

С. А. Кузнецов, В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, М. В. Крохалев

**ВЕРИФИКАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ
БИМЕТАЛЛА VT1-0+MN45***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: kuzj321@yandex.ru

Представлены результаты моделирования процесса распределения температурных полей при лазерной обработке биметалла VT1-0+MN45. Показано, что использование конечно-элементной модели в пакете программ COMSOL Multiphysics позволяет оценивать распределение температурного поля в сваренном взрывом биметалле VT1-0 + MN45 при прохождении по его поверхности лазерного луча.

Ключевые слова: лазерная обработка, моделирование, титан VT1-0, константан MN45

S. A. Kuznetsov, V. G. Shmorgun, O. V. Slautin, M. V. Krokhalev

**VERIFICATION OF THE DISTRIBUTION OF TEMPERATURE FIELDS IN MODELING
THE PROCESS OF LASER PROCESSING OF BIMETAL VT1-0+MN 45**

Volgograd State Technical University

The results of modeling the distribution of temperature fields during laser treatment of bimetal VT1-0+MN45 are presented. It is shown that the use of a finite element model in the COMSOL Multiphysics software package makes it possible to estimate the distribution of the temperature field in an explosion-welded bimetal VT1-0 + MN45 when a laser beam passes over its surface.

Keywords: laser processing, modeling, titanium VT1-0, constantan MN45

© Кузнецов С. А., Шморгун В. Г., Слаутин О. В., Крохалев М. В., 2024.

* Исследование выполнено за счет средств программы развития ВолгГТУ «Приоритет 2030», в рамках научного проекта № 16/636-24.

Введение

Моделирование распределения температурных полей в процессе лазерной обработки титана и сплавов на его основе позволяет предсказывать поведение обрабатываемых материалов, а также сокращать количество дорогостоящих и длительных экспериментов, ускоряя процесс разработки новых технологий [1].

Лазерное легирование титана и сплавов на его основе заключается в насыщении поверхностного слоя легирующими элементами посредством диффузии элементов из предварительно нанесенного слоя под воздействием лазерного луча [2–4]. В настоящей работе выполнено моделирование распределения температурных полей и формы ванны расплава на поверхности титана в зависимости от скорости движения лазерного луча по поверхности биметалла титан ВТ1-0+медный сплав МН45 при прочих равных параметрах лазерной обработки.

Материалы и методы исследования

Для моделирования распределения температурных полей и формы ванны расплава при лазерной обработке использовали программу COMSOL Multiphysics с применением модуля «Heat Transfer in Solids», включающего элементы: Boundary Heat Source (тепловой поток лазерного излучения), Heat Flux (тепловой поток конвективного охлаждения поверхности), Thermal insulation (теплоизоляция), Open Boundary

(свободная граница) и Diffuse Surface (рассеивание тепла посредством излучения).

Геометрия расчетной области задавалась в трехмерном виде, модель имитировала прохождение лазерного луча заданной мощности и диаметра по поверхности сплава МН45. Размер титановой основы $20 \times 100 \times 2$ мм, материал «Ti Grade 1 [solid, not oxidized]» из встроенной библиотеки материалов с добавлением отсутствующих теплофизических свойств, а именно: tangent coefficient of thermal expansion $9,26 \cdot 10^{-6}$ [1/K] [5]. Размер медно-никелевого сплава $20 \times 100 \times 0,2$ мм, материал «UNS C71500 [annealed, tested at 22C (295K)]» из встроенной библиотеки материалов с добавлением отсутствующих теплофизических свойств, а именно: теплоемкость (Heat capacity at constant pressure) = 658 J/(kg·K) [5]; плотность (Density) = 8900 kg/m³ [6]; теплопроводность (Thermal conductivity) = 29 W/(m·K) [7].

Источник лазерного излучения был задан как перемещающийся источник тепла с варьируемыми скоростью движения лазерного луча, распределение тепла по диаметру подчинялось Гауссовому распределению. Параметры источника лазерного воздействия приведены на рис. 1, 2. Коэффициент поглощения энергии поверхностью принимался равным 0,7 и вводился в формулу удельной мощности лазерного излучения.

»	Var	Expression	Value	Description
p		0.7	0.7	Коэффициент поглощения поверхности
qtot		1400[W]	1400 W	Мощность лазерного излучения
Rq		2[mm]	0.002 m	Радиус пятна лазерного луча
vq		0.8 [m/min]	0.013333 m/s	Скорость перемещения лазерного луча
q0		$(qtot^2/pi/Rq^2) * p$	1.5597E8 W/m ²	Удельная мощность лазерного излучения

Рис. 1. Параметры, описывающие подвижный источник тепла

Variables

Name	Expression	Unit	Description
r	$\sqrt{(y-vq \cdot t)^2 + x^2}$	m	

Рис. 2. Задание переменной локальной радиальной координаты в виде математического выражения расстояния от центра подвижного источника тепла

Для более точного определения пиковых температур и максимальной глубины проплавления титановой основы моделирование распределения температурных полей проводилось в продольном сечении образца в плоскости

движения лазерного луча, а ширина и форма ванны переплава определялась в поперечном сечении образца в момент прохождения через него центра лазерного луча, как показано на рис. 3.

