

УДК 621.7

СОЗДАНИЕ ПЛОТНЫХ БЕЗДЕФЕКТНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

© 2013 С.П. Мурзин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 21.10.2013

Сварку металлических сплавов малых толщин целесообразно проводить импульсным лазерным излучением. Формирование сварного соединения с помощью полосового энергетического источника предоставляет возможность увеличить прочность соединения. При сварке жаростойких и жаропрочных сплавов на никелевой основе прочность сварного соединения повышается на 10...20 %, происходит растворение карбидов, литая зона имеет однородную структуру без пустот и раковин. Образуется плотное бездефектное сварное соединение.

Ключевые слова: сплав никелевый, соединение сварное, воздействие лазерное, импульс, плавление

ВВЕДЕНИЕ

В технологии производства двигателей летательных аппаратов одно из ведущих мест занимает электронно-лучевая сварка, объем использования которой по оценке, приведенной в работе [1], составляет до 25...30 % от общего объема применения сварки в авиационном двигателестроении. Вследствие возможности достижения высокой плотности мощности в пятне нагрева ($q \geq (2...5) \cdot 10^9$ Вт/м²), малого объема расплавленного металла, кратковременности теплового воздействия электронно-лучевая сварка обеспечивает незначительные деформации соединяемых деталей, что предоставляет значительные преимущества по сравнению с традиционными методами сварки плавлением [1, 2].

Обладая аналогичными технологическими возможностями по сравнению с электронно-лучевой, сварка непрерывным излучением с глубоким проплавлением имеет существенное преимущество – не требует обязательного наличия вакуумных камер. Поэтому практически отсутствуют ограничения на размеры свариваемых деталей, увеличивается производительность за счет снижения подготовительного времени на операцию. Однако с уменьшением размеров изделий возникают проблемы, связанные с удалением корневой дефектной части швов, из-за ее труднодоступности. Разработка технологий формирования сварных соединений, не требующих последующей механической обработки корня шва, является одной из задач в двигателестроении. Сварку металлических сплавов малых толщин (толщиной до 1 мм) целесообразно проводить импульсным лазерным излучением. Но при

Мурзин Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок. E-mail: murzin@ssau.ru

однокоординатной (линейной или круговой) контурно-лучевой обработке материалов импульсным излучением шаг размещения единичных зон, выбираемый наибольшим из условия обеспечения максимально достижимой производительности, не может превышать значения, при котором неравномерность по глубине ширины зоны термического воздействия влияет на прочность сварного соединения. При обработке зоны лазерного воздействия накладываются друг на друга, что вызывает непроизводительные потери энергии лазерных импульсов на повторный нагрев уже обработанных участков [3, 4 и др.]. Перераспределения плотности мощности при формировании сварного соединения лазерным излучением предоставляет возможность устранить такие дефекты, как углубления на поверхности, трещины, поры и др. [6-11]. Использование фокусаторов излучения позволяет проводить обработку областей требуемой геометрии [12-18].

Целью работы является разработка рекомендаций для создания плотных бездефектных сварных соединений жаростойких и жаропрочных сплавов на никелевой основе импульсным лазерным воздействием с перераспределением плотности мощности.

1. ОЦЕНОЧНЫЙ РАСЧЕТ КООРДИНАТ ГРАНИЦЫ ПЛАВЛЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Основной целью расчетов тепловых процессов лазерной сварки является определение температурного поля и координат границы плавления в заданный момент времени. В общем случае при расчете проводится анализ задач плавления под действием излучения и последующего затвердевания поверхностного слоя тел. Рассматривая

пространственные задачи теплопроводности для процессов лазерной сварки продолжительностью $\tau_{\text{и}} \approx 10^{-3}$ с, используют следующие допущения [3-5, 19-21 и др.]:

– для расчетов тепловых процессов сварки импульсным лазерным излучением используют среднее значение поглотительной способности A по соответствующему интервалу температур.

