

**В.Д. Шелягін¹, В.І. Луценко²,
В.Ю. Хаскін¹, А.Г. Лукашенко¹, А.В. Бернацький¹,
О.В. Сіора¹, І.В. Шуба¹**

¹ Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

² ТОВ «Науково-дослідний інформаційний центр "АРМАТОМ"», Київ

РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРУБНИХ КОМПЕНСУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ АВІАКОСМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ



Встановлено, що для виготовлення сильфонних компенсаторів доцільно застосовувати лазерне зварювання з імпульсною модуляцією випромінювання. Розроблено спосіб імпульсного лазерного зварювання нержавіючих та вуглецевих сталей. Створено технологію та обладнання для лазерного зварювання сильфонних компенсуючих складок з нержавіючої сталі. Виготовлені із застосуванням лазерного імпульсного зварювання сильфонні компенсатори матимуть кращі експлуатаційні властивості та довший термін використання.

Ключові слова: сильфонні компенсатори, лазерне зварювання, імпульсна модуляція випромінювання, дрібнозернисті структури, зварювальний комплекс.

Розвиток багатьох галузей промисловості і техніки сьогодні не можна уявити без використання сильфонних компенсаторів. Основним робочим елементом даних виробів є сильфон — гнучка гофрована металева трубка з тонкостінної сталі. Часто цю трубку виготовляють багатошаровою. Сильфони з'єднуються за допомогою зварного з'єднання з масивнішою арматурою (трубками, втулками). Сильфонні компенсатори використовуються у виробках вакуумної і криогенної техніки, в хімічній промисловості, атомній енергетиці, а також в авіаційній і космічній техніці. Дані вироби застосовуються для транспортування агресивних рідин і газів при різних температурах і у

вакуумцільних з'єднаннях. Необхідність їх використання продиктована особливостями умов роботи. Сильфонні компенсатори з'єднують деталі і вузли, що здійснюють у процесі експлуатації відносні переміщення або що працюють в умовах вібрації.

Зазначені умови роботи даних виробів вимагають специфічних властивостей зварних з'єднань, а саме — наявності достатньої міцності та герметичності. Сильфонні компенсатори при роботі в агресивному середовищі та при високих температурах повинні мати підвищену корозійну стійкість, підвищену втону міцність і надійність. Це зумовлено тим, що вони зазвичай використовуються у відповідальних вузлах, перш за все у виробках атомної енергетики, авіаційної і космічної техніки. Важливим фактором у забезпеченні високої надійності й безвідмовності роботи приладів є ви-

сокоєфективне ресурсоощадне виробництво, яке використовує сучасні технології.

У разі використання лазерних технологій при вирішенні проблем якісного зварювання, а також автоматизації зварювального процесу можна не лише покращити існуючі досягнення, але й досягти позитивних результатів там, де поки що не вдалося віднайти технологічного рішення [1]. Відомо, що застосування лазерного випромінювання дозволяє створити локальне нагрівання як однотовщинних, так і різновтовщинних деталей, а також отримати у зварювальних швах дрібнокристалічні структури із наперед заданими властивостями [2]. Тому нами була поставлена мета створення технології лазерного зварювання замкнених кільцевих швів в різновтовщинних багат шарових виробках із нержавіючих аустенітних сталей, а також створення адекватного автоматизованого зварювального виробництва при виготовленні відповідальних силфонних вузлів, які забезпечують надійну роботу космічного корабля, літака, атомної електростанції, підприємств харчових виробництв тощо.

