

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕЦИФИКИ
ПРОГРЕВА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ДВУХСТОРОННЕЙ СВАРКЕ
СТАЛИ X19H6Г9AM2**

И. В. Ушаков^{1,2}, А. Ю. Батомункуев²

*Кафедра «Автоматика и компьютерные системы управления»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), г. Тамбов, Россия; кафедра физики, ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (2),
г. Москва, Россия; ushakoviv@mail.ru*

Ключевые слова: компьютерное моделирование; лазерная сварка; лазерный прогрев материала; сталь.

Аннотация: Представлена технология лазерной сварки металлов, развивающаяся по нескольким направлениям: повышается качество сварного соединения, коэффициент полезного действия, разрабатываются технологии селективной лазерной обработки и пр. Совершенствование технологий лазерной сварки требует выявления и уточнения специфики прогрева материала методом компьютерного моделирования при сваривании двух стальных образцов. Предложенная модель позволяет рассчитывать распределение температур внутри свариваемой стали с учетом параметров лазерного излучения, свойств обрабатываемого материала, а также геометрических характеристик свариваемых образцов и других технологических параметров. Результаты моделирования специфики лазерного нагрева массивных стальных образцов согласуются с экспериментальными данными. Отмечено, что использование лазера для реализации «традиционной» сварки не позволяет полностью использовать потенциал лазерного излучения и в настоящее время существует возможность повышения качества сварного соединения за счет дополнительной селективной лазерной обработки материала.

Введение

Существуют различные методики сварки металлов. Перспективной и динамично развивающейся технологией является лазерная сварка [1 – 3]. К ее преимуществам относятся: бесконтактность, возможность обработки сложных геометрических поверхностей и варьирования размеров области воздействия, при которых достигаются сверхвысокие скорости нагрева и охлаждения, а также высокая степень локализации.

Эффективность и удобство использования лазера при сварке очевидны. Существует возможность регулирования подаваемой энергии в широком диапазоне, что позволяет производить сварку широкого спектра материалов и получать высококачественные сварные соединения. Существующие методы управления лазерным лучом позволяют достигать труднодоступных мест и участков [2 – 4].

Несмотря на несколько десятилетий развития лазерных технологий сварки, существует большой потенциал развития и совершенствования технологий лазерной обработки материалов. Следует реализовать специфические возможности

лазерной обработки, связанные с возможностью управления структурой и свойствами поверхности [5], в том числе за счет избирательного воздействия и одновременного подбора режимов обработки и контроля над процессом сварки. Для решения задачи по подбору режимов обработки необходимо проведение компьютерного моделирования.

Выявление специфики теплового режима имеет огромное значение [1 – 3, 6 – 8]. Длительное пребывание обрабатываемого материала или его части при высоких температурах может запускать процессы изменения структурного состояния. На структурное состояние материала большое влияние оказывает скорость охлаждения. При высоких скоростях охлаждения возможна закалка материала, лазерная аморфизация поверхности. Особенность лазерного излучения позволяет подбирать и комбинировать различные тепловые режимы, добиваясь оптимальных условий обработки и избирательного воздействия излучения на материал [5, 9].

В данной работе поставлены следующие цели: компьютерное моделирование специфики нагрева и охлаждения при лазерной сварке стали X19H6Г9АМ2; верификация теоретических результатов за счет сопоставления результатов моделирования и экспериментальных данных; обсуждение возможности селективной лазерной обработки сварного соединения.

Основные положения компьютерной модели

Компьютерная модель лазерной сварки создавалась на основе модели лазерного нагрева тонких пленок аморфно-нанокристаллических металлических сплавов [5, 9]. В ходе разработки компьютерной модели использовали физические характеристики стали X19H6Г9АМ2: температура плавления $T_{пл} = 1683$ К; температура начала плавления отдельных компонентов $T_{сол} = 1623$ К; плотность стали $\rho = (7815 \pm 20)$ кг/м³; коэффициент термического расширения (в интервале 293...1473 К) $\alpha_T = (36 \pm 1) \cdot 10^{-6}$ К⁻¹; теплоемкость $C_v = (590 \pm 20)$ Дж/(кг·К); температуропроводность (в интервале 298...373 °С) $\delta = 12$ мм²/с.