– пространственно-временная структура теплового источника от действия лазерного излучения представляется постоянным во времени импульсом, распределенным по поверхности материала;

– теплофизические характеристики каждого материала не зависят от температуры (усредняются в выбранном диапазоне значений температур), теплоотдачей с нагреваемых поверхностей α пренебрегают, учитывается удельная теплота плавления материалов L_m ;

– для проведения оценочных расчетов координат границы плавления при лазерной сварке считается, что в жидкой фазе устанавливается турбулентное течение, определяющее гидродинамический характер теплопередачи в расплаве, приводящий к его быстрому перемешиванию и выравниванию температуры до температуры плавления. Распределение температуры по жидкой фазе в этом случае считается неизменным и двухфазная задача сводится к однофазной задаче по определению температуры в твердой фазе с нелинейными граничными условиями. Положение границы фазового перехода определяется положением изотермы температуры плавления, учитывается удельная теплота плавления материала.

С учетом принятых допущений проведен оценочный расчет координат границы плавления при сварке встык пластин из сплава на никелевой основе ХН60ВТ толщиной $H_2 = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м. Расчет проводился для двух вариантов:

1. Гауссовский круговой энергетический источник: энергия импульса излучения $E_{\text{и}} = 8$ Дж; длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 3 \cdot 10^{-3}$ с;

$$q(x, y) = q_0 \exp \left[-\frac{(x^2 + y^2)}{r^2} \right] \text{ [Вт/м}^2 \text{]},$$

$$q_0 = 3,9251 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2; r = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$q(x, y) = 0 \text{ при } \sqrt{x^2 + y^2} \geq 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

2. Полосовой энергетический источник: энергия импульса излучения $E_{\text{и}} = 20$ Дж; длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 4 \cdot 10^{-3}$ с;

$$q(x, y) = q_0 (1,1513 \cdot 10^{-7} x^{-10} - 1,0036 \cdot 10^{-5} x^{-8} + 2,4962 \cdot 10^{-4} x^{-6} - 2,0921 \cdot 10^{-3} x^{-4} + 8,2705 \cdot 10^{-3} x^{-2} + 0,9969) \cdot (-1,3516 y^{-6} + 3,3895 y^{-4} - 3,0153 y^{-2} + 0,9966) \text{ [Вт/м}^2 \text{]}$$

$$\text{при } \bar{x} = \frac{x}{0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}}, \quad \bar{y} = \frac{y}{0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}};$$

$$q_0 = 4,4294 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2; x \in [-1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}];$$

$$y \in [-0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}].$$

Результаты расчета представлены на рис. 1.

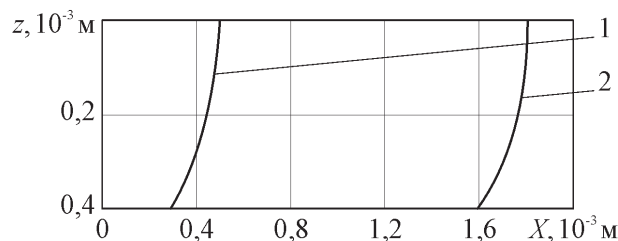


Рис. 1. Результаты расчета координат границы плавления в плоскости $y = 0$ (продольном сечении шва) при импульсной сварке встык пластин из сплава на никелевой основе ХН60ВТ толщиной $H_2 = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м:
1 – вариант 1; 2 – вариант 2

Полученные в результате расчета значения площадей плавления в плоскости $Y = 0$ для вариантов 1 и 2 составляют: $S_{Y_1} = 0,34 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; $S_{Y_2} = 1,38 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, а их отношение: $S_{Y_2}/S_{Y_1} = 4,06$. В плоскости $X = 0$ (поперечном сечении шва) площади плавления для вариантов 1 и 2 практически равны: $S_{X_1} \approx S_{X_2} = (0,34 \dots 0,38) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Таким образом, формирование сварного соединения с помощью полосового энергетического источника (вариант 2) предоставляет возможность увеличить площадь продольного сечения шва и, как следствие, прочность соединения. Сохраняется малая площадь поперечного сечения шва, которая является характерной особенностью лазерных сварных соединений, определяющей их основное преимущество – возможность получения ограниченных по ширине сварных швов с минимальной деформацией изделий.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СПЛАВЫ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

Проведены исследования влияния воздействия импульсного лазерного излучения на жаростойкие и жаропрочные сплавы на никелевой основе. Материал ХН70ЮШ применяется в двигателестроении при изготовлении для деталей камер сгорания и форсажных камер, работающих при незначительных напряжениях и температурах до 1370 К. Материал ХН60ВТ применяется при изготовлении жаровых труб, форсажных камер, экранов и других деталей, работающих длительно при температурах 1170-1270 К.