Для досягнення поставленої мети проводилися дослідження з лазерного зварювання різновтовщинних з'єднань прорізними швами. Плaskі та циліндричні зразки виготовляли зі сталевий фольги типу 08X18H10T товщиною $\delta = 0,15-0,30$ мм, а також зі сталі типу 08X18H10T товщиною $\delta = 1,5-2,0$ мм. Розмір плaskих зразків становив $150 \times 50 \times \delta$ мм, розмір циліндричних трубчастих тонкостінних — $\varnothing 30 \times \varnothing (30-2\delta) \times 30$ мм (де δ — товщина фольги) і $\varnothing 60 \times \varnothing 59,4 \times 60$ мм, циліндричних трубчастих товстостінних — $\varnothing (30-2\delta) \times \varnothing 27 \times 30$ мм (де δ — товщина фольги) і $\varnothing 59,4 \times \varnothing 56 \times 80$ мм. Досліді проводили за допомогою волоконного лазера моделі YLR-400-AC (фірма IPG, Німеччина) потужністю до 400 Вт із можливістю фокусування випромінювання у пляму розміром 40–50 мкм. Випромінювання лазера фокусували лінзою із фокусною відстанню 150 мм. Ця лінза була встановлена у зварювальну головку вітчизняного зразка. До верхньої частини головки був під'єднаний коліматор із оптичним во-

локном, яке транспортувало випромінювання від лазера, а в нижній частині знаходилося захисне сопло. До головки підводився захисний газ — аргон або гелій. Зварювання здійснювали за допомогою обертача нашої розробки, який дозволяв плавно змінювати частоту обертання від 0,1 до 20 хв⁻¹.

В ході проведення технологічних досліджень було встановлено, що для покращення умов дії лазерного випромінювання на зразок, зокрема для мінімізації негативного впливу плазми, що утворюється над зварювальною ванною, на сфокусоване випромінювання, доцільно використовувати гелій із витратами 10–12 л/хв. Також було визначено режим лазерного зварювання прорізними швами із використанням неперервного випромінювання. У разі потужності порядку 70 Вт лінійні швидкості зварювання знаходилися в межах 500–700 мм/хв. При зварюванні кільцевих замкнених швів для усунення пропалення у місці замкнення шва плавно зменшували потужність випромінювання таким чином, щоб довжина перевареної ділянки шва становила до 5 мм. Однак при зварюванні циліндричних трубчастих зразків виникали інші дефекти — відшарування верхнього тонкостінного зразка від нижнього товстостінного. Таке відшарування призводило до виникнення пропалу. Одним зі способів усунення цього дефекту є імпульсна модуляція лазерного випромінювання.

Металографічні дослідження показують, що в разі застосування імпульсної модуляції випромінювання при лазерному зварюванні в одержаних з'єднаннях зменшується розмір зерен в литому металі швів та у зоні термічного впливу (ЗТВ). Механічні випробування свідчать про позитивний вплив цього ефекту на підвищення ударної в'язкості з'єднань, а випробування на корозійну стійкість — про зростання стійкості швів до міжкристалітної корозії із зменшенням зерен в них. Відомо, що імпульсній модуляції випромінювання можна виконувати з різними частотами і при цьому по різному формувати імпульс. В результаті виконаних експериментів можна зробити висновок

про необхідність формування імпульсів певної форми з певною послідовністю імпульсів та пауз. Тобто виникає потреба у проведенні оптимізації форми зварювальних імпульсів сфокусованого лазерного випромінювання, які локально плавлять метал в зоні зварювання. При виконанні такої оптимізації ми базувалися на певному критерії формування заднього фронту імпульсу, оскільки саме задній фронт відповідає за особливості кристалізації переплавленого металу і за формування в ньому певних структур. Таким критерієм, згідно з роботою [3], є необхідність створення умови зародження максимальної кількості центрів кристалізації у сполученні з одночасною мінімізацією лінійної швидкості росту кристалів для металу, що зварюють.

