получения ответственных соединений при изготовлении коррозионностойких металлоконструкций часто применяют способ пайки для соединения тонкостенных заготовок, что требует использования дорогостоящих припоев [1]. Замена способа пайки сваркой позволяет как снизить стоимость изготовления таких соединений, так и повысить их механические характеристики.

Одной из особенностей сварки трубной арматуры и фильтрующих элементов из тонкостенных аустенитных нержавеющих сталей является необходимость получения качественных бездефектных соединений, не требующих в дальнейшем финишной обработки. В том числе желательно исключить потребность в рихтовке сваренного изделия. Получаемые сварные соединения должны быть максимально близки по механическим свойствам и коррозионной стойкости к основному металлу [2]. Еще одной особенностью сварки фильтрующих элементов может быть необходимость учета неплотности прилегания стыкуемых кромок, вызванной наличием на них отверстий для фильтрации конечных продуктов. Все это требует тщательного выбора способа и технологического режима сварки. Как правило, для указанных задач выбирают аргонодуговую сварку, реже — лазерную или электронно-лучевую сварку [3].

Целью данной работы является повышение надежности и долговечности фильтрующих элементов из аустенитной нержавеющей стали

08X18H10T путем замены при их изготовлении процесса пайки сваркой. Для этого и проводился сравнительный анализ трех способов сварки (аргонодуговой, электронно-лучевой и лазерной) в применении к соединению тонкостенных трубчатых конических заготовок для фильтрующих элементов; выбор способа, обеспечивающего высокое качество швов и наибольшую производительность; разработка соответствующей сварочной технологии; комплекс испытаний сваренных деталей для подтверждения пригодности разработанной технологии для дальнейшего промышленного внедрения.

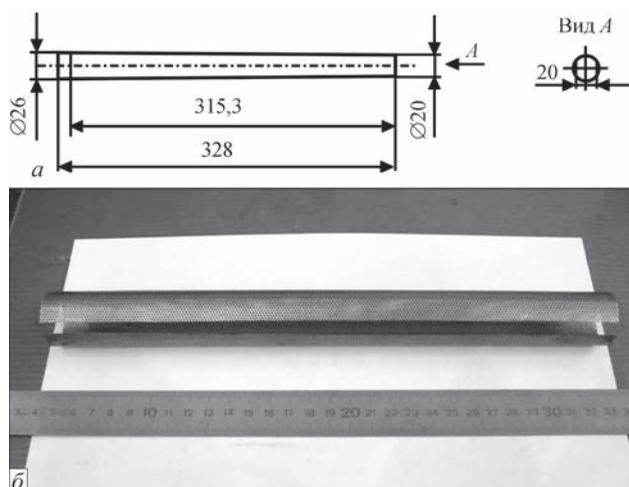


Рис. 1. Эскиз трубчатого конического фильтрующего элемента из стали 08X18H10T ( $\delta = 0,5$  и  $0,6$  мм) (а) и внешний вид (б) заготовки, свариваемой для его получения

\*Работа выполнена в рамках программы НАН Украины «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» в 2013–2015 гг.

При проведении экспериментов по аргонодуговой, электронно-лучевой и лазерной сварке в качестве свариваемых образцов использовали конические трубчатые заготовки фильтрующих элементов из стали 08X18H10T [4] толщиной  $\delta = 0,5$  и  $0,6$  мм (рис. 1). Режимы и оборудование выбирали с учетом рекомендаций работ [5–7].

**Аргонодуговая сварка.** Для получения качественных швов с учетом наличия зазоров между свариваемыми кромками подавали присадочную проволоку Св-08X18H10T (диаметр 1,0 мм). Сварку осуществляли на оборудовании фирмы «Kemppi» (Финляндия): источник питания «MasterTig MLS 3000» (сварочный ток 5...300 А), горелка «TTC-250WS» (рассчитана на ток до 250 А), также использовали автоматическое устройство подачи присадочной проволоки. Горелку перемещали относительно детали с помощью однокоординатного манипулятора.