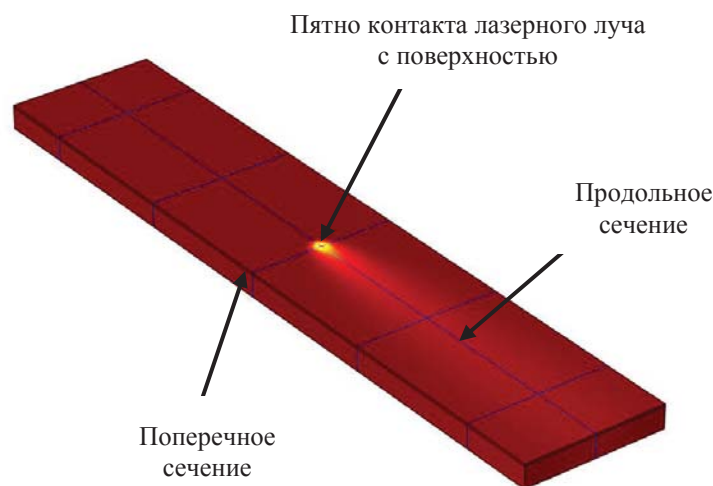


Рис. 3. Схема расположения продольного и поперечных сечений

За нижнюю границу отображаемого температурного диапазона была выбрана наименьшая температура структурного превращения по диаграмме состояния Ti-Cu (790 °С) [8], верхний предел определялся температурой плавления титана (1670 °С).

Для более наглядного отображения интересующего диапазона температурных полей, а именно 790–1670 °С использовалась градиентная температурная шкала (на рис. 4–7, 10 снизу), а для определения пиковых температур выбрана контурная, линейная шкала (на рис. 4–7, 10 сверху).

За цикл нагрев – охлаждение принимался временной промежуток, который рассчитывался как отношение длины участка с температурой выше 790 °С к скорости перемещения лазерного луча.

Для верификации данных моделирования проводилась лазерная обработка сваренного взрывом биметалла ВТ1-0 (3 мм) + МН45 (1 мм). Толщина сплава МН45 уменьшалась до 0,2 мм механической обработкой. Сварка взрывом осуществлялась по плоскопараллельной схеме на режимах, обеспечивающих надежное соединение двух пластин.

Лазерную обработку проводили на установке ТЛ 1200 в один проход при следующих режимах: мощность лазерного излучения $P = 1400$ Вт, диаметр пучка $d = 4$ мм, скорость перемещения лазерной головки 0,4–1,0 м/мин. Погонная энергия (рассчитывалась по формуле:

$$E = \frac{P}{d \cdot V},$$

где E – погонная энергия (Дж/мм²), P – мощ-

ность излучения, Вт; d – диаметр пучка, мм; V – скорость движения лазерного луча, мм/с) при этом менялась от 52,5 до 21,0 Дж/мм².

Металлографические исследования выполняли на модульном металлографическом микроскопе Olympus BX-61 при увеличении $\times 50$.

При верифицировании результатов моделирования был принят ряд допущений:

- глубина проплавления титановой основы в эксперименте соответствует максимальной глубине проникновения температурного поля со значением 1670 °С в модели;
- ширина ванны переплава соответствует ширине температурного поля со значением 1300 °С (температура плавления сплава МН45);
- скрытая теплота плавления и теплота испарения металла не учитываются.

Результаты и их обсуждение

Моделирование процесса распределения температурных полей в процессе лазерной обработки биметалла ВТ1-0+МН45 при мощности лазерного излучения 1400 Вт, диаметре пучка 4 мм и скорости движения лазерного луча 1,0 м/мин (рис. 4) показало, что время цикла нагрев – охлаждение составляет 0,82 с, глубина проплавления 750 мкм, ширина ванны переплава 3,263 мм, значение пиковых температур 3361 °С.

При уменьшении скорости движения лазерного луча до 0,9 м/мин (рис. 5) при прочих неизменных параметрах время цикла нагрев – охлаждение увеличилось до 1,01 с, глубина проплавления до 900 мкм, ширина ванны переплава до 3,383 мм, значение пиковых температур до 3496 °С.

