



УДК 621.791.72

СВАРКА АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ СВАРОЧНОЙ ВАННОЙ*

М. БАХМАНН, В. АВИЛОВ, А. ГУМЕНЮК, М. РЕТМАЙЕР

Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung. Unter den Eichen 87, Haus 60, Raum 306, D-12205 Berlin.
E-mail: marcel.bachmann@bam.de

Благодаря наличию лазеров мощностью 20 кВт и более, лазерная сварка с глубоким проплавлением широко применяется в промышленности при соединении листовой стали толщиной до 20 мм за один проход. При превышении критического уровня жидкий металл формируемого валика провисает под воздействием гидростатического давления. В отличие от электронно-лучевой, лазерная сварка позволяет управлять жидким потоком в сварочной ванне при помощи электромагнитных полей. Проведены экспериментальные и численные исследования электромагнитной системы переменного тока для компенсации гидростатического давления, обусловленного силами Лоренца в расплаве, при односторонней сварке с полным проплавлением пластин из аустенитной нержавеющей стали типа AISI 304 толщиной до 20 мм. Показано, что применение магнитных полей с индукцией от 200 до 234 мТл (частота колебаний приблизительно 2,6 кГц) приводит к полной компенсации гидростатических сил в расплаве при сварке пластин толщиной от 10 до 20 мм, соответственно. Проведено комплексное моделирование жидкого потока, тепловых и электромагнитных условий методом конечных элементов при различных плотностях магнитного потока и различных частотах колебаний для расчета оптимальной силы электромагнитного поля, предупреждающей провисание расплава. Результаты моделирования показывают, что для этого может использоваться магнитное поле более низкой плотности. Библиогр. 17, рис. 5.

Ключевые слова: лазерная сварка, высокие мощности, аустенитные нержавеющие стали, провисание валика, управляющее электромагнитное поле, компенсация гидростатических сил, моделирование жидкого потока, расчеты

Появление в последние десять лет лазерных источников излучения мощностью выше 10 кВт позволило сваривать стальные пластины толщиной до 30 мм и алюминиевые большей толщины, используя процесс полного проплавления [1, 2], отличающийся высокой эффективностью. К этому следует добавить ключевые преимущества процесса лазерной сварки, по сравнению с многопроходной дуговой, такие как низкая погонная энергия, высокая скорость и низкая деформация [3].

В данной работе исследуется процесс односторонней лазерной сварки пластин аустенитной нержавеющей стали AISI 304. Традиционно детали большой толщины сваривают электронно-лучевым способом [4, 5]. При этом возникают проблемы, связанные с необходимостью использования больших модулей для создания технического вакуума. Современные источники лазерного излучения позволяют сваривать стали стабильным односторонним процессом с проплавлением до 16 мм [6, 7].

Одна из проблем рассматриваемого процесса заключается в том, что при превышении критиче-

ского уровня поверхностное натяжение жидкого материала не может нейтрализовать гидростатическое давление расплава, поэтому он стекает в процессе сварки перед затвердеванием.

Еще одна проблема: в зоне сварки происходят чрезвычайно динамичные процессы, обусловленные, например, течением Марангони и естественной конвекцией.

В отличие от электронно-лучевой, лазерная сварка позволяет использовать электромагнитную обработку расплава. Технологии электромагнитной обработки металлов широко применяются при сварке. Они включают различные процессы: от выращивания кристаллов и плавки с промежуточной емкостью до предотвращения пористости и поверхностной обработки [8], а также перемешивания [9].

Подход, используемый в данном исследовании, состоит в бесконтактном наведении вихревых токов под зоной обработки при помощи переменного магнитного поля в направлении, перпендикулярном направлению сварки. Получаемые в результате этого объемные силы Лоренца в расплаве нейтрализуют действие гравитационных сил и компенсируют гидростатическое давление. Систему электромагнитного управления сварочной ванной ранее исследовали на сталях толщи-

* По материалам доклада, представленного на международной конференции «Laser technologies in welding and materials processing», 27–31 мая 2013 г., пос. Кацивели, Крым, Украина.



ной до 18 мм и алюминиевых сплавах толщиной 30 мм [10, 11]. В работе [12] приведены расчеты по обоснованию использования этой системы при сварке алюминиевых сплавов толщиной 20 мм.