В результате проведения исследований установили, что для аргонодуговой сварки кромок сетчатых фильтрующих элементов необходимо использовать медную подложку с формообразующей канавкой для формирования нижнего валика усиления и устранения поднятия сваренных кромок. Кроме того, необходимо повысить отвод тепла путем применения медных прижимных планок, которыми следует прижимать свариваемые кромки по всей длине на расстоянии не более 3 мм в обе стороны от стыка. Характерными дефектами аргонодуговой сварки сетчатых фильтрующих элементов являются непровары и прожоги. Для их устранения необходимо вести сварку на следующем режиме: сварочный ток  $I = 15$  А, напряжение на дуге  $U = 20$  В, скорость сварки  $v_{св} = 15$  м/ч, скорость подачи проволоки  $v_{пр} = 35$  м/ч, расход защитного газа (аргона) 10...15 л/ч. В результате было получено качественное формирование швов. Зона стабильности режима качественной аргонодуговой сварки достаточно узкая, т. е. поддерживать указанные параметры режима необходимо с высокой стабильностью и точностью.

**Электронно-лучевая сварка.** Для выполнения экспериментов применяли следующее оборудо-

дование: вакуумная камера с однокоординатным манипулятором для перемещения электронно-лучевой пушки, вакуумный агрегат для откачки камеры до  $133,3 \cdot 10^{-5}$  Па, источник питания В-250А, электронно-лучевая пушка УЛ-119. Качественные швы удалось получить только при условии наличия сплошных плотно прижатых кромок. С этой целью заготовки сетчатых фильтрующих элементов делали с заранее выполненными сплошными кромками, имеющими расстояние не менее 1 мм до фильтрующих отверстий. В ходе исследований установлено, что наилучшее формирование швов наблюдается при сварке на следующем режиме: ток пучка  $I = 10$  мА, напряжение  $U = 21$  кВ, скорость сварки  $v_{св} = 10...12$  м/ч, расфокусировка пучка в пятно диаметром порядка 1,5 мм.

**Лазерная сварка.** Данный процесс допускает зазоры между свариваемыми кромками в случае ее проведения с подачей присадочного порошкового материала [8]. В качестве такового использовали гранулированные порошки стали 08X18H10T или самофлюсующихся никелевых сплавов ПГ-10Н-04 и ПГ-НЧЗ [8] с диаметром гранул до 150 мкм [9]. Сварку проводили на медной подложке без формообразующих канавок. В экспериментах использовали Nd:YAG-лазер модели «DY044» с мощностью излучения до 4,4 кВт производства фирмы «Rofin-Sinar» (Германия), однокоординатный манипулятор, сварочную головку и дозатор присадочного порошка.

В ходе выполнения экспериментов установили, что при лазерной сварке также могут возникать непровары и прожоги. Подбор режимов подачи присадочного порошка в совокупности с определенными величинами мощности и скорости позволил получить бездефектные сварные соединения (рис. 2). При этом была определена следующая область стабильности технологических режимов: мощность излучения  $P = 0,5...0,6$  кВт; скорость сварки  $v_{св} = 140...160$  м/ч.; величина расфокусировки  $\Delta F = -15...-20$  мм; расход присадочного порошка  $G_{п} = 0,2...0,3$  г/с. Такой, достаточно широкий, разброс параметров режима свидетельствует о значительной стабильности лазерной сварки и позволя-