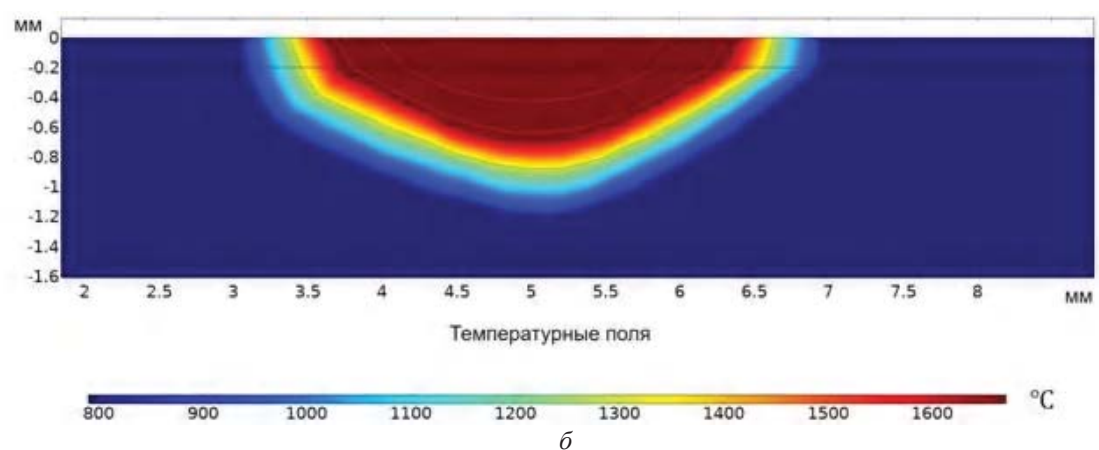
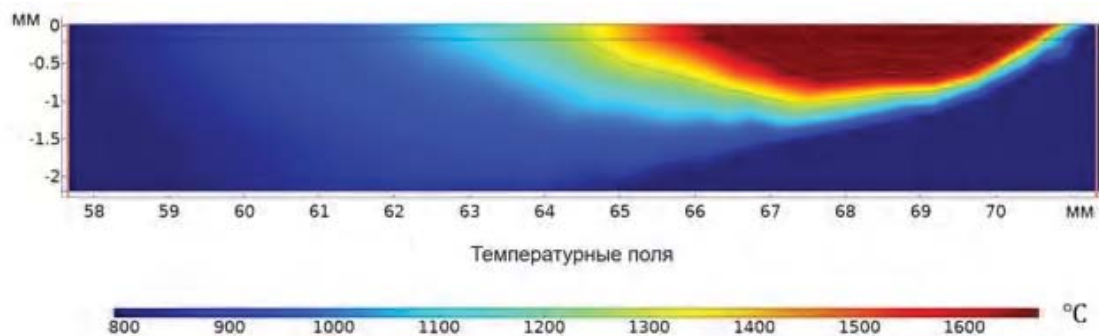


Рис. 4. Распределение температурных полей в продольном (а) и поперечном (б) сечении при скорости движения лазерного луча 1,0 м/мин

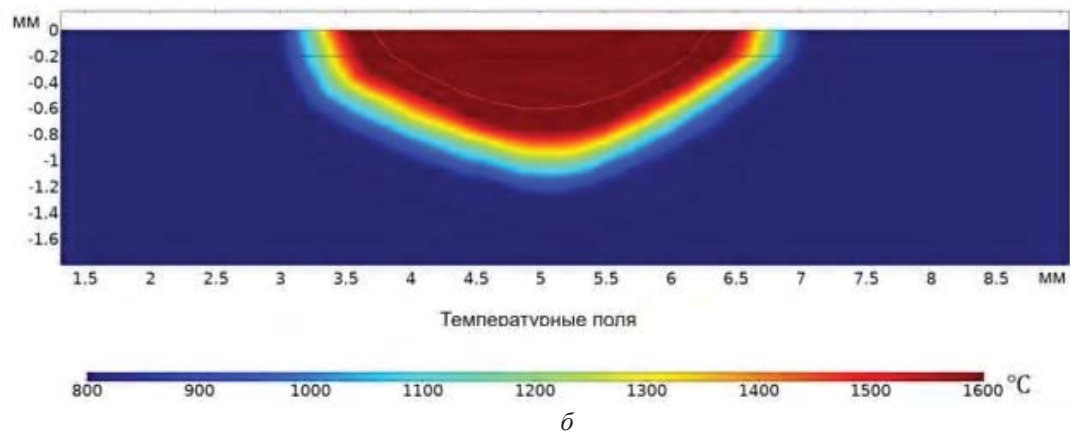
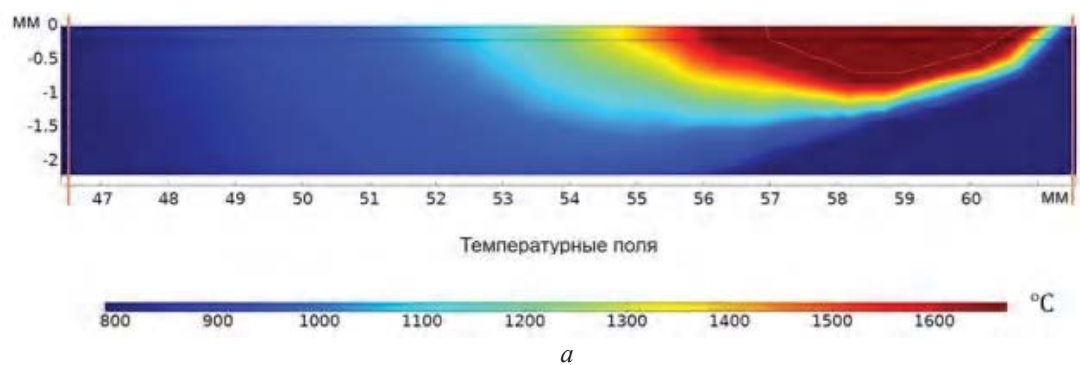