В настоящем исследовании приведены расчеты и описана экспериментальная проверка системы электромагнитного управления сварочной ванной при сварке пластин из нержавеющей стали AISI 304 толщиной 20 мм. Такого типа исследования, основанные на моделировании течения жидкости при электромагнитной обработке, описаны в работах [12–14].

Экспериментальная установка. Принцип воздействия внешнего или приложенного электромагнитного поля на сварочную ванну схематически показан на рис. 1, а. Колеблущееся магнитное поле B расположено в центре под сварочной ванной и вызывает вихревые токи j на глубине $\delta = (\pi f \mu \sigma)^{-1/2}$ в наружном слое материала, где f — частота колебаний, μ — магнитная проницаемость, и σ — электропроводность. Взаимодействие наведенных токов с приложенным магнитным полем приводит к возникновению в расплаве силы Лоренца $F_L = j \times B$, которая нейтрализует гидростатическое давление и при оптимальном управлении уравновешивает давление на верхней и нижней поверхностях шва, предупреждая, таким образом, стекание расплава.

Магнит располагают под обрабатываемым изделием на расстоянии 2 мм. Полюса магнитов размещены на 25 мм, поперечное сечение составляет 25×25 мм. Экспериментальная установка показана на рис. 1, б.

Швы типа валиковой пробы выполняли волоконным лазером мощностью 18 кВт. Сварка стали AISI 304 толщиной 20 мм не дала хороших результатов, так как жидкий материал выдувался из шва. Таким образом, сварные соединения толщиной 20 мм получали с использованием аустенитной стали AISI 304 толщиной 10 мм в корневой части и ферритной стали S235 в верхней части, так как более высокое поверхностное натяжение стали S235 стабилизирует поверхность валика сварного шва. Глубину проник-

новения магнитного поля регулировали в пределах 10 мм таким образом, чтобы магнитные свойства ферритной стали S235 не оказывали существенного влияния на приложенное магнитное поле. Предполагалось, что данный пример с толщиной сварного соединения 20 мм покажет принципиальную возможность применения магнитного воздействия на сварочную ванну при сварке листовых материалов большей толщины.

Технические характеристики лазера

Тип лазера, Yb	волоконный
Диаметр волокна, мкм	200
Фокусное расстояние, мм	350
Максимальная мощность лазера P_L , кВт	20
Диаметр фокального пятна, мкм	600
Расход защитного газа Ar, л/мин	30

Математическое моделирование. С помощью математической модели рассчитывали уравнения турбулентного потока жидкости, т. е. закон сохранения массы при массовой плотности ρ и скорости течения u , а также уравнения Навье—Стокса, где η — динамическая вязкость; p — давление; F — внешняя сила:

$$\nabla(\rho u) = 0, \tag{1}$$

$$\rho(u \nabla)u = -\nabla p + \nabla \left[\eta(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \eta(\nabla u)I \right] + F, \tag{2}$$

$$F = -\rho g - c_1 \frac{(1 - f_L)^2}{f_L^3 + \varepsilon} (u - u_{cb}) + \langle j \times B \rangle. \tag{3}$$

В уравнении (3) первый член описывает гравитационный эффект, второй член относится к торможению затвердевшего материала до скорости обработки, последний член обозначает приложенную среднюю по времени силу Лоренца; f_L — жидкая фракция; c_1 и ε — постоянные.

Кроме того, рассчитывалось уравнение сохранения энергии при эффективной теплоемкости $c_p^{эфф}$, учитывающей также скрытую теплоту плавления, температуру T и теплопроводности λ :

