

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ, ИМИТИРУЮЩИХ ОТКРЫТЫЙ КОСМОС*

Е. А. АСНИС, Е. Г. ТЕРНОВОЙ, Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, А. С. МИЛЕНИН, Г. Ф. РОЗЫНКА
ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведены результаты расчетных исследований влияния светотеневых границ, способствующих предварительному нагреву освещенных солнцем свариваемых пластин и интенсивному их охлаждению на теневой стороне в процессе электронно-лучевой сварки в условиях, имитирующих открытый космос, на напряженно-деформированное состояние. Для этого разработан комплекс численных методик и программных средств компьютерного моделирования кинетики полей температур, напряжений и деформаций при сварке плавлением встык пластин из алюминиевого сплава АМгб с учетом существенно неоднородного внешнего температурного воздействия. Проведен анализ влияния расположения светотеневых границ относительно сварного шва на формирующееся текущее и остаточное напряженное состояние алюминиевых пластин при сварке. Для этого на основе расчетной кинетики температурного поля, определяемой с учетом особенностей воздействия источника сварочного нагрева и условий внешнего нагрева и охлаждения, методом конечных элементов решались соответствующие задачи нестационарной термопластичности. Проведенные вычисления, в частности, показали, что распределение остаточных напряжений, формирующихся в сварных соединениях пластин из алюминиевого сплава АМгб при различном расположении светотеневых границ, характеризуется максимальными напряжениями, которые не достигают предела текучести основного металла (170...180 МПа). Такие напряжения не должны существенно снижать механические характеристики и работоспособность сварных деталей и узлов, получаемых в условиях открытого космоса. Библиогр. 6, рис. 3.

Ключевые слова: имитация условий открытого космоса, светотеневая граница, напряженное состояние, математическое моделирование

Проведение сварочных работ в условиях открытого космоса, зачастую, может являться необходимой технологической процедурой при монтаже и ремонтно-восстановительных работах ответственных конструктивных элементов космических аппаратов длительного срока эксплуатации. Выбор конкретных параметров сварки, которые гарантируют качество соединения, сопряжен с учетом особенностей влияния факторов космического пространства (низкая гравитация, глубокий вакуум, частая смена светотеневых границ и др.) [1, 2]. Одной из основных особенностей сварки в открытом космосе является резкий перепад температур в теневой и освещенной частях конструкции: на солнечном участке орбиты поверхность элементов космического аппарата может нагреваться до температуры 120 °С, а иногда и выше, тогда как на теневых участках температура снижается до -110 ... -120 °С [1].

Неоднородное внешнее температурное воздействие влияет не только на собственно процесс сварки ввиду различного тепловложения в зависимости от расположения светотеневой границы, но и на формирование металла сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ) в условиях различного предварительного подогрева и охлаждения,

а также на особенности термомодеформирования конструкции.

Алюминиевые сплавы являются основными конструкционными материалами для космического аппаратостроения. При их предварительном подогреве перед сваркой до 100 ... 120 °С увеличиваются размеры сварочной ванны и уменьшается переохлаждение жидкого металла на фронте кристаллизации, что ведет к увеличению размеров кристаллитов и способствует снижению прочности сварного шва [3]. На теневой стороне в результате низких температур может снижаться стойкость металла шва к образованию кристаллизационных трещин, хотя снижение начальной температуры, практически, не оказывает влияние на механические свойства металла шва [4]. Возникающие напряжения в сварных соединениях могут дополнительно влиять на уменьшение стойкости металла шва против горячих трещин и вызывать снижение эксплуатационных характеристик конструкций, что особенно важно при длительных сроках эксплуатации космических аппаратов в космосе.

В связи с весьма ограниченным количеством сварных образцов, полученных в открытом космосе и доставленных на Землю [1], исследования их напряженно-деформированного состояния (НДС) не проводились. Так как экспериментальная оценка влияния условий открытого космоса на НДС сварных соединений сопряжена с объективными

* В работе принимали участие С. А. Глушак, Т. А. Ликаренко.