Рис. 5. Распределение температурных полей в продольном (а) и поперечном (б) сечении при скорости движения лазерного луча 0,9 м/мин

Дальнейшее уменьшение скорости движения лазерного луча до 0,8 м/мин (рис. 6) показало ту же, почти линейную, зависимость: увеличение времени цикла нагрев – охлаждение

до 1,27 с, глубины проплавления до 1010 мкм, ширины ванны переплава до 3,486 мм, значения пиковых температур до 3653 °С.

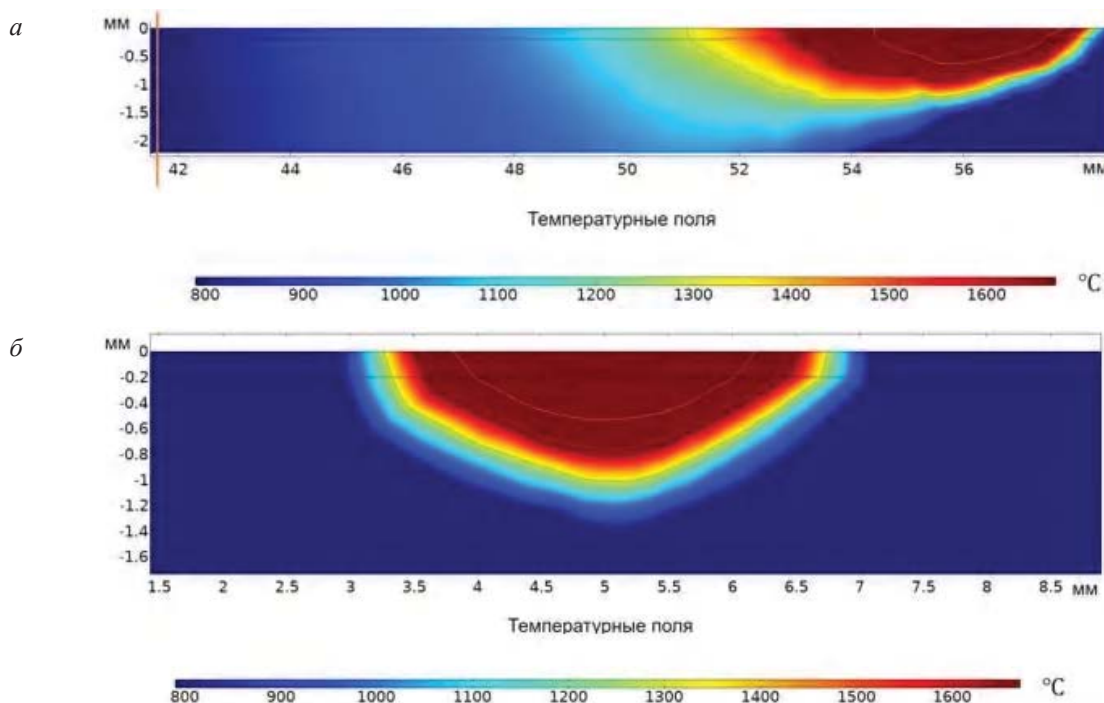


Рис. 6. Распределение температурных полей в продольном (*а*) и поперечном (*б*) сечении при скорости движения лазерного луча 0,8 м/мин