$$\rho c_p^{эфф} u \nabla T = \nabla(\lambda \nabla T). \tag{4}$$

Влияние внешнего электромагнитного поля ис-

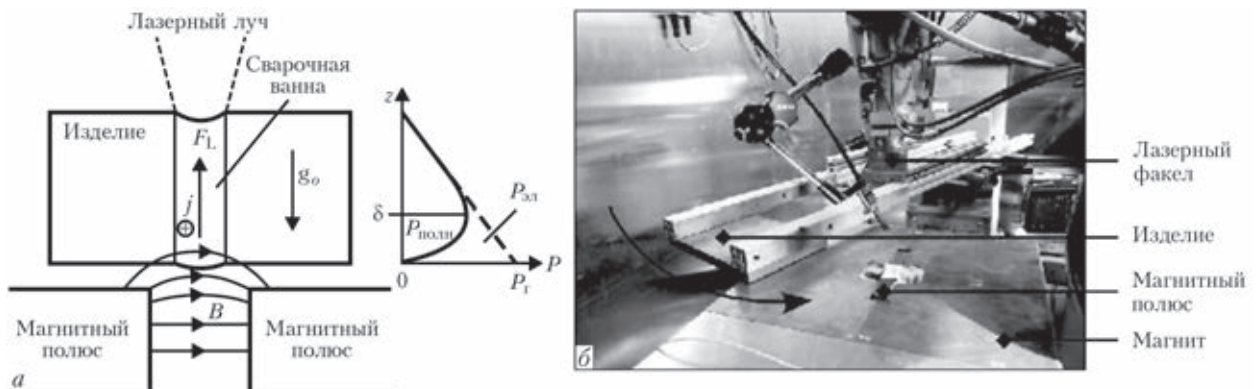


Рис. 1. Схема системы электромагнитного управления сварочной ванной (а) и внешний вид экспериментальной установки (б)

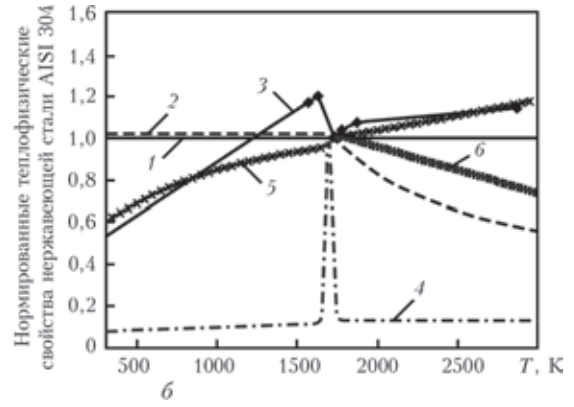
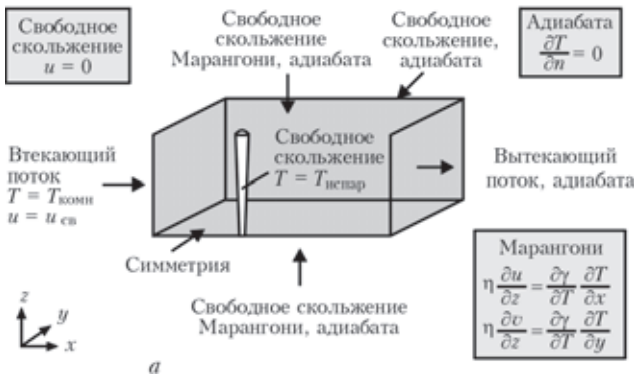


Рис. 2. Граничные условия (а) и теплофизические свойства нержавеющей стали AISI 304 (б): 1 — плотность $\rho/\rho(T_{пл})$; 2 — динамическая вязкость $\eta/\eta(T_{пл})$; 3 — теплопроводность $\lambda/\lambda(T_{пл})$; 4 — теплоемкость $c_p^{эфф}/c_p^{эфф}(T_{пл})$; 5 — удельное электрическое сопротивление $\rho_{эл}/\rho_{эл}(T_{пл})$; 6 — поверхностное натяжение $\gamma/\gamma(T_{пл})$

пользуемой системы воздействия на шов описывается уравнениями Максвелла для электрического поля E . Влияние поля потока на распределение плотности электрического тока описывается с помощью обобщенного закона Ома:

$$\nabla \times B = \mu j, \nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t}, j = \sigma(E + u \times B). \quad (5)$$

Общие граничные условия приведены на рисунке 2, а. Более подробно они рассматриваются в работе [12]. Используемая модель материала взята из работ [15–17] (рис. 2, б), а его теплофизические свойства приведены ниже.