При розробці технології імпульсного лазерного зварювання нержавіючих та вуглецевих сталей ми базувалися на кількох існуючих способах. Так, відповідно до відомого способу лазерного зварювання [4] імпульс лазерного випромінювання становить собою вгнуту криву в координатах: густина $q(t)$ потужності — час t . Довжина початкової ділянки кривої, що означає форму імпульсу, визначається часом, необхідним для утворення достатньо великого об'єму розплаву. Густина потужності на цій ділянці не повинна перевищувати значення, яке відповідає розвиненому випаровуванню металу. Густина потужності випромінювання на початковій ділянці і довжина цієї ділянки залежать від діаметра плями фокусування лазерного випромінювання на поверхні зварюваних деталей. Чим менший діаметр плями фокусування на поверхні стику деталей, що зварюють, тим більшою є кривизна кривої $q(t)$. Недоліком описаного способу [4] є те, що форма імпульсів лазерного випромінювання не передбачає термічної обробки литого металу зварних швів. Імпульси призначені лише для розплавлення без розвиненого випаровування металу зварюваних деталей. Такий підхід може призводити до утворення небажаних крихких структур закалювання в швах.

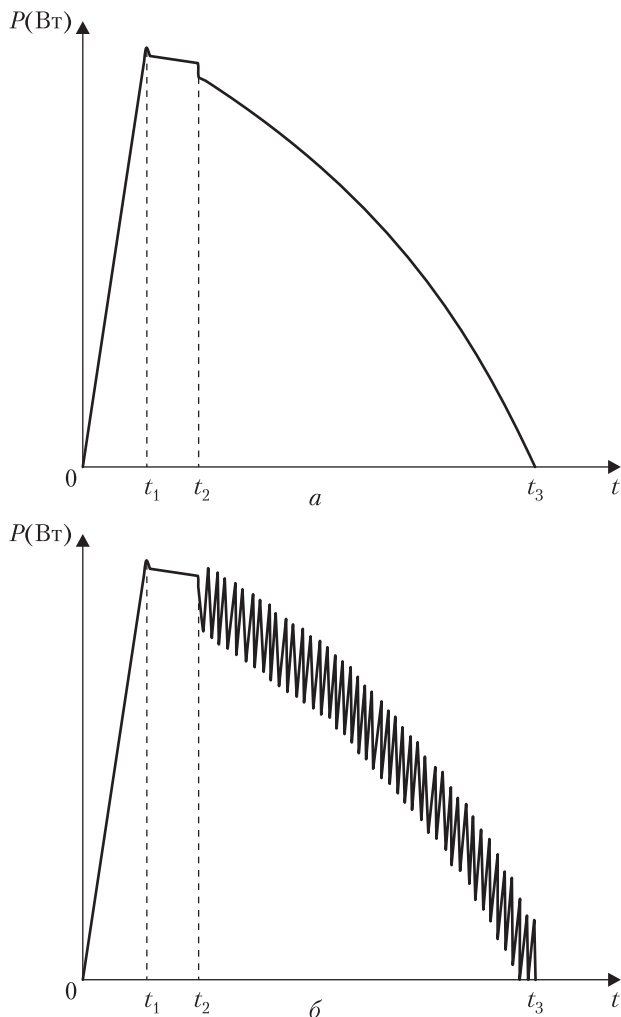
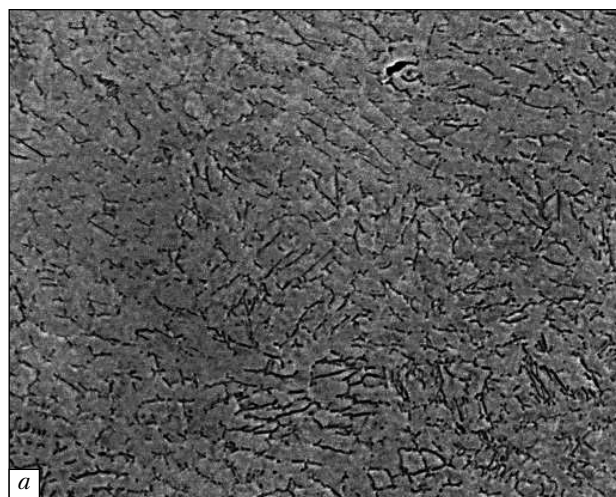
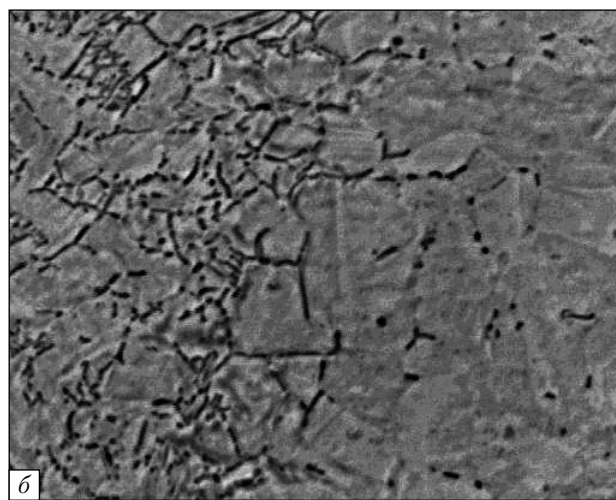