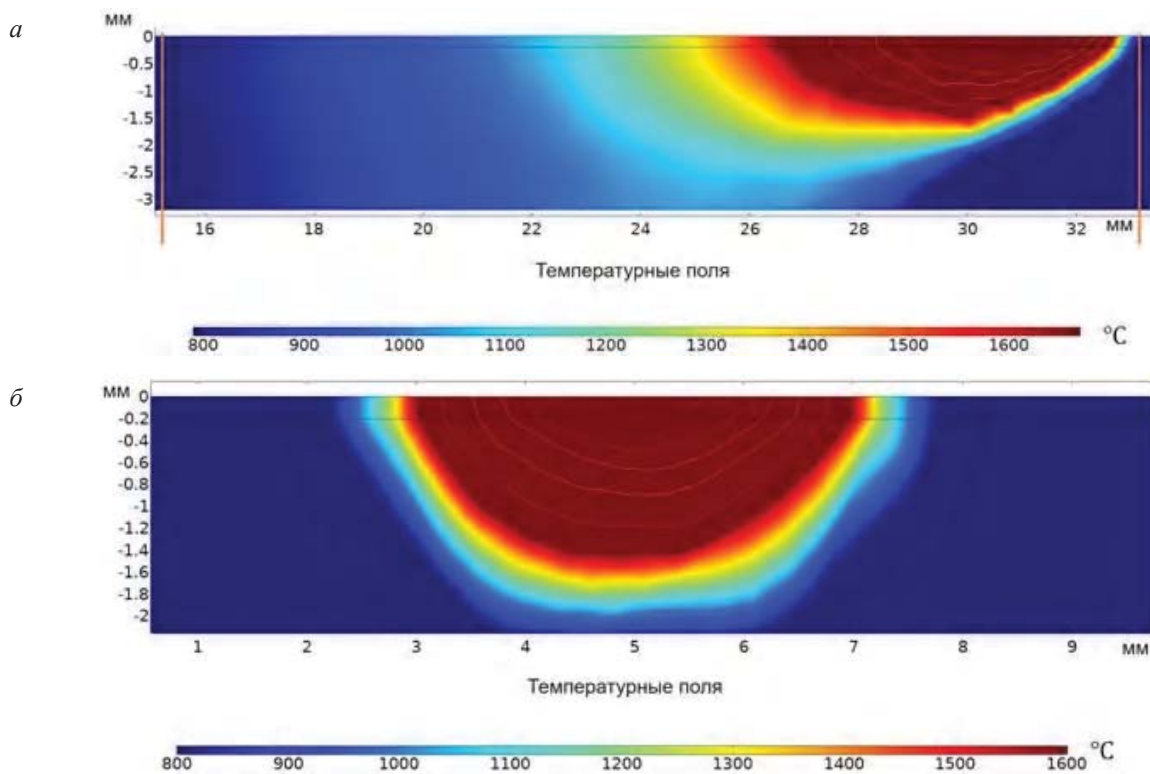


Рис. 7. Распределение температурных полей в продольном (*а*) и поперечном (*б*) сечении при скорости движения лазерного луча 0,4 м/мин

При скорости движения лазерного луча 0,4 м/мин (рис. 7), время цикла нагрев – охлаждение составило 2,69 с, глубина проплавления 1520 мкм, ширина ванны переплава 3,943 мм, значение пиковых температур 4980 °С.

Анализ результатов моделирования (рис. 4–7) показал, что увеличение скорости движения

лазерного луча при прочих равных параметрах лазерной обработки приводит к уменьшению глубины проплавления, пиковых температур и времени их воздействия на структуру. Ширина ванны переплава в исследуемом диапазоне скоростей изменяется от 3361 до 3943 мм.