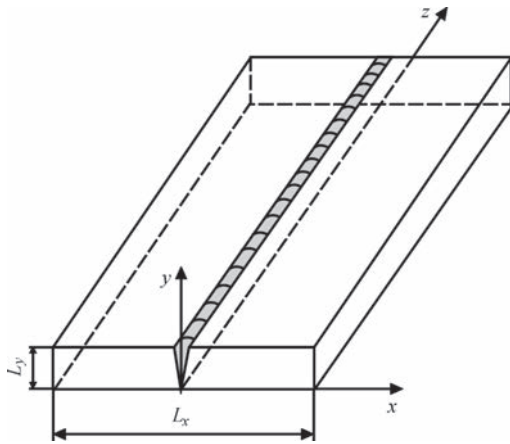


Рис. 1. Схема сварки образца

трудностями, рациональным подходом является использование методов математического и компьютерного моделирования.

Задача настоящего исследования состояла в численном анализе особенностей НДС сварного стыкового соединения, полученного в условиях, имитирующих открытый космос, при различном положении светотеневой границы.

Для решения поставленной задачи был разработан комплекс математических моделей и средств их компьютерной реализации, которые позволяют решать совместные задачи кинетики температурных полей под действием быстро движущегося источника сварочного нагрева и пространственно неоднородного поля температур окружающего пространства. Развитие напряжений и деформаций оценивали в свариваемых встык пластинах (плоское деформированное состояние, рис. 1). Для этого решалась задача нестационарной теплопроводности для поля температур $T(x, y)$ при воздействии источника сварочного нагрева мощностью W :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \right) + W = c\gamma(T) \frac{\partial T(x, y)}{\partial t}, \quad (1)$$

где $\lambda(T)$ — коэффициент теплопроводности; $c\gamma(T)$ — объемная теплоемкость; t — текущий момент времени.

Исходя из особенностей поверхностной теплоотдачи в условиях открытого космоса, граничные условия к уравнению (1) были сформулированы следующим образом:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(x, y)}{\partial n} = \varepsilon \sigma_{SB} (T^4 - T_c^4(x)), \quad (2)$$

где

$$T_c(x) = \begin{cases} T_{sh}, & \text{если } x < x_0 \\ T_{sn}, & \text{если } x \geq x_0 \end{cases}, \quad (3)$$

T_{sh}, T_{sn} — температура внешней среды в теневой и солнечной части конструкции, соответственно; ε — степень черноты поверхности свариваемой конструкции; σ_{SB} — константа Стефана–Больцмана; x_0 — текущее положение светотеневой границы; n — нормаль к поверхности.

Прогнозирование остаточных напряжений проводилось с помощью расчетной методики, основанной на последовательном прослеживании развития упругопластических деформаций в точках x, y сечения образцов в процессе сварочного нагрева и последующего остывания [5]. Так, в любой момент времени t тензор деформаций ε_{ij} можно представить в виде суммы тензоров:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^T, \quad (4)$$

где ε_{ij}^e — тензор обратимых упругих деформаций; ε_{ij}^p — тензор неупругих деформаций мгновенной пластичности; ε_{ij}^T — тензор обратимых температурных деформаций.

Таким образом, тензор приращений деформаций $\Delta\varepsilon_{ij}$ на каждом этапе прослеживания представим в следующем виде:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + \delta_{ij} \left(d\varepsilon_{ij}^T \right), \quad (5)$$

где δ_{ij} — единичный тензор или символ Кронекера, т. е. $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$ и $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$.

Связь между напряжениями σ_{ij} и приращениями деформаций в точке (x, y) в момент времени t по сравнению с $t = 0$ определяется обобщенным законом Гука с учетом объемных температурных и микроструктурных изменений $\Delta\varphi$ и ассоциированным законом пластического течения:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Psi \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma \right) + \delta_{ij} \left(K \sigma + \Delta\varepsilon_{ij}^T \right) - \frac{1}{2G} \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma \right)^* - (K \sigma)^*, \quad (6)$$

где Ψ — функция состояния упругопластического материала, определяющая степень развития пластического течения; $\sigma = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$, $G = E/2(1+\nu)$ — модуль сдвига; E — модуль нормальной упругости; ν — коэффициент Пуассона; $K = (1-2\nu)/E$ — модуль объемного сжатия.