Рис. 1. Умовна форма імпульсу лазерного випромінювання, який використовується в розробленій технології зварювання трубних компенсуючих елементів

Для усунення вказаного недоліку можна використовувати спосіб лазерного зварювання [5], згідно з яким для підвищення якості зварного з'єднання видаляють поверхневий шар із одночасним формуванням каналу з боковими стінками, покритими тонким шаром розплаву. Це здійснюється дією модульованого випромінювання додаткового лазера. Вплив імпульсу, що плавить, починається з часовим здвигом від початку генерації цугу імпульсів модульованого випромінювання додаткового лазера,



80 μm

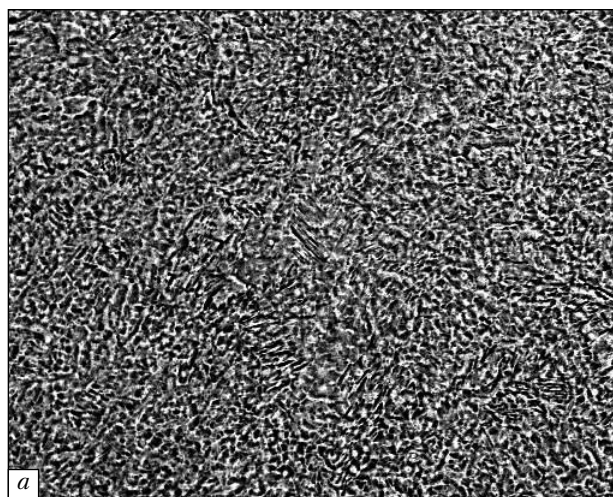


30 μm

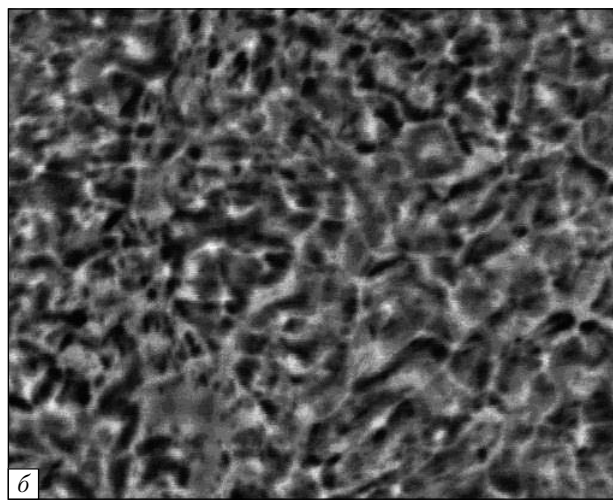
Рис. 2. Структури зварного з'єднання, отриманого за допомогою неперервного лазерного випромінювання потужністю 57 Вт

який встановлюють із певного співвідношення. Недоліком такого способу імпульсного лазерного зварювання тонколистових металів є необхідність використання додаткового лазера.