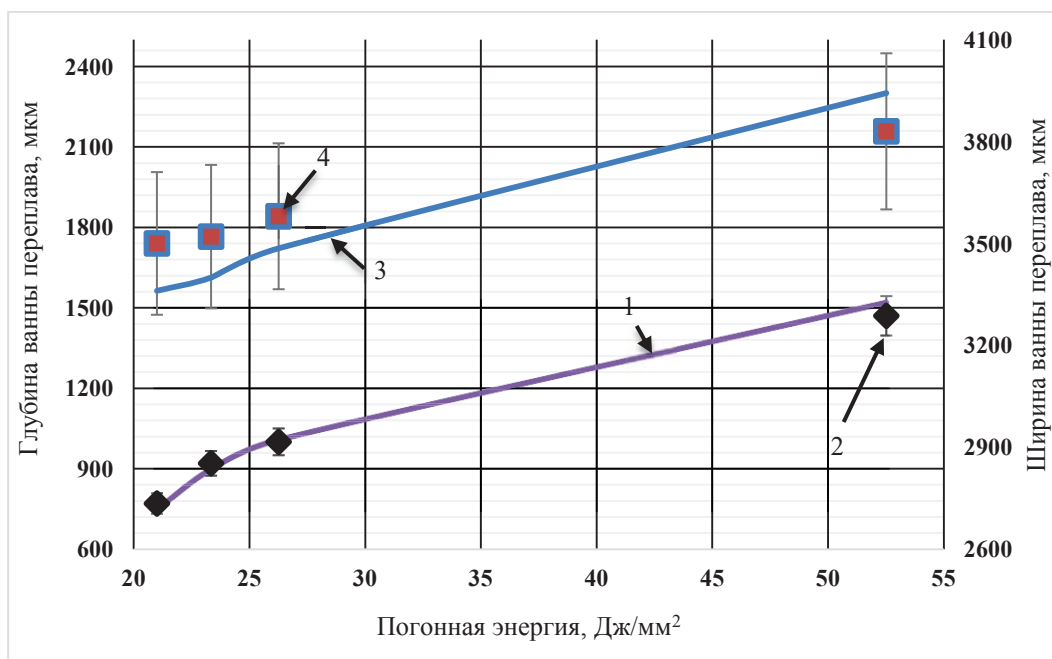


Рис. 8. Зависимость значений глубины (1 и 2) ванны переплава полученных при моделировании (сплошные линии) и экспериментально (точки) от погонной энергии при лазерной обработке с изменяющейся скоростью лазерного луча V от 0,4 до 1,0 м/мин

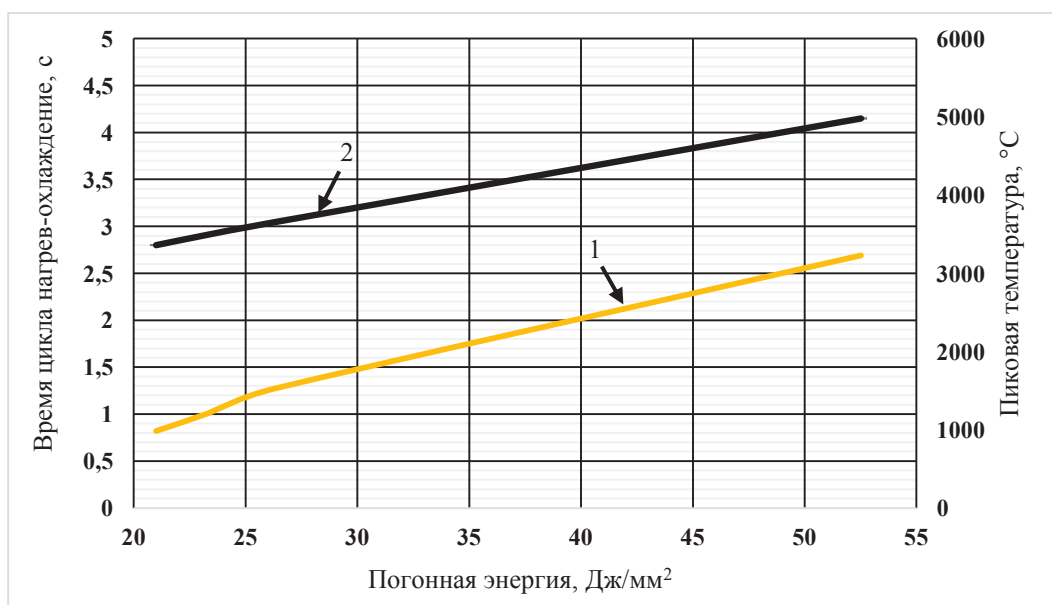


Рис. 9. Зависимость значений времени цикла нагрев – охлаждение (1) и пиковых температур (2) ванны переплава полученных при моделировании лазерной обработки от погонной энергии

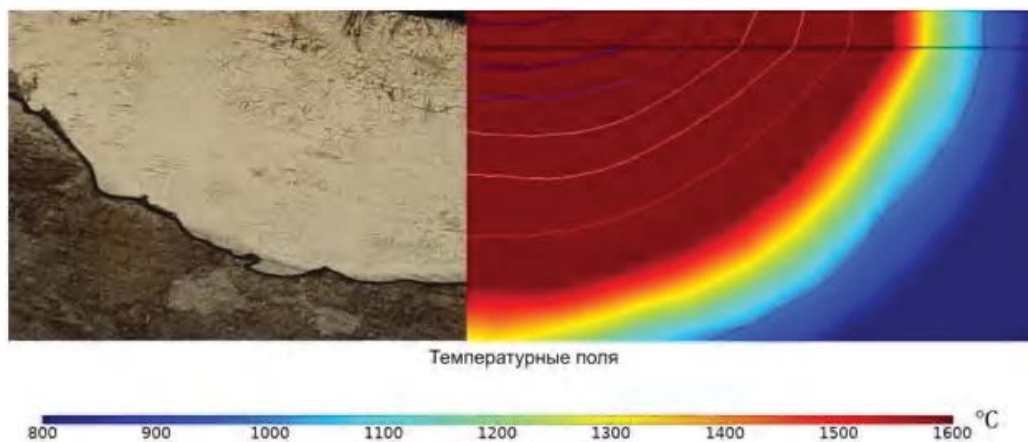
Сопоставление микроструктуры подвергну-
тых лазерной обработке образцов с результатами