В модель заложены следующие геометрические параметры образцов: линейные размеры образца (стальной лист): 3,0×125×250 мм, включая специальную форму в области стыка образцов, для облегчения последующей сварки (рис. 1). Для того чтобы получаемые данные могли быть использованы на стальных листах с линейными размерами 3,0×1250×2500 мм (ГОСТ 19904–90) в модели предусмотрена возможность определять теплоотвод от границ образцов. В качестве источника излучения принят оптический квантовый генератор – волоконный лазер фирмы IPG мощностью 2,2 кВт. Указанная мощность лазера используется в модели как выходная мощность. Для защиты от окружающей среды используется газ – аргон. Диаметр луча 0,3 мм, фокусное расстояние линзы 200 мм, но фокус приподнят над обрабатываемой поверхностью на 3 мм. Лазерная обработка проводится в два этапа: обработка верхнего и нижнего стыков. Площади воздействия лазерного пучка $S = 0,071 \cdot 10^{-6}$ м²; длина шва $l = 125$ мм; скорость обработки $v = 1,9$ м/мин, соответственно время одного прохода шва составляет $\tau_1 = 3,91$ с, отсюда время обработки обрабатываемого лазером участка стыка $\tau_c = 0,01$ с.

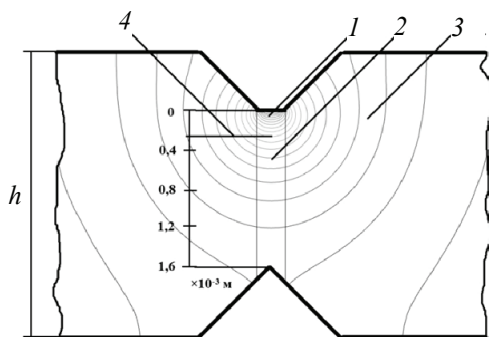


Рис. 1. Распределение изотерм в образце:
 1 – зона расплава; 2 – зона свариваемого шва;
 3 – образец; 4 – глубина проникновения
 изотермы 1500 К; h – толщина образца

используется газ – аргон. Диаметр луча 0,3 мм, фокусное расстояние линзы 200 мм, но фокус приподнят над обрабатываемой поверхностью на 3 мм. Лазерная обработка проводится в два этапа: обработка верхнего и нижнего стыков. Площади воздействия лазерного пучка $S = 0,071 \cdot 10^{-6}$ м²; длина шва $l = 125$ мм; скорость обработки $v = 1,9$ м/мин, соответственно время одного прохода шва составляет $\tau_1 = 3,91$ с, отсюда время обработки обрабатываемого лазером участка стыка $\tau_c = 0,01$ с.

Разработанная модель дает возможность рассчитать распределение температур внутри свариваемого металла с учетом мощности поглощаемого излучения, свойств самого материала, геометрических характеристик обрабатываемого образца и технологических параметров: скорости движения лазерного пучка, облучаемой площади, наличия засыпки – стружки. Результаты эксперимента по свариванию стали, с указанными выше параметрами, показали удовлетворительную свариваемость стальных образцов.

Для корректной интерпретации процессов, проходящих в образце, необходимо оценить особенности прогрева материала. Данную задачу решали численными методами, используя уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_v T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды, кг/м³; c_v – теплоемкость среды при постоянном объеме V , Дж/(кг·К); t – время, с; x, y, z – координаты; $T = T(x, y, z)$ – температура, К; λ – коэффициент теплопроводности; $F = F(x, y, z)$ – заданная плотность тепловых источников. Величины ρ, c_v зависят от координат и температуры.

На поверхности расплавленного материала происходят процессы лазерного испарения вещества. Однако нагретый до высоких температур газ/плазма не оказывает непосредственного влияния на специфику прогрева материала. В определенных условиях нагрев материала может осуществляться не лазерным излучением, а за счет плазменного факела.

Результаты и обсуждение

В результате решения уравнения (1) численными методами установлен характер прогрева образца. Рассматривается поперечное сечение свариваемого шва и учитывается узкая полоска стружки, используемая для увеличения площади контакта. В модели это отражено в виде специальной области в зоне расплава (см. рис. 1). Достижение предплавильного состояния оценивалось по достижению материалом температуры 1500 К.