Більшою мірою (ніж вказаними двома способами) ми користувалися способом, описаним у роботі [6]. Згідно з ним формують імпульс складної форми. За рахунок впливу переднього крутого фронту цього імпульсу здійснюється нагрівання тугоплавкої окисної плівки



80 μm



10 μm

Рис. 3. Структури зварного з'єднання, отриманого за допомогою імпульсно модульованого лазерного випромінювання із середньою потужністю 57 Вт і частотою модуляції 3000 Гц

до температур її випаровування, а за рахунок впливу заднього фронту імпульсу — термообробка зварюваного металу. Задній фронт, що плавно спадає, містить дві платоподібні ділянки, верхня з яких має густину потужності, що забезпечує плавлення металу, а нижня — відповідає густині потужності, яка необхідна для підтримки заданої температури термічної обробки. Недоліком описаного способу [6] є те,

що при його застосуванні не враховується такий важливий засіб підвищення якості зварного з'єднання і його механічної міцності, як отримання рівноважної дрібнодисперсної структури литого металу зварного шва. Використання термічної обробки частиною заднього фронту імпульсу для цього недостатньо. Як зазначалося вище, потрібно враховувати критерій умови зародження максимальної кількості центрів кристалізації з одночасною мінімізацією лінійної швидкості росту кристалів зварюваного металу [3].

З урахуванням вказаного критерію при створенні власного способу імпульсного лазерного зварювання нами була поставлена задача досягнення максимального можливого підвищення пластичності, міцності та корозійної стійкості зварного з'єднання. Розв'язання цієї задачі можливе в разі локального плавлення металу в зоні зварювання імпульсами сфокусованого лазерного випромінювання складної форми, які мають крутий передній фронт і плавно спадаючий задній фронт. Задній фронт імпульсів містить дві похилі ділянки, верхня з яких забезпечує плавлення зварюваного металу без інтенсивного випаровування, а нижня — утворення дрібнозернистої структури зварного шва за рахунок створення умови зародження максимальної кількості центрів кристалізації та мінімізації лінійної швидкості росту кристалів для зварюваного металу. Також за описаним способом можна проводити лазерне зварювання такими імпульсами, нижня ділянка заднього фронту яких модульована частотою ультразвукового діапазону з амплітудою, що забезпечує коливання, які деструктують кристаліти, котрі ростуть [7]. При цьому фрагменти деструктованих кристалітів стають новими центрами кристалізації в області зональних фазових переходів *ліквідус—солідус*.

На рис. 1, *a* наведена умовна форма імпульсу лазерного випромінювання, який складається з крутого переднього фронту $0-t_1$, першої похилої ділянки заднього фронту t_1-t_2 і другої ділянки заднього фронту t_2-t_3 . За рахунок

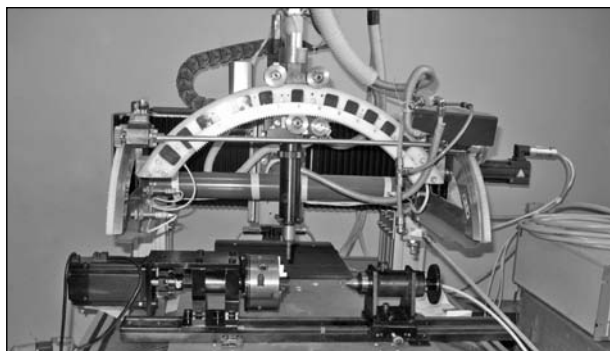


Рис. 4. Зовнішній вигляд автоматизованого лазерного комплексу для зварювання трубних компенсуючих елементів