моделирования показало корреляцию глубины
проплавления и ширины ванны переплава (рис. 8

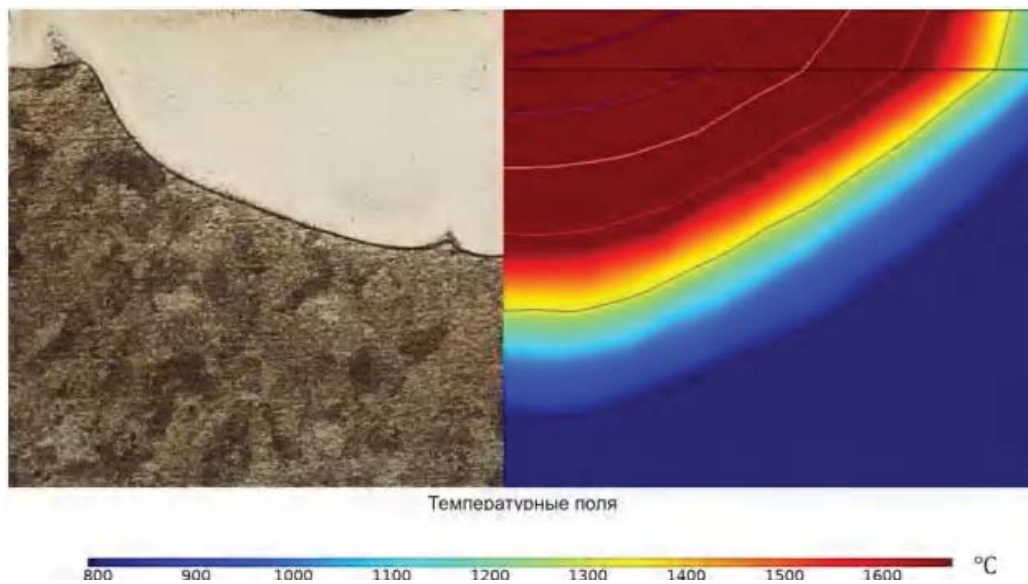
и 9), что свидетельствует об адекватности полученных при моделировании данных и возможно-

сти использовать модель для прогнозирования геометрических размеров получаемого покрытия.

а



б



в

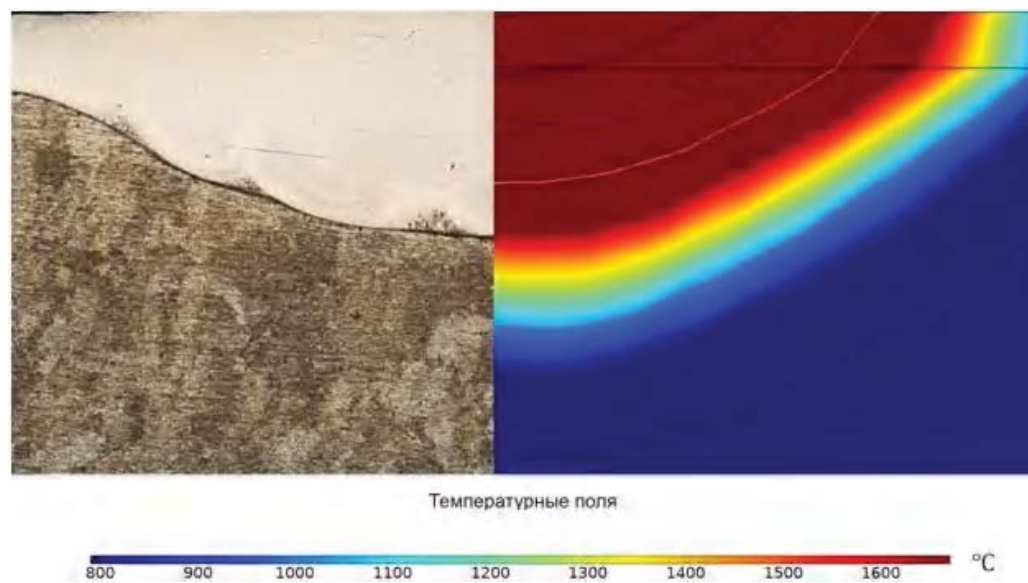


Рис. 10. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными при лазерной обработке со скоростью движения лазерного луча: *а* – 0,4 м/мин; *б* – 0,8 м/мин; *в* – 0,9 м/мин; *г* – 1,0 м/мин (см. также с. 72)