Важным аспектом сваривания образца будем считать глубину прогрева (рис. 2). Для анализа результатов моделирования необходимо определить: среднюю температуру вблизи свариваемого шва (область с диаметром 6 мм); глубину проникновения изотермы, имеющей температуру солидус (температура плавления всех легких компонентов расплава); глубину проникновения изотермы с температурой 1650 К; глубину проникновения изотермы с температурой 1300 К; глубину проникновения изотермы с температурой 1500 К (переход от γ к δ , данный процесс может иметь специфику при быстрых процессах нагрева и охлаждения, а также в условиях воздействия термических напряжений); глубину проникновения изотермы с температурой 1710 К (на 25...30 К выше температуры плавления данной стали, таким образом учитывали перегрев, необходимый при высоких скоростях нагрева).

В результате моделирования получены распределения изотерм, показанные на рис. 1 и 2. На рисунке 1 изображена схема образцов в поперечном разрезе шва сварки с распределением изотерм. В зависимости от глубины проникновения определенных изотерм можно определить и оценить зону расплавления и размягчения материала.

Облучаемая зона сварного стыка имеет ширину 300 мкм. При этом зона сварного шва ожидаемо получается больше и составляет от 370 до 780 мкм, в зависимости от глубины на которой был проведен замер. В целом это коррелирует

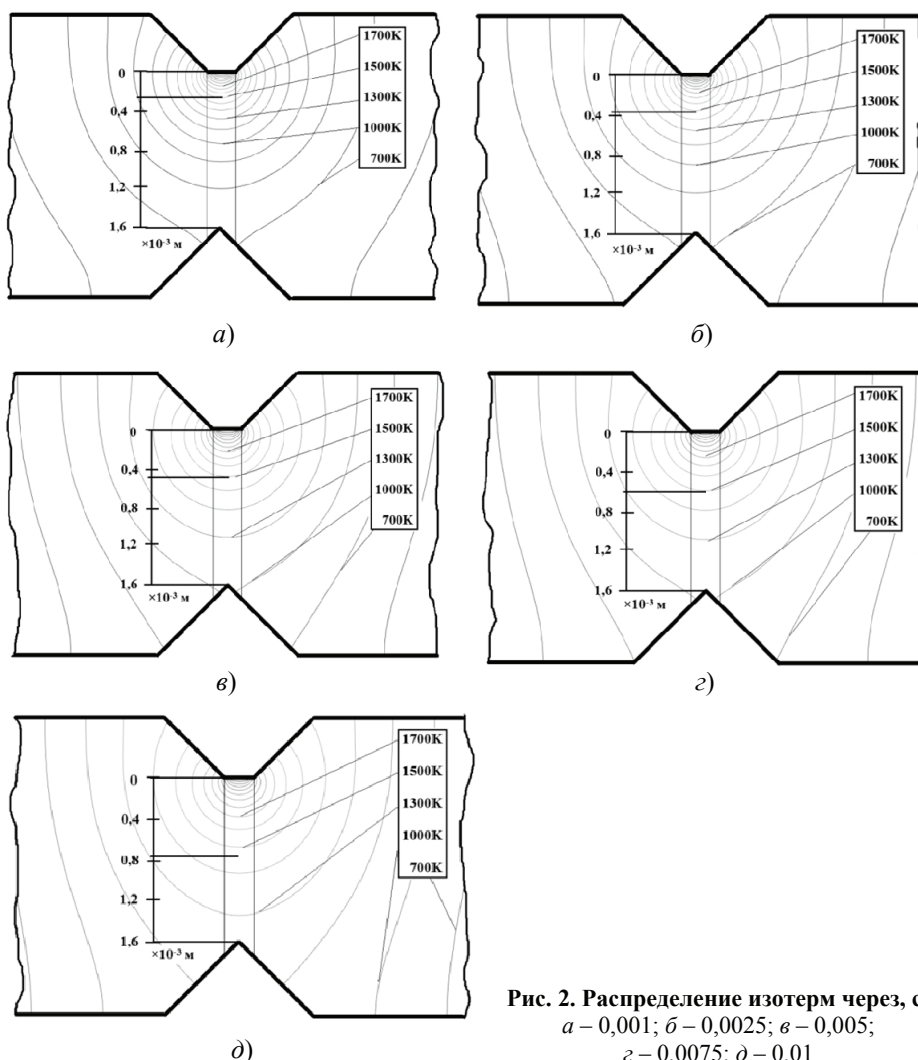


Рис. 2. Распределение изотерм через, с:
a – 0,001; *б* – 0,0025; *в* – 0,005;
г – 0,0075; *д* – 0,01

с распределением изотерм (см. рис. 2). Рассмотрены особенности распределения изотерм в образце в следующие моменты времени: 0,001; 0,0025; 0,005; 0,0075; 0,01 с. Отметим, что 0,01 с – полное время нагрева выбранной области лазерным излучением.