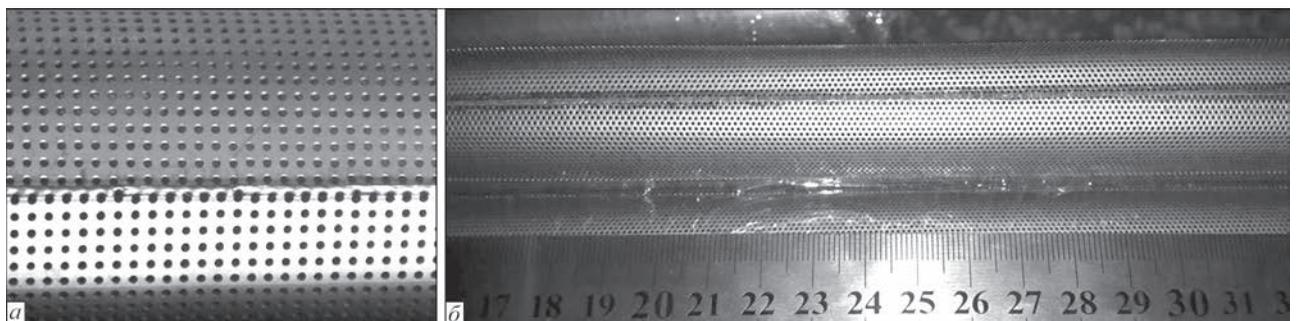


Рис. 2. Внешний вид сварного соединения (а) и образца (б) фильтрующего элемента из нержавеющей стали 08X18H10T ( $\delta = 0,5$  мм), полученного лазерной сваркой с порошковой присадкой ПГ-10Н-04

ет прогнозировать незначительный процент брака при промышленном применении процесса.

Установлено, что производительность аргодуговой сварки конических образцов фильтрующих элементов из стали 08X18H10T составляет до 20 фильтрующих элементов за рабочую смену (8 ч), в то время, как производительность лазерной сварки составляет до 40 фильтрующих элементов за рабочую смену. При этом в первом случае процент брака может составлять до 20 %, а во втором — более 2,5 %.

Сравнение рассмотренных трех вариантов сварки конических образцов фильтрующих элементов из стали 08X18H10T ( $\delta = 0,5$  и  $0,6$  мм) показывает, что наибольшей производительностью (больше в 10...15 раз скоростью сварки, по сравнению с конкурирующими способами) в совокупности с высокой стабильностью формирования швов отличается лазерная сварка. Именно ее целесообразно выбрать в качестве процесса для дальнейшей разработки промышленной технологии с последующим внедрением.

Дальнейшая разработка промышленной технологии лазерной сварки конических фильтрующих элементов для химической промышленности проводилась на опытных образцах, изготовление которых выполнялось в четыре этапа:

- изготовление перфорированного листа из нержавеющей стали 08X18H10T  $2000 \times 1000 \times \delta$  мм ( $\delta = 0,5...0,6$  мм) с фильтрующими отверстиями диаметром  $0,8...1,0$  мм с шагом, близким к их диаметру, методом механической просечки или электроискровой эрозии;

- гильотинная вырубка плоских заготовок фильтрующих элементов из перфорированных листов  $2000 \times 1000 \times \delta$  мм;

- вальцовка плоских заготовок фильтрующих элементов для получения конических трубок размером  $\text{Ø}26 \times \text{Ø}20 \times 328$  мм;

- лазерная сварка кромок свальцованных заготовок для получения прямошовных конических трубок с фильтрующими отверстиями.

При вырубке плоских заготовок фильтрующих элементов из перфорированного листа рассекаются фильтрующие отверстия. При стыковке таких кромок возникает проблема в их плотной, без зазора, стыковке для дальнейшей сварки. Из литературы [6] известно, что при лазерной сварке зазор между кромками не должен превышать 10 % их толщины. Для решения этой проблемы, согласно рекомендациям работы [7], использовали технологическую схему, показанную на рис. 3. Согласно этой схеме свариваемые кромки 1 сводятся с зазором, близким по размеру к их толщине, и плотно прижимаются к медной технологической подкладке 6. В процессе сварки зазор заполняется приса-