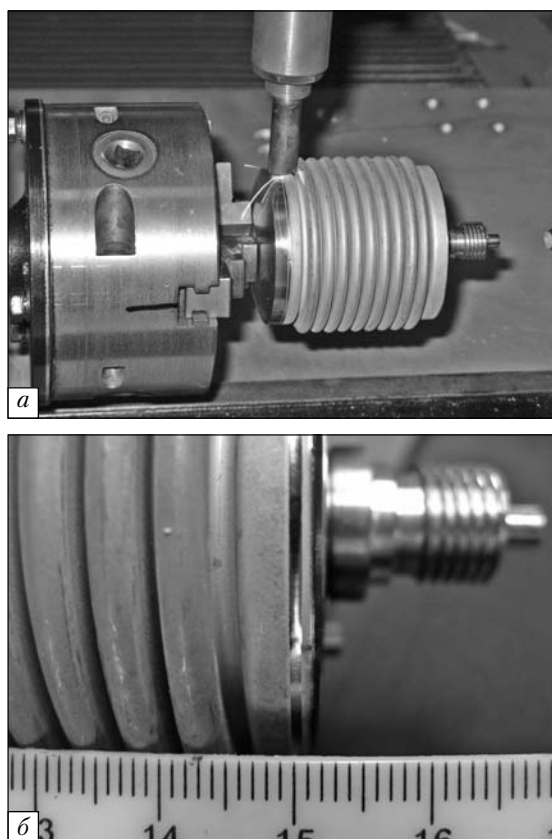


Рис. 5. Процес лазерного зварювання сильфонного компенсуючого елемента (*a*) і зовнішній вигляд одержаного зварного шва (*b*)

впливу на зварюваний метал ділянки $0-t_1$ відбувається утворення в ньому парогазового каналу, ділянка t_1-t_2 забезпечує його плавлення без інтенсивного випаровування, а ділянка

t_2-t_3 — утворення дрібнозернистої структури в зварному шві за рахунок створення умов зародження максимальної кількості центрів кристалізації та мінімізації лінійної швидкості росту кристалів. Для подрібнення кристалів, які починають рости в області зональних фазових переходів *ліквідус—солідус*, на ділянку t_2-t_3 заднього фронту імпульсу накладають частоту ультразвукового діапазону з відповідною амплітудою (рис. 1, б).

Приклад результату застосування запропонованого способу лазерного зварювання наведено на рис. 2 і рис. 3. На рис. 2 показано мікроструктуру шва (а) і колошовної зони (б), у разі зварювання хромистої нержавіючої сталі неперервним лазерним випромінюванням потужністю 57 Вт. На рис. 3 показано мікроструктуру шва (а) і колошовної зони (б), у разі зварювання тієї ж сталі імпульсним лазерним випромінюванням з частотою імпульсів 3000 Гц. Як видно з цих прикладів, імпульсна модуляція випромінювання дозволяє отримувати значно більш дрібнозернисту структуру металу шва та пришовної зони.

Для реалізації розробленого способу імпульсного лазерного зварювання було створено автоматизований комплекс для лазерного зварювання на базі волоконного лазера потужністю до 100 Вт. Обертання зварюваної деталі, переміщення зварювальної головки і зміна потужності лазерного випромінювання здійснюються на даному комплексі згідно з попередньо створеною програмою за допомогою системи ЧПУ. Зовнішній вигляд фрагмента цього комплексу показано на рис. 4. Апробація дії комплексу проводилася при виготовленні дослідної партії сильфонних компенсаторів (рис. 5). Виготовлені компенсатори пройшли тестові випробування, зокрема на герметичність і функціонування при підвищеному тиску. В результаті було доведено придатність розроблених технологій та обладнання для вирішення задачі виготовлення сильфонних компенсаторів.

На нашу думку, розроблена технологія лазерного зварювання кільцевих замкнених проріз-

них швів може розглядатися як сучасна заміна існуючих зварювальних технологій (наприклад, аргонодугової), що застосовуються для виготовлення сильфонних компенсаторів [8]. Очікується, що виготовлені із застосуванням розробленої технології лазерного імпульсного зварювання сильфонні компенсатори матимуть кращі експлуатаційні властивості та довший термін використання. Технологія та обладнання для зварювання компенсаторів впроваджені на підприємстві ТОВ «Науково-дослідний інформаційний центр "АРМАТОМ"» (м. Київ).