Функция Ψ отражает состояние материала в точке x, y в момент времени t : она либо равна $1/2G$ (упругое поведение), либо больше $1/2G$ (упругопластическое поведение). Условие текучести позволяет построить итерационный процесс уточнения функции Ψ :

$$\Psi = \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T(T); \quad (7)$$

$$\Psi > \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i = \sigma_s;$$

состояние $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимо,

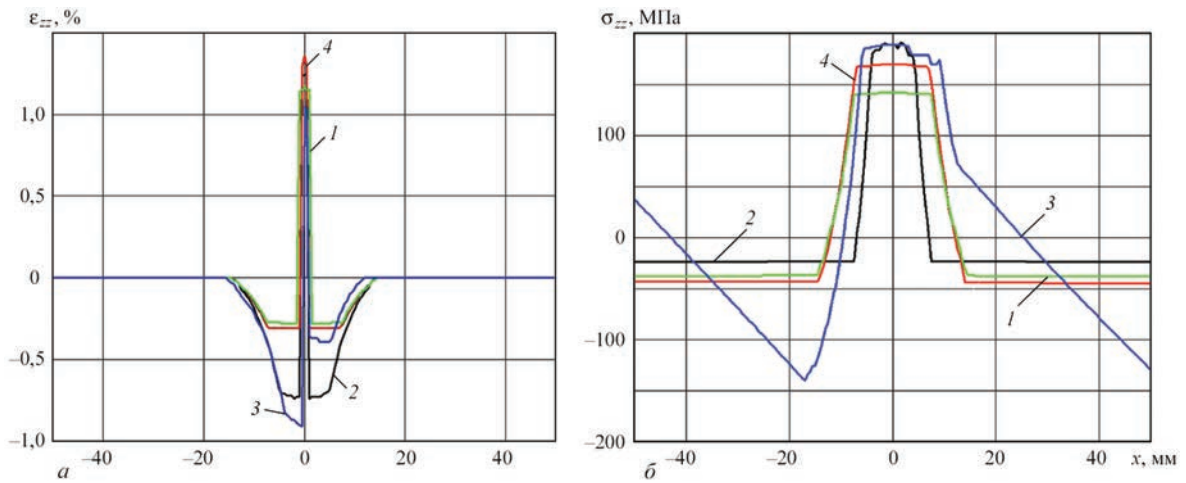


Рис. 2. Распределение остаточных продольных деформаций ϵ_{zz} (а) и напряжений σ_{zz} (б) по ширине образца при различных условиях внешнего температурного воздействия: 1 — на солнечной; 2 — на теневой стороне; 3 — при расположении светотеневой границы на сварном стыке ($x_0 = 0$), когда одна из свариваемых пластин прогрета до температуры $T_{sn} = 120$ °С (положительная полуось $0x$), другая охлаждена до $T_{sh} = -120$ °С (отрицательная полуось $0x$); 4 — комнатная температура окружающей среды (20 °С)

где σ_T — предел текучести материала; σ_i — интенсивность напряжений.

Без ограничения общности, для проведения вычислений рассматривался характерный плоский сварной образец из алюминиевого сплава АМгб размером $L_z \times L_x \times L_y = 180 \times 50 \times 2$ мм, что соответствует образцам, полученным в космосе. Проводилась электронно-лучевая сварка встык. Режимы сварки: ускоряющее напряжение $U_{уск} = 10$ кВ, ток луча $I_{л} = 100$ мА, скорость сварки $v_{св} = 8$ мм/с. В зависимости от расположения светотеневой границы x_0 относительно линии сварного соединения были рассмотрены следующие условия сварки:

1. Сварка на солнечной стороне ($x_0 < -L_x/2$), т. е. с предварительным подогревом до температуры окружающей среды $T_c = T_{sn} = 120$ °С.
2. Сварка на теневой стороне ($x_0 > L_x/2$), т. е. с охлаждением до температуры окружающей среды $T_c = T_{sh} = -120$ °С.
3. Сварка при расположении светотеневой границы на сварном стыке ($x_0 = 0$), когда одна из

свариваемых пластин прогрета до температуры $T_{sn} = 120$ °С, в то время как другая охлаждена до $T_{sh} = -120$ °С.