Теплофизические свойства нержавеющей стали AISI 304 при температуре плавления $T_{пл} = 1700$ К

Температура испарения $T_{испар}$, К	3000
Плотность ρ , кг/м ³	6900
Скрытая теплота плавления $H_{пл}$, Дж/кг	$2,61 \cdot 10^5$
Динамическая вязкость η , Па·с	$6,4 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент Марангони γ' , Н/(м·К)	$-4,3 \cdot 10^{-4}$
Теплоемкость c_p , Дж/(кг·К)	800
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	28
Удельное электрическое	

сопротивление $\rho_{эл} = \sigma^{-1}$, мкм $1,33 \cdot 10^{-6}$
 Поверхностное натяжение γ , Н/м 1,943

Вследствие ограниченной глубины проникновения магнитного поля в жидкий материал (10 мм), для всего свариваемого изделия толщиной 20 мм использовали модель, разработанную для стали AISI 304.

Численные результаты. На рис. 3 показано распределение температуры и скорости течения для случая оптимальной компенсации гидростатического давления в расплаве. Скорость сварки составляла 0,4 м/мин, а частота колебаний — 3 кГц, что обеспечило глубину проникновения магнитного поля в жидкую фазу материала, равную приблизительно 10 мм. Пиковые значения u в областях, расположенных вблизи свободных поверхностей сварочной ванны, обусловлены течением Марангони, которое направлено вдоль градиента поверхностного натяжения из горячей зоны в холодную. Вследствие этого валик сварного шва вытягивается на обеих поверхностях. На нижней поверхности это удлинение меньше вследствие выбранной

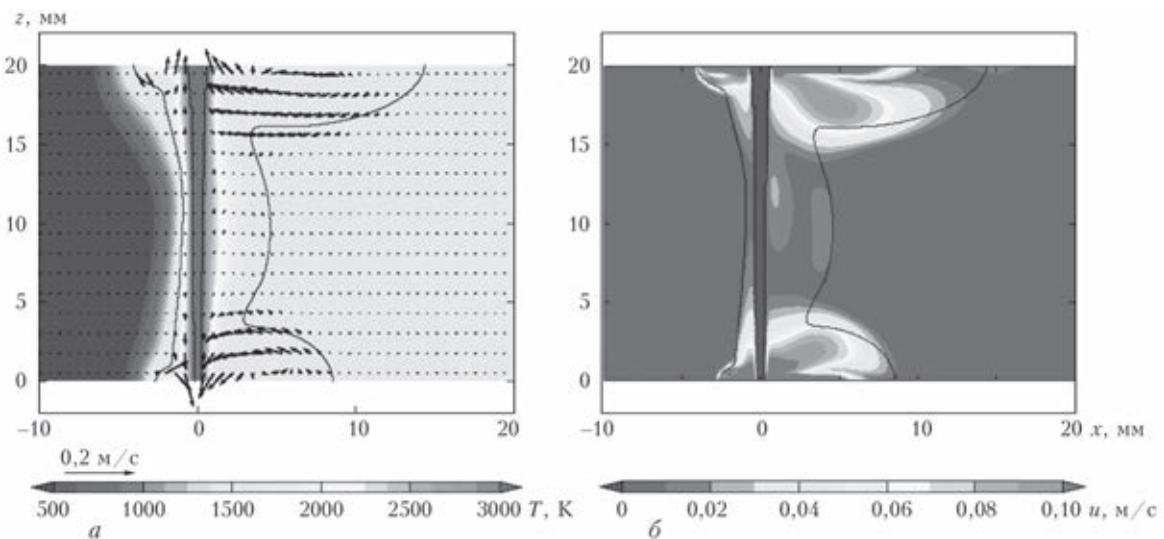


Рис. 3. Плоскость симметрии по результатам моделирования для случая оптимального электромагнитного управления гидростатическим давлением в расплаве при скорости сварки 0,4 м/мин: а — распределение температуры и векторы скорости; б — распределение скорости течения