При сварке стали изотерма, соответствующая температуре 1500 К достигает глубины $(0,7...0,9) \times 10^{-3}$ м, что является примерно половиной глубины сварного стыка (табл. 1). При обработке с противоположной стороны стыка появляется возможность полной сварки образца.

Результаты моделирования должны сильно зависеть от начальных условий, которые определяются характеристиками лазерного излучения: длиной волны, особенностями импульса (для импульсных лазеров), распределением интенсивности по площади пучка, а также характеристиками области расплава на поверхности материала.

Практическим критерием достаточности времени нагрева для сваривания стали часто служит оплавление поверхности. В данной работе приведены распределения температур при таком режиме нагрева, когда на поверхности достигается температура 1710 К. Однако в момент достижения указанной температуры внут-

Таблица 1

Распределение изотерм по глубине образца в зависимости от времени

Изотермы, К	Время, с				
	0,001	0,0025	0,005	0,0075	0,01
	Глубина, $\times 10^{-3}$ м				
1700	0,21	0,22	0,23	0,27	0,34
1500	0,35	0,38	0,49	0,59	0,78
1300	0,39	0,52	0,81	1,15	1,34
1000	0,76	1,21	1,60	1,60	1,60
500	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60

ренние слои образца прогреты недостаточно для формирования качественного сварного соединения (рис. 3, табл. 2).

На рисунке 4 приведено распределение температур в образце через 0,01 с, для случая нагрева поверхности до 1710 К. Так как на практике толщина свариваемых листов может быть иной, то было проведено моделирование особенностей прогрева образцов существенно большей толщины. В качестве примера ниже приведены результаты для толщины листа 13 мм. При сохранении условий лазерного сваривания: скорость прохода 1,9 м/мин, выходная мощность 2,2 кВт, необходимый прогрев не достигается без предварительного подогрева образца (табл. 3).

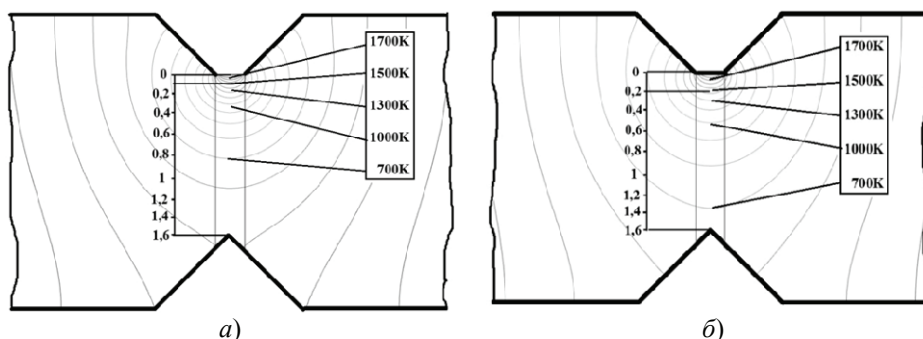


Рис. 3. Распределение изотерм при однократной обработке лазерным излучением одной зоны по времени, с:

а – 0,005 после начала импульса; б – 0,01

Таблица 2

Динамики прогрева образца при температуре поверхностного расплава 1710 К

Изотермы, К	Время, с	
	0,005	0,01
	Глубина, $\times 10^{-3}$ м	
1700	0,04	0,07
1500	0,11	0,21
1300	0,23	0,43
1000	0,41	0,56
500	1,60	1,60

Распределение изотерм по глубине образца при различных температурах предварительного прогрева

Изотермы, К	Температура предварительного прогрева, К					
	300	500	700	900	1100	1300
	Глубина, $\times 10^{-3}$ м					
1700	0,34	0,38	0,46	0,62	0,74	1,43
1500	0,57	0,59	0,83	1,07	1,43	2,61
1300	0,72	0,94	1,31	2,62	2,82	5,5
1000	0,96	1,62	2,51	5,09	5,5	5,5
500	2,89	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5

