

УДК 621.7

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© 2011 С. П. Мурзин, В. И. Трегуб, А. М. Никифоров

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

В двигателестроении сварку металлических сплавов малых толщин целесообразно проводить импульсным лазерным излучением. Установлено, что формирование сварного соединения с помощью полосового энергетического источника предоставляет возможность увеличить площадь продольного сечения шва и, как следствие, 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, что указывает на высокую работоспособность сварного соединения.

Прочность, соединение сварное, сплав, основа никелевая, излучение лазерное, источник энергетический, импульс, воздействие, плавление, усилие разрушения.

Введение

Среди методов сварки, используемых в технологии производства двигателей летательных аппаратов, одно из ведущих мест занимает электронно-лучевая сварка, объём применения которой по оценке, приведённой в работе [1], составляет до 25...30 % от общего объёма применения сварки в авиационном двигателестроении. Благодаря возможности достижения высокой плотности мощности в пятне нагрева ($q \geq (2...5) \cdot 10^9$ Вт/м²), малому объёму расплавленного металла, кратковременности теплового воздействия электронно-лучевая сварка обеспечивает незначительные деформации соединяемых деталей и имеет значительные преимущества по сравнению с традиционными методами сварки плавлением [1, 2].

Сварка непрерывным излучением с глубоким проплавлением, обладая аналогичными технологическими возможностями, по сравнению с электронно-лучевой имеет существенное преимущество – не требует обязательного наличия вакуумных камер. В результате чего: 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 её труднодоступности. Таким образом, одной из задач в двигателестроении является разработка технологий формирования сварных соединений, не требующих последующей механической обработки корня шва. Так, сварку металлических сплавов малых

толщин (до 10^{-3} м) целесообразно проводить импульсным лазерным излучением. Однако при 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. В процессе обработки зоны лазерного воздействия накладываются друг на друга, что вызывает непроизводительные потери энергии лазерных импульсов на повторный нагрев уже обработанных участков [3, 4 и др.]. Регулирование распределения плотности мощности при формировании сварного соединения лазерным излучением предоставляет возможность устранить такие дефекты, как углубления на поверхности, трещины, поры и др. [5, 6]. Применение фокусаторов излучения позволяет проводить обработку областей требуемой геометрии [7-9].

Целью работы является разработка рекомендаций для повышения прочности сварных соединений при сварке сплавов на никелевой основе импульсным лазерным излучением с регулируемым распределением плотности мощности.

Оценочный расчёт координат границы плавления при сварке сплавов на никелевой основе импульсным лазерным излучением

При расчёте тепловых процессов лазерной сварки проводится анализ задач

плавления под действием излучения и последующего затвердевания поверхностного слоя тел. Основной целью расчётов является определение температурного поля и координат границы плавления в заданный момент времени. При рассмотрении пространственных задач теплопроводности для процессов лазерной сварки продолжительностью $\tau_n \approx 10^{-3}$ с используют следующие допущения [3-6, 10 и др.]:

– для проведения расчетов температурного поля при сварке импульсным лазерным излучением используют среднее значение поглощательной 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 учётом принятых допущений проведён оценочный расчет координат границы плавления при сварке встык пластин из сплава на никелевой основе ХН60ВТ толщиной $H_2 = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м. Расчёт проводился для двух вариантов:

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

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

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

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

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

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

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

$$q_0 = 4,4294 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2;$$

$$x \in [-1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}];$$

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

Результаты расчёта представлены на рис. 1.

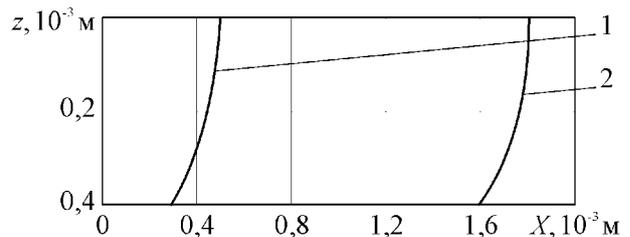


Рис. 1. Результаты расчёта координат границы плавления в плоскости $y = 0$ (продольном сечении шва) при импульсной сварке встык пластин из сплава на никелевой основе ХН60ВТ толщиной $H_2 = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м: 1 – вариант 1; 2 – вариант 2

Полученные в результате расчёта значения площадей плавления в плоскости $Y = 0$ для вариантов 1 и 2 составляют: $S_{Y1} = 0,34 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; $S_{Y2} = 1,38 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, а их отношение: $S_{Y2}/S_{Y1} = 4,06$. В плоскости $X = 0$ (поперечном сечении шва) площади плавления для вариантов 1 и 2 практически равны: $S_{X1} \approx S_{X2} = (0,34 \dots 0,38) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

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 по-

лучения ограниченных по ширине сварных швов с минимальной деформацией изделий.