6

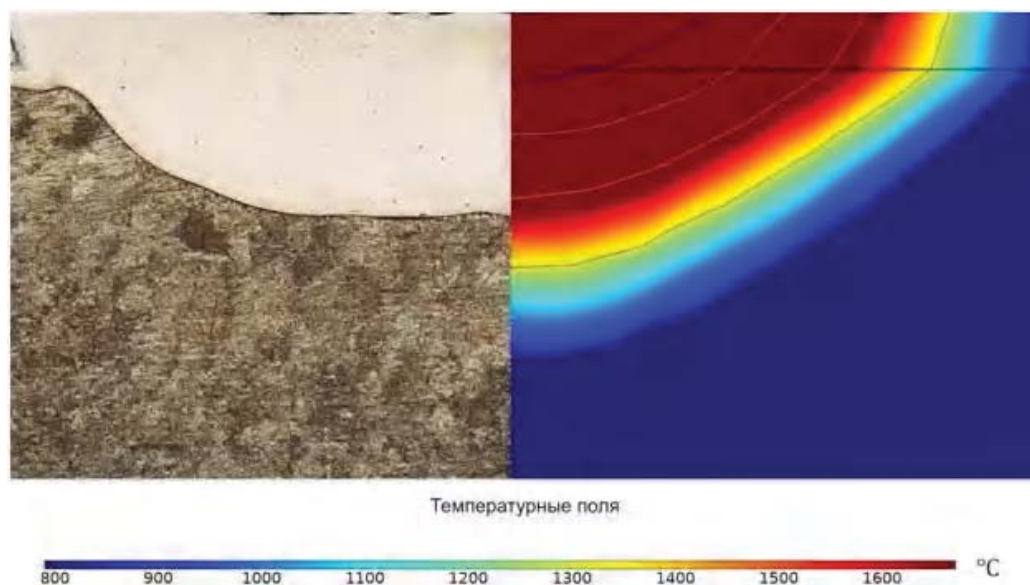


Рис. 10. Окончание

Выводы

1. Использование конечно-элементной модели в пакете программ COMSOL Multiphysics, позволяет оценивать распределение температурного поля в сваренном взрывом биметалле ВТ1-0 + МН45 при прохождении по его поверхности лазерного луча.

2. Сопоставление микроструктуры подвергнутых лазерной обработке образцов с полученными при моделировании температурными полями показало корреляцию глубины проплавления и ширины ванны переплава в модели и эксперименте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Муратов, В. С. Определение температурных полей и параметров ванны расплава на поверхности титана при непрерывной лазерной обработке / В. С. Муратов, Е. А. Морозова // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 11–4. – С. 719–723.
2. Шморгун, В. Г. Формирование диффузионной прослойки при лазерном нагреве композита медь–титан / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. Г. Серов, А. Н. Романов // *Известия ВолгГТУ : научный журнал* № 6 (229) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 11–14.
3. Шморгун, В. Г. Локальное легирование титана медью / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. Г. Серов, Р. Е. Новиков // *Известия ВолгГТУ ВолгГТУ : научный журнал* № 2 (237) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 12–16.
4. Шморгун, В. Г. Влияние конструктивно-технологических факторов на структуру и фазовый состав зоны переплава при лазерной обработке поверхности титана с медной плакировкой / В. Г. Шморгун, Л. М. Гуревич, О. В. Слаутин, А. С. Кузнецов, А. Г. Серов // *Известия ВолгГТУ : научный журнал* № 2 (261) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 13–19.
5. Zinelis S., Tsetsekou A., Papadopoulos T. Thermal expansion and microstructural analysis of experimental metal-ceramic titanium alloys // *The Journal of prosthetic dentistry*. – 2003. – Т. 90. – №. 4. – С. 332–338.
6. Hüpf T. et al. Thermophysical properties of five binary copper–nickel alloys // *International Journal of Thermophysics*. – 2010. – Т. 31. – С. 966–974.
7. Manzano C. V. et al. Thermal conductivity reduction by nanostructuration in electrodeposited CuNi alloys // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2021. – Т. 9. – №. 10. – С. 3447–3454.
8. Wilthan B., Pottlacher G. Optical and electrical properties of 5 liquid binary alloys // *High Temperatures-High Pressures*. – 2011. – Т. 40.
9. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справ.: в 3 т. / под ред. Н. П. Лякишева. – М., 1997. – Т. 2. – С. 275–284.