Также для сравнения было рассчитано НДС образца указанных выше размеров после сварки при комнатной температуре (20 °С).

Расчеты показали, что поперечные напряжения σ_{xx} и деформации ϵ_{xx} имеют очень низкие значения, близкие к нулю и, поэтому, в дальнейшем не рассматриваются. Процессы необратимой деформационной усадки в области локального сварочного нагрева определяют формирование высоких продольных деформаций ϵ_{zz} и напряжений σ_{zz} , что характерно для сварки пластин [6]. Так, величина деформаций ϵ_{zz} в зависимости от температурных условий на границе свариваемого изделия не превышает 1,5 %, при этом при неравномерном нагреве (условие 3) различия в свойствах свариваемых пластин и условиях нагрева/охлаждения вызывает незначительное увеличение деформаций продольной усадки в теневой части конструкции,

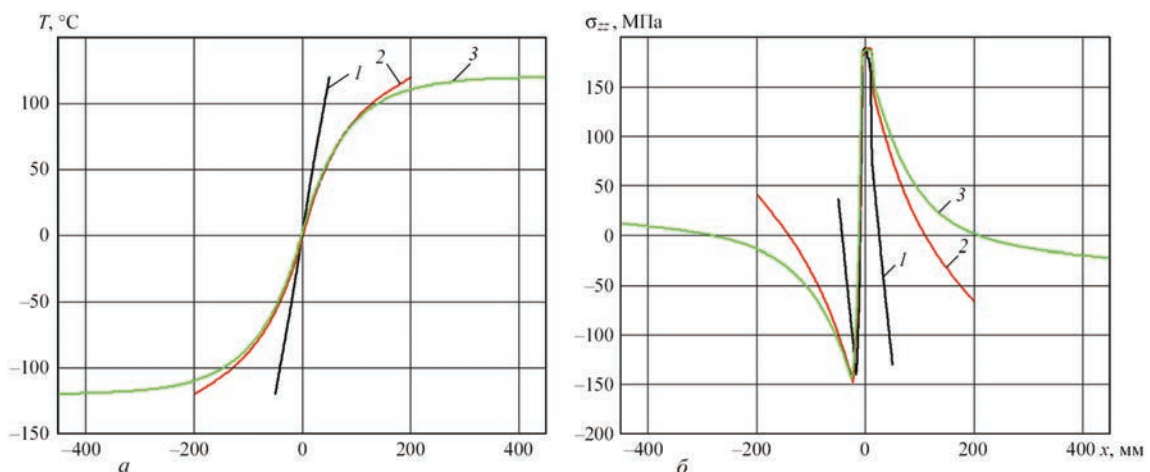


Рис. 3. Влияние ширины свариваемого образца L_x на распределение температур (а) и продольных остаточных напряжений σ_{zz} (б) при условии расположения светотеневой границы вдоль шва: 1 — $L_x = 100$ мм, 2 — 400, 3 — 900

оставляя общие деформации в пределах общепринятых допусков (рис. 2, а).