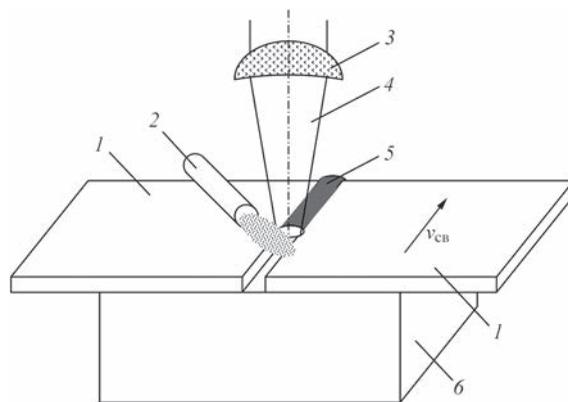


Рис. 3. Технологическая схема процесса лазерной сварки кромок опытных образцов конических фильтрующих элементов с неплотно прилегающими кромками: 1 — свариваемые кромки; 2 — подача присадочного порошка; 3 — фокусирующая линза; 4 — лазерное излучение; 5 — сварной шов; 6 — подложка (стрелкой указано направление движения свариваемого образца)

дочным порошковым материалом 2 и расплавляется расфокусированным лазерным излучением 4. Для реализации предложенной схемы разработали и изготовили следующую технологическую оснастку: струбину для зажима конических трубчатых образцов; медную подложку, вставляемую в образец; сварочную головку с фокусирующей системой и дозатором для подачи присадочных материалов в виде порошка с фракцией 20...150 мкм. При помощи созданного в ИЭС макета сварочного стенда были сварены как отдельные образцы для проведения механических и коррозионных испытаний, так и опытно-промышленная партия фильтрующих элементов для проведения эксплуатационных испытаний.

Для определения механических свойств полученных соединений был сварен ряд образцов на выбранных технологических режимах как с использованием непрерывного, так и импульсного лазерного излучения. Из полученных образцов были вырезаны образцы по ГОСТ 6996–66 тип XXIV для испытаний на статическое растяжение (на каждое значение — по три образца). Испытания проводили с помощью разрывной машины MTS 318.25 при температуре  $20...25$  °C со скоростью нагружения 4 мм/мин. По полученным результатам были установлены средние значения предела прочности  $\sigma_b$  [МПа] для использования непрерывного лазерного излучения, а также импульсного излучения низкой (12 Гц) и сравнительно высокой (200 Гц) частоты. Погонные энергии сварки во всех случаях были одинаковы. Результаты испытаний показаны на диаграмме рис. 4. Как видно из рисунка, лазерная сварка неплотно прилегающих кромок с порошковым присадочным материалом в случае использования как непрерывного, так и импульсного с низкой частотой излучения обеспечивает прочность на уровне 90 %

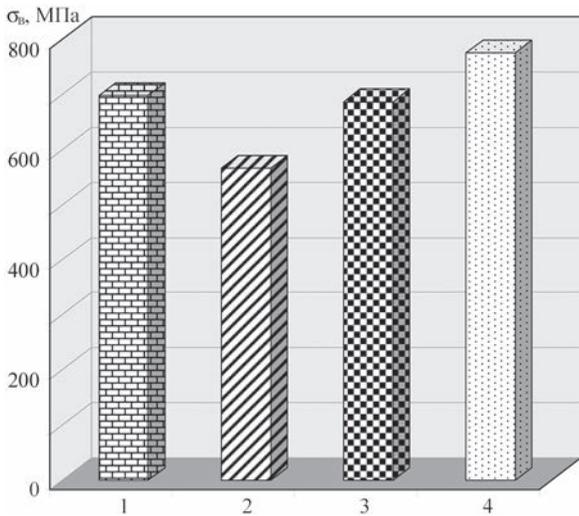


Рис. 4. Сравнение прочности соединений стали 08X18H10T ( $\delta = 0,5$  мм), полученных лазерной сваркой с присадочным порошком того же материала, с прочностью основного металла: 1 — непрерывное излучение; 2 — импульсное излучение  $f = 200$  Гц; 3 — импульсное излучение  $f = 12$  Гц; 4 — основной металл

прочности основного металла. Это можно объяснить использованием расфокусированного излучения, влияние которого на измельчение зерен шва, а, следовательно, и на повышение прочности соединений, не столь четко выражено, как влияние сфокусированного. Тем не менее, полученный показатель является приемлемым для решаемой задачи.