Оценка прочностных свойств соединений, выполненных импульсным лазерным излучением

с перераспределением плотности мощности, проводилась при статическом нагружении образцов из сплавов ХН60ВТ и ХН70ЮШ. Установлено, что при длительности импульса $\tau_{\text{и}} = 4 \cdot 10^{-3}$ с максимальная разрушающая нагрузка возрастает до значения $P = (8,2 \dots 8,6) \cdot 10^2$ Н. Зависимость усилия P разрушения сварного соединения от энергии $E_{\text{и}}$ излучения приведена рис. 2. Прочность сварного соединения повышается до значения $(600 \dots 635) \cdot 10^6$ Па, т.е. на 10...20 %.

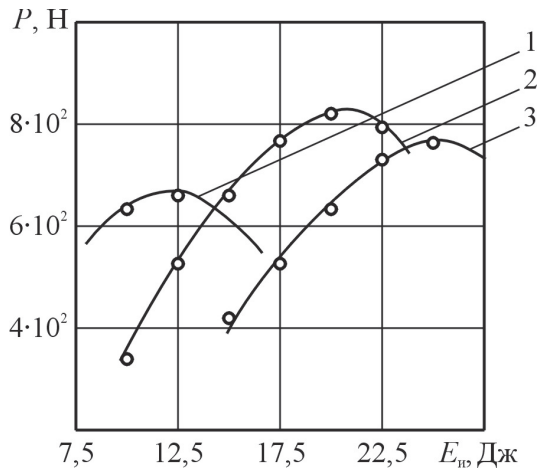


Рис. 2. Зависимость усилия P разрушения сварного соединения от энергии $E_{\text{и}}$ излучения:
 1 – длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 3 \cdot 10^{-3}$ с;
 2 – $\tau_{\text{и}} = 4 \cdot 10^{-3}$ с; 3 – $\tau_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$ с

На рис. 3 приведена структура металла шва в поперечном сечении зоны лазерной сварки жаростойкого и жаропрочного сплава на никелевой основе ХН60ВТ. По границам и внутри зерен сложного легированного твердого раствора в исходной структуре имеются включения карбидов. При лазерном плавлении происходит растворение карбидов, литая зона имеет однородную структуру

без пустот и раковин, что указывает на высокую работоспособность сварного соединения.

Для определения координат границы плавления при сварке встык пластин из сплава на никелевой основе ХН60ВТ толщиной $H_2 = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м проведены экспериментальные исследования для двух вариантов энергетического воздействия (рис. 3).

1. Близкий к гауссовскому круговому энергетический источник: $E_{\text{и}} = 8$ Дж, $\tau_{\text{и}} = 3 \cdot 10^{-3}$ с, $q_0 = 3,93 \cdot 10^9$ Вт/м²; $r = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

2. Полосовой энергетический источник: энергия импульса излучения $E_{\text{и}} = 20$ Дж; длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 4 \cdot 10^{-3}$ с. Параметры фокусатора и лазерного пучка: $f = 1$ м; $L_0 = 12 \cdot 10^{-3}$ м; $R = 25 \cdot 10^{-3}$ м; $r = 0,7R$; $\varphi = 0$; $R_{\phi} = r_{\phi} = 14 \cdot 10^{-3}$ м. Параметры фокального пятна: $L = 3,4 \cdot 10^{-3}$ м; $q_0 = 4,43 \cdot 10^9$ Вт/м².

Полученные в результате экспериментальных исследований значения площадей плавления в продольном сечении шва (плоскости $y = 0$) для вариантов 1 и 2 составляют: $S_{y1} = 0,3 \cdot 10^{-6}$ м²; $S_{y2} = 1,6 \cdot 10^{-6}$ м² (рис. 4), а их отношение: $S_{y2}/S_{y1} = 5,3$.

В поперечном сечении шва (плоскости $x = 0$) площади плавления для вариантов 1 и 2 практически равны: $S_{x1} \approx S_{x2} \approx 0,3 \cdot 10^{-6}$ м².