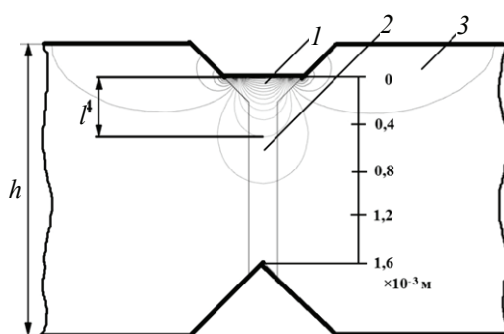


Рис. 4. Распределение изотерм в образце через 0,1 с после начала обработки:

1 – зона расплава; 2 – зона сварного стыка, прогреваемая до 1300 К; 3 – образец; l – глубина проникновения изотерм 1650 К; $h = 3$ мм

Учитывая, что сваривание происходит при условии проникновения изотермы 1500 К до 0,5 глубины образца, можно выделить необходимость предварительного прогрева образца до температур ≈ 1300 К. Данный подогрев также может быть выполнен лазерным излучением при подготовке образца к сварке.

На основании полученных результатов, следует вывод, что температурный режим лазерно-обрабатываемого образца, в целом, схож с температурным режимом металлических образцов свариваемых по традиционной технологии.

В результате лазерной сварки при данном температурном режиме следует ожидать получение сварного шва с необходимыми механическими характеристиками. Однако использование лазера для реализации «традиционной сварки» не позволяет полностью использовать потенциал лазерного излучения. Известно, что в сварных швах и их окрестностях могут формироваться поля механических напряжений, кроме того, по сварным швам могут протекать коррозионные процессы. Существует возможность повышения качества сварного соединения за счет использования дополнительной лазерной обработки. В случае аморфизации поверхности лазерным излучением, возможно увеличить ее коррозионную стойкость. Дополнительная селективная лазерная обработка материала [9] позволяет существенно повысить комплекс механических свойств поверхности. Селективная лазерная обработка достаточно эффективна только для поверхностного слоя материала [10], однако она может быть эффективно использована, если требуется сформировать особо прочный тонкий поверхностный слой.

Выводы

1. Результаты компьютерного моделирования согласуются с теоретически ожидаемыми результатами и верифицированы экспериментальными результатами. Таким образом, предложенная модель может быть использована при выявлении специфики лазерного нагрева стальных образцов.

2. С учетом распределения температур, поверхностного плавления, двухсторонней обработки и других факторов можно считать, что качественное сваривание стали X19H6Г9AM2 происходит при условии проникновения изотермы 1500 К не менее чем на половину толщины образца.

3. Температурный режим лазерно-обрабатываемого образца в целом схож с температурным режимом металлических образцов свариваемых по традиционной технологии. Однако использование лазера для реализации «традиционной» сварки не позволяет полностью использовать потенциал лазерного излучения. Существует возможность повышения качества сварного соединения за счет дополнительной селективной лазерной обработки материала.

4. В зависимости от толщины свариваемого стыка может быть необходим предварительный подогрев образца. Например, при скорости прохода 1,9 м/мин и выходной мощности лазера 2,2 кВт необходим предварительный подогрев до 1300 К материала вблизи сварного соединения. В начале обработки такой подогрев может быть выполнен за счет лазерного разогрева материала расфокусированным излучением. Во время обработки, при небольших размерах образца, материал может прогреться за счет перераспределения энергии от области сварного соединения.

Экспериментальные результаты получены с участием сотрудников НИТУ «МИСиС» Д. Г. Данкина, И. В. Смартыгиной, Д. Е. Капуткина.

Сварка выполнена специалистами кафедры МТ-12 «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (RFMEFI57514X0071).