Определение коррозионной стойкости стыковых соединений стали 08X18H10T ( $\delta = 0,5$  и  $0,6$  мм) выполняли по весовой методике. Согласно этой методике из сваренных образцов вырезали темплеты, близкие по ширине к ширине швов с ЗТВ. Длина темплетов составляла 5...10 мм. Также вырезали темплеты близких размеров из основного металла (так называемые контрольные образцы). Готовые темплеты взвешивали на ана-

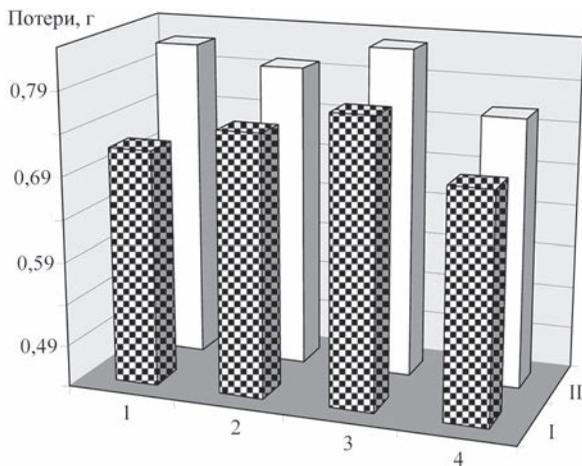


Рис. 5. Величины потерь массы образцов сварных соединений стали 08X18H10T при их травлении в смеси кислот  $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$  (описание 1-4 те же, что и на рис. 4); I —  $\delta = 0,6$  мм; II —  $0,5$

литических весах с точностью до 0,001 г, после чего погружали в смесь кислот  $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$  в соотношении 1:2. Через определенное время (как правило, 1...2 ч) образцы доставали, тщательно промывали, высушивали и взвешивали еще раз. По разнице между потерей веса контрольным образцом из основного металла и потерей веса сваренным образцом определяли коррозионную стойкость последнего.

В каждом случае выполняли по три образца, а полученные данные усредняли. Сварку проводили как непрерывным, так и импульсным (с частотой 12 и 200 Гц) излучением с присадочным порошком из стали 08X18H10T грануляцией 20...150 мкм. По результатам построены диаграммы, показанные на рис. 5. Как видно из этих диаграмм, во всех случаях коррозионная стойкость сварных соединений является удовлетворительной и составляет от 90 до 98 % относительно стойкости основного металла. Наличие или отсутствие импульсной модуляции излучения на изменение коррозионной стойкости сказывается слабо.

С использованием разработанной промышленной технологии лазерной сварки тонкостенных изделий с неплотно прилегающими кромками сварили опытно-промышленную партию конических фильтрующих элементов в количестве 250 шт. Партия была передана на профильное предприятие (ОДО «Черновицкий химзавод», г. Черновцы) с целью проведения эксплуатационных испытаний. По результатам данных испытаний установлено следующее: бракованные изделия в партии отсутствовали; все изделия соответствовали конструктивным размерам и техническим требованиям; все изделия выдержали эксплуатационные нагрузки; по прогнозным данным долговечность исследуемой партии изделий является нормативной.