На рис. 2, б приведены кривые остаточных продольных напряжений σ_{zz} . Наиболее высокие значения наблюдаются в шве и, практически, не отличаются друг от друга в зависимости от температурных условий окружающей среды: отличия определяются разницей предела текучести материала при соответствующих температурах. Характерным отличием поля напряжений при неравномерном нагреве (условие 3) являются ненулевые значения напряжений на периферии образца. Это связано с тем, что несмотря на наличие светотеневой границы на поверхности свариваемого изделия, по толщине металла температура распределяется согласно физическим свойствам металла (теплопроводность и теплоемкость), поэтому переход от температуры $T_{sh} = -120^\circ\text{C}$ к $T_{sn} = 120^\circ\text{C}$ происходит плавно (рис. 3, а). При этом ширина рассматриваемого образца такова, что градиент температур сохраняется по всему его сечению, что приводит к формированию соответствующих уравновешенных напряжений. Увеличение ширины образца нивелирует влияние градиента температур в области светотеневой границы на напряженное состояние изделия на его периферии (рис. 3, б).

Выводы

1. Результаты расчетов показали, что предварительный подогрев и охлаждение не оказывает влияния на НДС сварных соединений алюминиевого сплава АМг6.

2. Напряжения в сварных соединениях не превышают предел текучести основного материала. Такие напряжения не оказывают существенного влияния на прочностные характеристики и работоспособность сварных соединений, полученных в условиях космического пространства.

3. На основе результатов численных исследований продемонстрировано влияние ширины свариваемого встык образца из алюминиевого сплава АМг6 при его неравномерном нагреве в условиях, имитирующих открытый космос, на распределение температур и напряжений. Показано, что наличие светотеневой границы (с диапазоном температур от -120 до 120°C) вызывает формирование переходной области в металле протяженностью около 400 мм. Поэтому при сварке образцов меньшего размера распределение напряжений характеризуется ростом продольной составляющей к периферии изделия.

Список литературы

1. Б. Е. Патон (ред.). (2000) *КОСМОС: технологии, материаловедение, конструкции*. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона.
2. Fragomeni J. M., Nunes Jr. A. C. (2003) A study of the effects of welding parameters on electron beam welding in the space environment. *Aerospace Science and Technology*, **7**, 373–384.

3. Рабкин Д. М. (1986) *Металлургия сварки алюминиевых сплавов*. Киев, Наукова думка.
4. Бондарев А. А., Терновой Е. Г. (2010) Особенности формирования швов и свойства соединений алюминиевых и магниевых сплавов в условиях, имитирующих космические. *Автоматическая сварка*, **11**, 22–27.
5. Махненко В. И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
6. Mi G., Li C., Gao Z. et al. (2014) Finite element analysis of welding residual stresses of aluminum plates under different butt joint parameters. *Engineering Review*, **34**, 3, 161–166.

References

1. Paton, B.E. (2000) *Space: technologies, materials science, structures*. Kiev, PWI [in Russian].
2. Fragomeni, J.M., Nunes Jr., A.C. (2003) A study of the effects of welding parameters on electron beam welding in the space environment. *Aerospace Sci. and Technology*, **7**, 373–384.
3. Rabkin, D.M. (1986) *Metallurgy of welding of aluminium alloys*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Bondarev, A.A., Ternovoj, E.G. (2010) Features of weld formation and properties of aluminium and magnesium alloy joints under simulated space conditions. *The Paton Welding J.*, **11**, 16–20.
5. Makhnenko, V.I. (2006) *Resource of safe operation of welded joints and assemblies of modern structures*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Mi, G., Li, C., Gao, Z. et al. (2014) Finite element analysis of welding residual stresses of aluminum plates under different butt joint parameters. *Engineering Review*, **34**(3), 161–166.