Список литературы

1. Басов, Н. Г. Лазеры на конденсированных и сжатых газах / Н. Г. Басов, В. А. Данилычев // Успехи физ. наук. – 1986. – Т. 148, № 1. – С. 55 – 100.
2. Шиганов, И. Н. Лазерная сварка современных конструкционных материалов / И. Н. Шиганов, С. В. Шахов // Сварка Урала. – 2003. – С. 17 – 28.
3. Шиганов, И. Н. Влияние скорости лазерной сварки на структуру и свойства алюминиевых сплавов, легированных литием и скандием / И. Н. Шиганов, С. В. Шахов, Л. В. Тарасенко // Технология машиностроения. – 2004. – № 10. – С. 23 – 28.
4. Особенности формирования плазменного факела при гибридной лазерно-дуговой сварке / Г. А. Туричин [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 2006. – Т. 44, № 5. – С. 655 – 663.
5. Ушаков, И. В. Компьютерное моделирование специфики заживления трещин в нанокристаллическом металлическом сплаве под действием наносекундных лазерных импульсов / И. В. Ушаков, А. Ю. Батомункуев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 356 – 364.
6. Туричин, Г. А. Компьютерный анализ процессов лучевой обработки материалов : система моделирования LaserCAD / Г. А. Туричин, А. М. Григорьев, И. А. Цибульский // Фотоника. – 2006. – № 6. – С. 18 – 21.
7. Старцев, В. Н. Исследование характеристик столба дуги при лазерно-дуговой сварке на основе численного моделирования / В. Н. Старцев, Д. П. Мартыненко, А. Ф. Леонов // Теплофизика высоких температур. – 2000. – Т. 38, № 1. – С. 33 – 38.
8. Математическое моделирование лазерной и электронно-лучевой сварки / Г. А. Туричин [и др.] // Инновац. наукоемкие технологии: тр. Росс. науч.-техн. конф. – 1995. – Т. 6. – С. 98 – 107.

9. Ушаков, И. В. Экспериментальное определение коэффициента вязкости микроразрушения тонких пленок многокомпонентных аморфно-нанокристаллических металлических сплавов методом локального нагружения / И. В. Ушаков, А. Ю. Батомункуев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 142 – 149.

10. Ушаков, И. В. Влияние лазерной обработки на микротвердость и особенности разрушения тонких лент аморфно-нанокристаллического металлического сплава / И. В. Ушаков, И. С. Сафронов // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 2. – С. 11 – 15.

Computer Simulation of The Double-Sided Laser Heating when Welding X19H6Г9AM2 Steel

I. V. Ushakov^{1,2}, A. Yu. Batomunkuev²

*Department "Automation and Computer Control Systems", TSTU (1), Tambov, Russia;
Department of Physics, National University of Science and Technology "MISIS" (2),
Moscow, Russia; ushakoviv@mail.ru*

Keywords: computer simulation; laser heating of material; laser welding; steel.

Abstract: The paper describes the technology of laser welding of metals developing in several directions: improvement of the weld quality and efficiency, development of the technology of selective laser treatment, etc. Improvement of technologies of laser welding requires identification and investigation of material heating. In the present work, the regularities of material heating during welding of two steel samples are investigated by the method of computer modeling. The discussed model allows calculating the temperature distribution inside the weld metal. The model takes into account the power of laser radiation, the properties of the treated material, geometrical characteristics of the welded samples and other technological parameters. The simulation results of laser heating of massive steel samples are consistent with the experimental data. The usage of laser radiation for the realization of "traditional welding" prevents full implementation of laser radiation potential. There is a possibility of improving the quality of welding by additional selective laser material treatment.

References

1. Basov N.G., Danilychev V.A. [Lasers condensed and compressed gases], *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi], 1986, vol. 148, no. 1, pp. 55-100. (In Russ.)
2. Shiganov I.N., Shakhov C.B. [Laser welding of advanced structural materials], *Svarka Urala* [Ural Welding], 2003, pp. 17-28. (In Russ.)
3. Shiganov I.N., Shakhov C.B., Tarasenko L.V. [Influence of laser welding speed on the structure and properties of aluminum alloys doped with lithium and scandium], *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Tekhnologiya Mashinostroeniya], 2004, no. 10, pp. 23-28. (In Russ.)
4. Turichin G.A., Grigor"ev A.M., Zemlyakov E.V., Valdaitseva E.A., Diltei U., Gumenyuk A. [Special features of formation of plasma torch under conditions of hybrid laser-arc welding], *Teplofizika vysokikh temperature* [High Temperature], 2006. vol. 44, no. 5, pp. 655-663. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Ushakov I.V., Batomunkuev A.Yu. [Computer Simulation of Cracks Healing in Nanocrystalline Alloy after Nanosecond Laser Impulse Treatment], *Transactions of*

Tambov State Technical University, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 356-364. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Turichin G.A., Grigor'ev A.M., Tsibul'skii I.A. [Computer analysis of radiation processing of materials: modeling system LaserCAD], *Fotonika* [Photonics], 2006, no. 6, pp. 18-21. (In Russ.)