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы:

разработана промышленная технология лазерной сварки стыковых соединений перфорированных кромок трубчатых конических фильтрующих элементов для химической промышленности, которая повышает надежность конструкции (по сравнению с пайкой), устраняет опасность образования охрупчивающих структур в швах и ЗТВ, позволяет избежать использования дорогостоящих припоев, минимизирует геометрические размеры сварных соединений, а также приближает антикоррозионные и механические характеристики получаемых соединений к уровню основного металла;

проведено сравнение аргонодуговой, электронно-лучевой и лазерной сварки заготовок фильтрующих элементов из аустенитной нержавеющей

стали 08X18N10T. Установлены характерные дефекты для всех рассмотренных способов сварки (прожоги и непровары) и способы их устранения. Наибольшей производительностью (больше в 10...15 раз скоростью сварки) в совокупности с высокой стабильностью формирования швов отличается лазерная сварка, что делает целесообразным ее использование в качестве промышленного технологического процесса;

при помощи разработанной технологической оснастки проведены эксперименты по лазерной сварке с порошковыми присадочными материалами, в ходе которых определен диапазон оптимальных, с позиций формообразования шва, технологических режимов: мощность излучения Nd:YAG-лазера 0,5...0,6 кВт; скорость сварки 140...160 м/ч.; заглубление фокуса 15...20 мм; расход присадочного порошка 0,2...0,3 г/с. В данном диапазоне режимов формирование бездефектных швов является стабильным, что обеспечивает незначительный процент брака при промышленном применении процесса;

лазерная сварка неплотно прилегающих кромок с использованием порошкового присадочного материала как в случае использования непрерывного, так и импульсного излучения обеспечивает прочность на уровне 90 % прочности основного металла и коррозионную стойкость сварных соединений от 90 до 98 % относительно стойкости основного металла. Такие показатели являются приемлемыми для решаемой задачи.

1. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.
2. MIG brazing of galvanized thin sheet joints for automotive industry / L. Quintino et al. // Materials and Manufacturing Processes. – 2006. – Vol. 21. – P. 63–73.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением; под ред. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.

4. Марочник сталей и сплавов; под общ. ред. А. С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
5. Корчагин П. В. Аргонодуговая сварка деталей с большой разницей толщин из стали типа 18-8: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06. – Тольятти, 2006. – 147 с.
6. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко и др.; под ред. Б. Е. Патона. – Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с.
7. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. – М: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 664 с.
8. Хаскин В. Ю., Бернацкий А. В. Сварка тонкостенных стальных изделий с неплотно прилегающими кромками, выполняемая методом лазерной наплавки // Сварщик. – 2008. – № 4 (62). – С. 14–15.
9. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник / Ю. С. Борисов и др. – Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.

В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, А. В. Бернацкий, О. В. Сиора

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

#### ЛАЗЕРНЕ ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ФІЛЬТРУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗІ СТАЛІ 08X18N10T

Робота присвячена підвищенню надійності і довговічності експлуатації апаратів хімічного виробництва за рахунок заміни процесу паяння зварюванням при виготовленні фільтруючих елементів. Проведено порівняльний аналіз трьох способів зварювання (аргонодугового, електронно-променевого та лазерного) в застосуванні до з'єднання тонкостінних трубчастих конічних заготовок для фільтруючих елементів з нержавіючої сталі 08X18N10T. Вивчено дефекти, характерні для зазначених способів зварювання та запропоновано методики їх усунення. Встановлено, що найбільшою продуктивністю, в сукупності з високою стабільністю формування швів, володіє лазерне зварювання, що робить доцільним його використання в якості промислового технологічного процесу при виготовленні тонкостінних конічних фільтруючих елементів. Бібліогр. 9, рис. 5.

*Ключові слова:* нержавіюча сталь, тонкостінні вироби, лазерне зварювання, продуктивність, кромки, технологічне оснащення, механічні властивості, корозійна стійкість

Поступила в редакцію 27.03.2017



## Восьмая международная конференция ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

11 – 15 сентября 2017 г.  
Украина, Одесса, отель «Курортный»

### Тематика конференции

- Лазерная и электронно-лучевая сварка, резка, наплавка, термообработка, нанесение покрытий
- Электронно-лучевая плавка и рафинирование
- Гибридные процессы
- 3D-технологии
- Моделирование лучевых технологий
- Материаловедческие проблемы лазерных и электронно-лучевых технологий

E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2017