Таким чином, в процесі даної роботи було встановлено, що для виготовлення сильфонних компенсаторів доцільно застосовувати лазерне зварювання з імпульсною модуляцією випромінювання. Було розроблено відповідну технологію, яка дає можливість одержувати у литому металі швів і у ЗТВ дрібнозернисті структури, що мають підвищені механічні характеристики. Для реалізації розробленої технології було створено необхідне обладнання для лазерного зварювання сильфонних компенсуючих складок із нержавіючої сталі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Корчагин П.В. Аргонодуговая сварка деталей с большой разницей толщин из стали типа 18-8: Дис... к.т.н. по спец. 05.03.06 — технологии и машины сварочного производства / Корчагин П.В. // Тольятти, 2006. — 147 с.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Лазерная техника и технология // Лазерная сварка металлов: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. — М.: Высш. шк., 1988. — 207 с.
3. Волченко В.Н., Ямпольский В.М., Винокуров В.А. и др. Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр-ва» / Под ред. В.В. Фролова. — М.: Высш. шк., 1988. — 559 с.
4. Патент Российской Федерации №2120364: Способ импульсной лазерной сварки и установка для его осуществления / Каюков С.В., Гусев А.А., Самарцев Г.В., Канавин А.П.; МПК⁶ В23К26/00; 20.10.1998.
5. Патент Российской Федерации №2186667: Способ лазерной сварки металлов и сплавов / Басиев Т.Т., Федин А.В., Чашин Е.А., Шилов И.В., Ковровская государственная технологическая академия; МПК⁷ В23К26/20; 10.08.2002.

6. Патент Российской Федерации №2269401: Способ лазерной сварки металлов / Мышковец В.Н., Максименко А.В., Шалупаев С.В., Тучин А.Н., Юркевич С.Н., Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, 558 Авиационный ремонтный завод; МПК В23 К 26/20; 10.02.2006.
7. Корнеев Д.И., Фейгин О.О. Электрофизические методы управления кристаллизацией свариваемого металла [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/6302.html>.
8. Казаков Ю.В. Приспособления для сварки сильфонов на машинах МШП // Авиационная промышленность. — 1964. — № 4. — С. 95—96.

*В.Д. Шелягин, В.И. Луценко,
В.Ю. Хаскин, А.Г. Лукашенко, А.В. Бернацкий,
А.В. Сиора, И.В. Шуба*

РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ
И ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ТРУБНЫХ
КОМПЕНСИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДЛЯ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Установлено, что для изготовления сильфонных компенсаторов целесообразно применять лазерную сварку с импульсной модуляцией излучения. Разработан способ импульсной лазерной сварки нержавеющей и углеродистых сталей. Созданы технология и оборудование для

лазерной сварки сильфонных компенсирующих сборок из нержавеющей стали. Изготовленные с применением лазерной импульсной сварки сильфонные компенсаторы будут иметь улучшенные эксплуатационные свойства и более длительный срок эксплуатации.

Ключевые слова: сильфонные компенсаторы, лазерная сварка, импульсная модуляция излучения, мелкозернистые структуры, сварочный комплекс.

*V.D. Shelyagin, V.I. Lutcenko,
V.Yu. Khaskin, A.G. Lukashenko, A.V. Bernatckyi,
O.V. Siora, I.V. Shuba*

DEVELOPMENT OF EQUIPMENT
AND TECHNOLOGY OF AUTOMATED
LASER WELDING PIPE COMPENSATING
ELEMENTS FOR THE AEROSPACE INDUSTRY

It is established that application of laser welding with pulse-modulated radiation is expedient for the manufacture of expansion bellows. The method of pulsed laser welding of stainless and carbon steels is developed. The technology and equipment for laser-welded stainless steel expansion bellows are developed. Manufactured laser pulse welded expansion bellows will have improved operating properties and a longer lifespan.

Key words: expansion bellow, laser welding, radiation pulse modulation, fine-grained structure, welding set.

Стаття надійшла до редакції 15.03.12