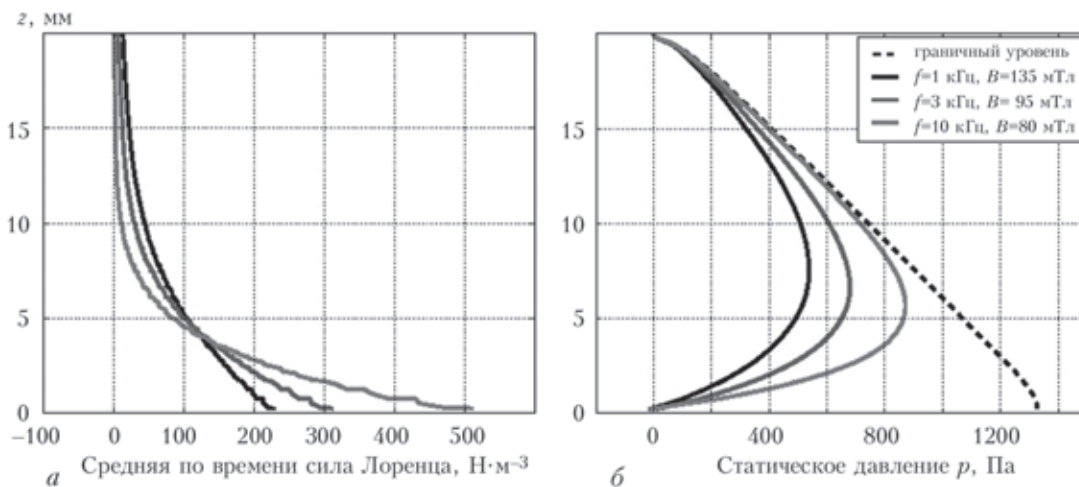


Рис. 4. Распределение давления на расстоянии 3 мм за парогазовым каналом по вертикальной оси (а) и средний по времени вертикальный компонент силы Лоренца (б)

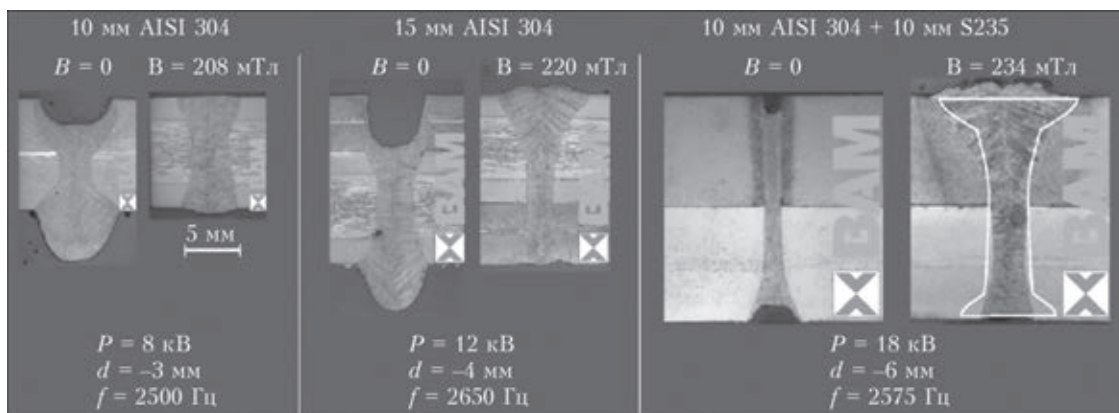


Рис. 5. Однопроходная лазерная сварка без электромагнитной системы управления ($B = 0$) и с применением такой системы ($B \neq 0$) с оптимальными параметрами для пластин толщиной от 10 до 20 мм. Скорость сварки — 0,4 м/мин. Мощность лазера P и глубина фокуса d адаптированы к толщине пластины. Для пластин толщиной 20 мм показаны также результаты, полученные путем моделирования ($B = 95$ мТл, $f = 3$ кГц)

геометрии парогазового канала, который имеет меньший диаметр на нижней стороне.

На рис. 4, а показана компенсация гидростатического давления в валике шва на расстоянии 3 мм за парогазовым каналом в плоскости симметрии для трех значений частоты. Из рисунка видно, что величины давления на обеих поверхностях практически равны, так что гравитация не оказывает никакого воздействия на стекание расплава. Расчетное распределение давления соответствует вертикальному компоненту силы Лоренца, показанному на рис. 4, б.