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 регулируемым распределением 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 на рис. 2. Прочность сварного соединения повышается до значения $(600 \dots 635) \cdot 10^6$ Па, т.е. на 10...20 %.

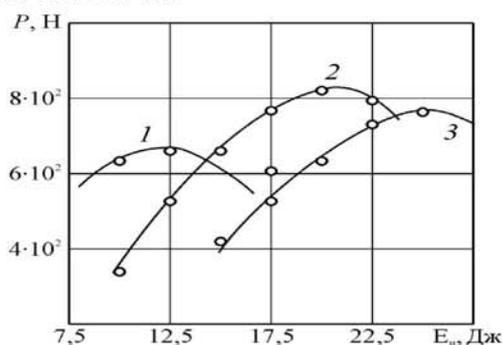


Рис. 2. Зависимость усилия P разрушения сварного соединения от энергии $E_{\text{и}}$ излучения:

$\tau_{\text{и}} = 3 \cdot 10^{-3}$ с (1); $4 \cdot 10^{-3}$ с (2); $5 \cdot 10^{-3}$ с (3)

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 зёрен сложнолегированного твёрдого 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.

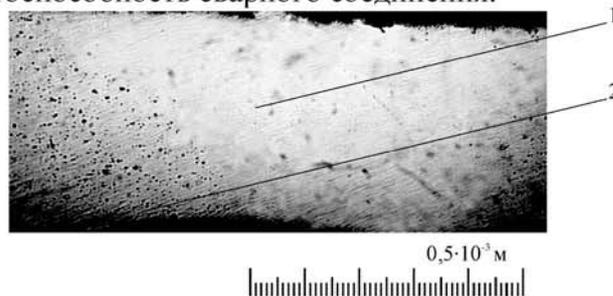


Рис. 3. Структура металла шва в поперечном сечении зоны лазерной сварки жаростойкого и жаропрочного сплава на никелевой основе ХН60ВТ:

1 – область плавления; 2 – исходная структура

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:

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; $r = 0,7R$; $\varphi = 0$; $R_{\varphi} = r_{\varphi} = 14 \cdot 10^{-3}$ 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.

Проведённые экспериментальные исследования показывают, что применение сварки импульсным лазерным излучением с регулируемым распределением 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.

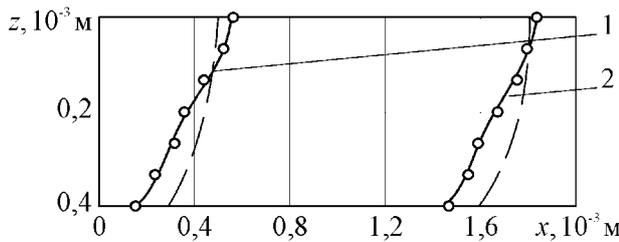


Рис. 4. Результаты расчёта и экспериментального определения координат границы плавления в продольном сечении шва (плоскости $y = 0$) при импульсной сварке встык пластин из сплава на никелевой основе ХН60ВТ толщиной $H_2 = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м:
1 вариант 1; 2 вариант 2

Заключение

Основной целью расчётов тепловых процессов лазерной сварки является определение температурного поля и координат границы плавления в заданный момент времени. Проведён оценочный расчёт координат границы плавления при сварке встык пластин из сплава на никелевой основе ХН60ВТ толщиной $0,4 \cdot 10^{-3}$ м. Установлено, 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 регулируемым распределением 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 $(8,2 \dots 8,6) \cdot 10^2$ Н. Прочность сварного соединения повышается до значения $(600 \dots 635) \cdot 10^6$ Па, т.е. на 10...20 %.

Выявлена структура металла шва в поперечном сечении зоны лазерной сварки жаростойкого и жаропрочного сплава на нике-

левой основе ХН60ВТ. По границам и внутри зерен сложнолегированного твёрдого 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 регулируемым распределением плотности мощности позволяет получить сварное соединение с развитой площадью продольного сечения.