Ю. А. Асніс, Є. Г. Терновий, О. А. Великоіваненко,
О. С. Міленін, Г. П. Розинка

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ, ОТРИМАНИХ В УМОВАХ, ІМІТУЮЧИХ ВІДКРИТИЙ КОСМОС

Наведено результати розрахункових досліджень впливу світлотіньових границь, які сприяють попередньому нагріву освітлених сонцем пластин, що зварюються, та інтенсивному їх охолодженню на тіньовій стороні в процесі зварювання в умовах, імітуючих відкритий космос, на напружено-деформований стан. Для цього розроблений комплекс чисельних методик і програмних засобів комп'ютерного моделювання кінетики полів температур, напружень і деформацій при зварюванні плавленням встык пластин з алюмінієвого сплаву АМг6 з урахуванням істотно неоднорідного зовнішнього температурного впливу. Проведено аналіз впливу розташування світлотіньових границь відносно зварного шва на поточний і залишковий напружений стан алюмінієвих пластин, що формуються при зварюванні. Для цього на основі розрахункової кінетики температурного поля, яка визначається з урахуванням особливостей впливу джерела зварювального нагріву і умов зовнішнього нагріву та охолодження, методом кінцевих елементів вирішувалися відповідні задачі нестационарної термопластичності. Проведені обчислення, зокрема, показали, що розподіл залишкових напружень, які формуються в зварних з'єднаннях пластин з алюмінієвого сплаву АМг6 при різному розташуванні світлотіньових границь, характеризуються максимальними напруженнями, які не досягають межі текучості основного металу (170...180 МПа). Такі напруги не повинні істотно знижувати механічні характеристики

ки і працездатність зварних деталей і вузлів, отриманих в умовах відкритого космосу. Бібліогр. 6, рис. 3.

Ключові слова: імітація умов космосу, світлотіньова границя, напружений стан, математичне моделювання

E. A. Asnis, E. G. Ternovoj, E. A. Velikoivanenko,
A. S. Milenin, G. F. Rozyuka

E. O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

STRESS-STRAIN STATE OF WELDED JOINTS
FROM ALUMINIUM ALLOYS UNDER
THE CONDITIONS SIMULATING OPEN SPACE

The paper gives the results of computational research of the influence of light-shade boundaries promoting preheating of joints of sunlit plates to be welded and their intensive cooling on the shaded side during electron beam welding under the conditions simulating open space, on the stress-strain state. A set of numerical

procedures and software for computer modeling of the kinetics of temperature fields, stresses and strains in butt fusion welding of plates from aluminium alloy AMg6, allowing for essentially non-uniform external temperature impact were developed for this purpose. The influence of the position of light-shade boundaries relative to the weld on the forming current and residual stressed state of aluminium plates in welding was analyzed. For this purpose the respective problems of nonstationary thermoplasticity were solved by finite element method, based on computational temperature field kinetics, determined allowing for the features of the impact of welding heat source and conditions of external heating and cooling. Performed calculations showed, in particular, that distribution of residual stresses forming in welded joints of plates from aluminium alloy AMg6 at different position of light-shade boundaries, is characterized by maximum stresses, which do not reach the base metal yield limit (170 – 180 MPa). Such stresses should not essentially lower the mechanical characteristics and performance of welded parts and components, produced in open space conditions. 6 Ref., 3 Fig.

Keywords: simulation of open space conditions, light-shade boundary, stressed state, mathematical modeling

Поступила в редакцию 20.11.2017



МЕТАЛ ОБЛАДНАННЯ ІНСТРУМЕНТ

VIII спеціалізована виставка «Метал. Обладнання. Інструмент 2018»

25–27 квітня 2018 р., Палац спорту «Україна», вул. Мельника, 18, м. Львів

Тематичні розділи виставки:

- ◆ обладнання для обробки металу ◆ металорізальні верстати та оснастка
- ◆ лазерне, плазмове обладнання і технології ◆ обладнання для розкрою листа і прокату
- ◆ металорізальні інструменти ◆ зварювальне обладнання ◆ ковальське обладнання та ін.

Детальна інформація про проект та архів заходів на сайті: <http://met.expolviv.ua>

9 Международная конференция «ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ»

17–19 сентября 2018 г.

г. Санкт-Петербург (г. Пушкин)

Тематика конференции

- ▶ Физические основы и математическое моделирование лучевых технологий. CAD-CAM-CAE системы.
- ▶ Оборудование и технологии сварки, наплавки и термообработки.
- ▶ Оборудование и технологии аддитивного производства.
- ▶ Оборудование и технологии резки, прошивки отверстий и обработки поверхности.
- ▶ Метрология, системы измерений и дефектоскопия.

Официальные языки конференции: английский, русский

www.ilwt-stu.ru