Экспериментальные результаты. Экспериментальные результаты при сварке пластин толщиной от 10 до 20 мм приведены на рис. 5. При этом соединения пластин толщиной до 15 мм выполняли из стали AISI 304, толщиной до 20 мм — сочетанием сталей AISI 304 (нижняя часть) и S235 (верхняя часть) для обеспечения стабильности сварочного процесса и повышения поверхностного натяжения конструкционной стали. При толщине пластины до 15 мм наблюдается сильное провисание металла валика, в то время как при толщине 20 мм процесс сварки нестабиль-

ный, при этом отмечается потеря металла в корневой и верхней частях соединения. Плотность магнитного потока, необходимая для предупреждения провисания жидкого металла валика несколько повышается с увеличением толщины пластины. При этом для любой толщины может быть обеспечено состояние оптимальной компенсации. Поперечные сечения, полученные при математическом моделировании ($B = 95$ мТл и $f = 3$ кГц), хорошо согласуются с экспериментальными ($B = 234$ мТл и $f = 2,6$ кГц).

Закключение. Система электромагнитного управления сварочной ванной успешно используется для сварки нержавеющей стали толщиной 20 мм. Доказано, что при этом провисание жидкого материала незначительно и для компенсации гидростатического давления возможно применение магнитного потока с пониженной плотностью. Незначительное увеличение магнитного поля в экспериментах с различными толщинами пластин позволяет сделать предположение, что возможен и больший эффект, который компенсирует динамические колебания в расплаве, связанные с паровой фазой в парогазовом канале, а также соответству-



ющие силы реакции или влияние слабоферромагнитных свойств материала, в частности, при точном прогнозировании плотности магнитного потока для алюминиевого сплава AlMg₃ [12].

Выражаем признательность Forschungsgemeinschaft DFG (Бонн, Германия) за финансовую помощь, оказанную по гранту № DFG GU 1211/2-1.

1. Avilov V. et al. // Sci. Technol. Weld. Joining. – 2012. – 17. – P. 128–133.
2. Vollertsen F. et al. // Weld. World. – 2010. – 54. – R62–R70.
3. Ready J. F. et al. // LIA Handbook of Laser Materials Processing. – LIA, 2001.
4. Sanderson A. et al. // Fusion Eng. Des. – 2000. – 49/50. – P. 77–87.
5. Kohyama A. et al. // J. Nucl. Mater. – 1984. – 122. – P. 772–776.
6. Kawahito Y. et al. // Sci. Technol. Weld. Joining. – 2009. – 14 – P. 288–294.
7. Shin M. et al. // Trans. JWRI. – 2010. – 39. – P. 33–38.
8. Schneider A. et al. // Phys. Process. – 2013. – 41. – P. 4–11.
9. Vollertsen F. et al. // J. Laser Appl. – 2006. – 18. – P. 28–34.
10. Avilov V. V. et al. // Proc. of EPM. – Dresden, 2009.
11. Avilov V. V. et al. // Sci. Technol. Weld. Joining. – 2012. – 17. – P. 128–133.
12. Bachmann M. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2012. – 45. – P. 13.
13. Gatzel M. et al. // Proc. of LAMP. – 2009.
14. Velde O. et al. // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2001. – 44. – P. 2751–2762.
15. Sahoo P. et al. // Metallurgical and Materials Transactions B. – 1988. – 19. – P. 483–491.
16. Mills K. C. Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys. – Woodhead Publ. Ltd., 2002.
17. Wilthan B. et al. // Int. J. Thermophys. – 2008. – 29. – P. 434–444.

Поступила в редакцию 10.01.2014



МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПРОБЛЕМЫ КОРРОЗИИ И АНТИКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»

11–13 июня 2014

г. Львов, Украина

Организаторы конференции:

- Европейская коррозионная федерация
- Национальная академия наук Украины
- Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
- Украинская ассоциация коррозионистов
- Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАНУ
- Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

Тематика конференции:

- фундаментальные аспекты коррозии и коррозионно-механического разрушения;
- водородная и газовая коррозии;
- новые коррозионностойкие материалы и покрытия;
- ингибиторная и биоцидная защита;
- электрохимическая защита;
- методы исследования и коррозионный контроль;
- противокоррозионная защита оборудования нефтегазовой, химической и энергетической промышленности (круглый стол).

Контакты: тел. (032) 229-63-85, Н. Червинская; тел./факс: (032) 263-80-96, С. Корний;
E-mail: corrosion2014@ipm.lviv.ua