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

Библиографический список

1. Елисеев, Ю.С. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / Ю.С. Елисеев, А.Г. Бойцов, В.В. Крымов [и др.] - М.: Машиностроение, 2003. - 512 с.
2. Аксенов, В.И. Техническое перевооружение отрасли – основа для выпуска конкурентоспособной продукции [Текст] / В.И. Аксенов // Авиационная промышленность. 1994. - № 11–12. - С. 40–53.
3. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки [Текст] / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров: под ред. А.Г. Григорьянца. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. - 664 с.
4. Banas, C.M. LIA handbook of laser materials processing [Text] / C.M. Banas, P. Batra, D.A. Belforte; ed. J.F. Ready. - Orlando: Laser institute of America. Magnolia publishing, Inc., 2001. - 715 p.
5. Мурзин, С.П. Формирование сварного соединения импульсным лазерным излучением с регулируемым пространственным распределением мощности [Текст] / С.П. Мурзин, В.И. Артюшина // Изв. Самар. науч. центра Российской академии наук. - 2006. -Т. 8, -№ 2. - С. 441-444.
6. Мурзин, С.П. Сварка жаропрочных и жаростойких сплавов на никелевой основе импульсным лазерным излучением [Текст] / С.П. Мурзин, Е.Л. Осетров, А.М. Никифоров // Изв. Самар. науч. центра Российской академии наук. - 2008. - Т.10, - №3. - С.884-886.
7. Исследование оптических систем управления передачей высоких энергий [Текст] / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский,

В.И. Мордасов [и др.] // Компьютерная оптика. - 2002. - № 23. - С. 40-43.

8. Мурзин, С.П. Оптические устройства формирования лазерных потоков [Текст] / С.П. Мурзин // Вестн. Самар. гос. ун-та. 2006. - № 3-3. - С. 154-159.

9. Мурзин, С.П. Исследования температурных полей в конструкционной стали при

воздействии лазерных потоков, сформированных фокусаторами излучения [Текст] / С.П. Мурзин, Е.Л. Осетров // Компьютерная оптика. - 2007. - Т.31, - №3. -С. 59-62.

10. Веденов, А.А. Физические процессы при лазерной обработке материалов [Текст] / А.А. Веденов, Г.Г. Гладуш. - М.: Энергоиздат, 1985. - 207 с.

INCREASE OF WELDED JOINTS STRENGTH AT WELDING NICKEL-BASED ALLOYS BY PULSE LASER INFLUENCE

© 2011 S. P. Murzin, V. I. Tregub, A. M. Nikiforov

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

In the propulsion engineering it's expedient to spend welding of small thickness metal alloys by pulse laser radiation. It's established that formation of welded joint with strip power source gives possibility to increase the weld cross-section area and, as consequence, joint strength. At welding of high-temperature and heat-resistant nickel-based alloys {superalloys} strength of welded joint raises on 10...20 %. Carbides were dissolved, the cast zone has homogeneous structure without emptiness and blisters that specifies in high workability of welded joint.

Strength, welded joints, alloy, laser radiation, power source, pulse, influence, melting, stress fracture.

Информация об авторах

Мурзин Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-61. E-mail: murzin@ssau.ru. Область научных интересов: лазерные технологии и нанотехнологии, лазерная физика и оптика.

Трегуб Валерий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и авиаматериаловедения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-61. E-mail: tvi_v@rambler.ru. Область научных интересов: лазерные технологии, материаловедение.

Никифоров Аркадий Михайлович, учебный мастер кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-61. E-mail: murzin@ssau.ru. Область научных интересов: внедрение лазерных технологий в учебный процесс.

Murzin Serguei Petrovich, Doctor of Engineering science, the professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: murzin@ssau.ru. Phone: (846) 267-46-61. Area of research: laser technology and nanotechnology, laser physics and optic.

Tregub Valery Ivanovich, Candidate of Engineering science, the associate professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: tvi_v@rambler.ru. Phone: (846) 267-46-61. Area of research: laser technology, science of materials.

Nikiforov Arkady Mikhailovich, the educational master, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-61. E-mail: murzin@ssau.ru. Area of research: introduction of laser technologies in educational process.