7. Startsev V.H., Martynenko D.P., Leonov A.F. [Research arc column characteristics in laser-arc welding on the basis of numerical modeling], *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature], 2000, vol. 38, no. 1, pp. 33-38. (In Russ.)

8. Turichin G.A., Lopota V.A., Il'in S.A., Valdaitseva E.A. [Mathematical modeling of laser and electron beam welding], *Innovatsionnye naukoemkie tekhnologii: Trudy Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Innovative high-end technologies: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference], 1995, vol. 6, pp. 98-107. (In Russ.)

9. Ushakov I.V., Batomunkuev A.Yu. [Experimental Calculation of Viscosity Parameter of Thin Film Microrupture for Multi-Component Amorphous-Nanocrystalline Metallic Alloys by the Local Stress Method], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 142-149. doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.142-149 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Ushakov I.V., Safronov I.S. [Effects of laser treatment on microhardness and peculiarities of fracture of metal alloy thin tapes with amorphous/nanocrystalline structure], *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 2013, no. 2, pp. 11-15. (In Russ., abstract in Eng.)

Computermodellierung der Besonderheit des Warmlaufens beim zweiseitigen Laserschweißen des Stahls X19H6Г9AM2

Zusammenfassung: Es ist die nach einigen Richtungen sich entwickelnde Technologie des Laserschweißens der Metalle dargelegt: es wird die Qualität der geschweißten Vereinigung, den Wirkungsgrad erhöht, es werden die Technologien der selektiven Laserbearbeitung entwickelt u.a. Die Vervollkommnung der Technologien des Laserschweißens fordert die Aufspürung und die Präzisierung der Besonderheit des Warmlaufens des Materials von der Methode der Computermodellierung. Das angebotene Modell lässt zu, die Verteilung der Temperaturen innerhalb des geschweißten Stahls unter Berücksichtigung der Parameter der Laserausstrahlung, der Eigenschaften des bearbeiteten Materials, sowie der geometrischen Charakteristiken der geschweißten Muster und anderer technologischer Parameter zu rechnen. Die Ergebnisse der Modellierung der Besonderheit der Lasererwärmung der massiven Stahlmuster werden mit den experimentalen Daten übereinstimmen. Es ist bemerkt, dass die Nutzung des Lasers für die Realisierung „des traditionellen Schweißens“ vollständig nicht zulässt, das Potential der Laserausstrahlung und zu verwenden und es existiert zur Zeit die Möglichkeit der Erhöhung der Qualität der geschweißten Vereinigung auf Rechnung von der zusätzlichen selektiven Laserbearbeitung des Materials.

Modélisation informatique de la spécificité du chauffage lors de la soudure à laser recto-verso de l'acier X19H6Г9AM2

Résumé: Est présentée la technologie du soudage à laser des métaux qui se développe en plusieurs directions: augmentation de la qualité de la soudure, coefficient de performance, développement de la technologie du traitement sélectif à laser, etc. Le perfectionnement de la technologie du soudage à laser nécessite de révéler et de

préciser la spécificité du chauffage du matériel par la méthode de la simulation informatique. Le modèle proposé permet de calculer la distribution des températures à l'intérieur de l'acier à souder compte tenu des paramètres de l'irradiation laser, des propriétés du matériel ainsi que des caractéristiques géométriques des échantillons. Les résultats de la modélisation sont coordonnés avec les données expérimentales. Est noté que l'utilisation du laser pour la mise en œuvre du "soudage traditionnel" ne permet pas d'exploiter pleinement le potentiel du rayonnement laser et il existe une possibilité d'améliorer la qualité de la soudure grâce au traitement sélectif à laser des matériaux.

Авторы: *Ушаков Иван Владимирович* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматика и компьютерные системы управления», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; профессор кафедры физики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия; *Батомункуев Амагалан Юрьевич* – аспирант кафедры физики, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет» «МИСиС», г. Москва, Россия.

Рецензент: *Арзамасцев Александр Анатольевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математического моделирования и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия.