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что применение сварки импульсным лазерным излучением с перераспределением плотности мощности позволяет получить сварное соединение с развитой площадью продольного сечения. Площади поперечного сечения шва при воздействии гауссовского кругового и полосового энергетических источников практически равны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен оценочный расчет координат границы плавления при сварке встык пластин из

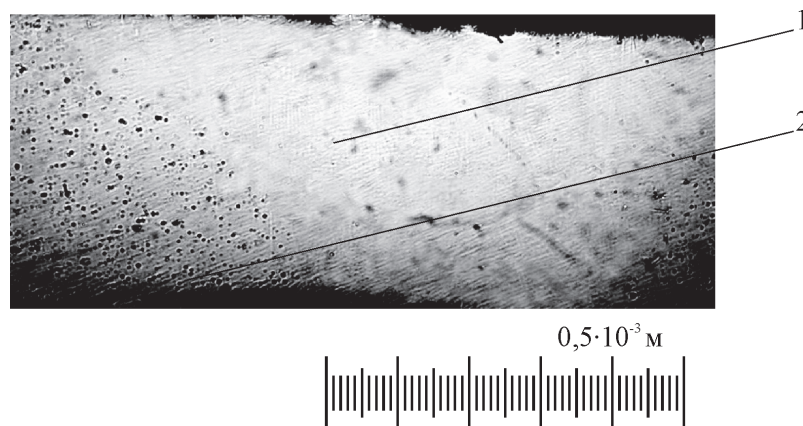


Рис. 3. Структура металла шва в поперечном сечении зоны лазерной сварки жаростойкого и жаропрочного сплава на никелевой основе ХН60ВТ:
 1 – область плавления; 2 – исходная структура

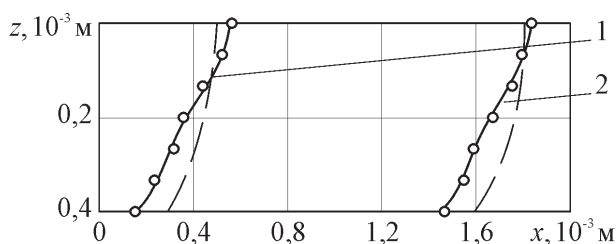


Рис. 4. Результаты расчета и экспериментального определения координат границы плавления в продольном сечении шва (плоскости $y = 0$) при импульсной сварке встык пластин из сплава на никелевой основе ХН60ВТ толщиной $H_2 = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м: 1 – вариант 1; 2 – вариант 2

сплава на никелевой основе ХН60ВТ толщиной $0,4 \cdot 10^{-3}$ м. Определено, что формирование сварного соединения с помощью полосового энергетического источника предоставляет возможность увеличить площадь продольного сечения шва и, как следствие, прочность соединения. Сохраняется малая площадь поперечного сечения шва, которая является характерной особенностью лазерных сварных соединений, определяющей их основное преимущество – возможность получения ограниченных по ширине сварных швов с минимальной деформацией изделий.

Оценка прочностных свойств соединений из жаростойких и жаропрочных сплавов на никелевой основе, выполненных импульсным лазерным излучением с перераспределением плотности мощности, проводилась при статическом нагружении образцов. Определена зависимость усилия разрушения сварного соединения от энергии излучения и длительности импульса. Установлено, что при длительности импульса $4 \cdot 10^{-3}$ с максимальная разрушающая нагрузка при проведении испытаний на статическую прочность сварной точки возрастает до значения $(8,2...8,6) \cdot 10^2$ Н. Прочность сварного соединения повышается до значения $(600...635) \cdot 10^6$ Па, т.е. на 10...20 %.

Выявлена структура металла шва в поперечном сечении зоны лазерной сварки жаростойкого и жаропрочного сплава на никелевой основе ХН60ВТ. По границам и внутри зерен сложного легированного твердого раствора в исходной структуре имеются включения карбидов. При лазерном плавлении происходит растворение карбидов, литая зона имеет однородную структуру без пустот и раковин, что указывает на высокую работоспособность сварного соединения. Проведенные экспериментальные исследования показывают, что применение сварки импульсным лазерным излучением с перераспределением плотности мощности позволяет получить сварное соединение с развитой площадью продольного

сечения. Разработаны рекомендации для создания плотных бездефектных сварных соединений жаростойких и жаропрочных сплавов на никелевой основе импульсным лазерным воздействием с перераспределением плотности мощности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009 – 2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев Ю.С., Бойцов А.Г., Крымов В.В., Хворостулин Л.А. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 2003. 512 с.
2. Аксенов В.И. Техническое перевооружение отрасли – основа для выпуска конкурентоспособной продукции // Авиационная промышленность. 1994. № 11-12. С. 40-53.
3. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки. Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
4. Vanas С.М., Batra P., Belforte D.A. et al. LIA handbook of laser materials processing. Ed. J.F. Ready. Orlando: Laser institute of America. Magnolia publishing, Inc., 2001. 715 p.
5. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоиздат, 1985. 207 с.
6. Мурзин С.П., Трегуб В.И., Осетров Е.Л., Никифоров А.М. Формирование нанопористых структур металлических материалов циклическим упруго-пластическим деформированием при лазерном воздействии // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12, № 4. С. 182-185.
7. Мурзин С.П. Разработка способов интенсификации формирования нанопористых структур металлических материалов селективной лазерной сублимацией компонентов сплавов // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 2. С. 175-179.
8. Мурзин С.П. Исследование механизмов формирования нанопористой структуры в многокомпонентной латуни при термоциклировании лазерным воздействием // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4-1. С. 270-274.
9. Murzin S.P., Kazanskiy N.L. Creation of metal materials nanoporous structures under the action of laser radiation // ALT Proceedings. 2012. Vol. 1. DOI: 10.12684/alt.1.43.
10. Murzin S.P. Exposure to laser radiation for creation of metal materials nanoporous structures // Optics & Laser Technology. 2013. Vol. 48. P. 509-512.
11. Мурзин С.П., Трегуб В.И., Шокова Е.В., Трегуб Н.В. Термоциклирование импульсно-периодическим лазерным воздействием для формирования нанопористой структуры в металлическом материале // Компьютерная оптика. 2013. Т. 37. № 1. С. 99-104.
12. Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Soifer V.A. A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas // Journal of Modern Optics. 1996. Vol. 43, № 7. P. 1423-1433.

13. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Мордасов В.И., Мурзин С.П., Харитонов С.И. Исследование оптических систем управления передачей высоких энергий // Компьютерная оптика. 2002. № 23. С. 40-43.
14. *Murzin S.P.* Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics // *Journal of Advanced Materials*. 2003. Vol. 10, № 2. P. 181-185.
15. *Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Клочков С.Ю.* Формирование требуемого энергетического воздействия при лазерной обработке материалов с применением фокусаторов излучения // Компьютерная оптика. 2005. № 28. С. 89-93.
16. *Мурзин С.П.* Оптические устройства формирования лазерных потоков // Вестник Самарского государственного университета. 2006. № 3-3. С. 154-159.
17. *Мурзин С.П., Клочков С.Ю.* Расчет пространственного распределения мощности лазерного излучения для формирования требуемого энергетического воздействия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2005. Т. 7. № 2. С. 483-488.
18. *Мурзин С.П., Осетров Е.Л.* Исследования температурных полей в конструкционной стали при воздействии лазерных потоков, сформированных фокусаторами излучения // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31. № 3. С. 59-62.
19. *Мурзин С.П., Артюшина В.И.* Формирование сварного соединения импульсным лазерным излучением с регулируемым пространственным распределением мощности // Известия Самарского научного центра РАН. 2006. Т. 8. № 2. С. 441-444.
20. *Мурзин С.П., Осетров Е.Л., Никифоров А.М.* Сварка жаропрочных и жаростойких сплавов на никелевой основе импульсным лазерным излучением // Известия Самарского научного центра РАН. 2008. Т. 10, № 3. С. 884-886.
21. *Мурзин С.П., Трегуб В.И., Никифоров А.М.* Повышение прочности сварных соединений при сварке сплавов на никелевой основе импульсным лазерным излучением // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. Т. 27, № 3-3. С. 338-342.

NICKEL ALLOYS DENSE DEFECTLESS WELDED JOINTS CREATION WITH PULSE LASER TREATMENT

© 2013 S.P. Murzin

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

Welding of low thickness metal alloys is effectually to conduct with pulsed laser radiation. Welded joint formation with line heat source provides possibility to increase joint strength. Welded joint strength increase by 10...20%, carbides dissolving, the melting zone having homogeneous structure without voids and cavities occur during high-temperature and heat-resistant nickel alloys welding. Dense defectless welded joint is formed.

Key words: nickel alloy, welded joint, exposure to laser, pulse, melting.