

УДК 669.716:621.785

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-2-285-11-20

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

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ
ПРИ ЛАЗЕРНОМ ПОВЕРХНОСТНОМ ЛЕГИРОВАНИИ ТИТАНА VT1-0***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Представлена компьютерная модель тепловых полей в биметалле титан VT1-0 + сплав МН19, формирующихся при лазерном нагреве поверхности сплава МН19, реализованная в программной среде COMSOL Multiphysics®. Показано, что увеличение скорости движения лазерного источника может приводить к получению неоднородной по сечению микроструктуры ванны переплава из-за уменьшения времени цикла нагрева-охлаждение. Разработанная модель позволяет прогнозировать температуру нагрева материала при лазерной обработке, а также осуществлять подбор ее режимов.

Ключевые слова: моделирование, титан, медно никелевый сплав, лазерная обработка, биметалл.

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

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00231, <https://rscf.ru/project/24-29-00231/>.

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

MODELING OF THE TEMPERATURE FIELD DURING LASER SURFACE ALLOYING OF TITANIUM VT1-0

Volgograd State Technical University

A computer model of thermal fields in bimetal titanium VT1-0 + alloy MN19, formed by laser heating of the surface of the alloy MN19, implemented in the COMSOL Multiphysics® software environment, is presented. It is shown that an increase in the velocity of the laser source can lead to a nonuniform cross-sectional microstructure of the remelting bath due to a decrease in the heating-cooling cycle time. The developed model makes it possible to predict the heating temperature of the material during laser processing, as well as to select its modes.

Keywords: modeling, titanium, copper-nickel alloy, laser processing, bimetal.

Лазерное легирование титана и сплавов на его основе заключается в насыщении поверхностного слоя легирующими элементами посредством диффузии предварительно нанесенного слоя под воздействием лазерного пучка [1–5]. Преимущества лазерного поверхностного легирования заключаются в следующем: при локальном нагреве и скоростном охлаждении в поверхностных слоях достигается высокая концентрация легирующих компонентов; хорошая воспроизводимость параметров и свойств поверхностного слоя; большая скорость процесса и достижение высокого качества поверхностного слоя; возможность получения узких локальных зон с заданным химическим составом; экономия дорогостоящего легирующего материала; отсутствие необходимости в последующей термообработке; минимизация негативного влияния повышенных температур на основной металл. В настоящей работе выполнено моделирование температурных полей и формы ванны расплава на поверхности титана в зависимости от скорости движения лазерного источника по поверхности биметалла при прочих равных параметрах лазерной обработки.

Материалы и методы исследования

Для моделирования использовали программу COMSOL Multiphysics с применением мо-

дуля «Heat Transfer in Solids», включающего себя 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 МН19. Размер титановой основы 10x100x2 мм, материал «Ti Grade 1 [solid, not oxidized]» из встроенной библиотеки материалов с добавлением отсутствующих теплофизических свойств, а именно: tangent coefficient of thermal expansion $8.6 \cdot 10^{-6}$ [1/K]; isotropic tangent coefficient of thermal expansion $8.6 \cdot 10^{-6}$ [1/K]. Размер медно-никелевого сплава 10x100x0,3 мм, материал «UNS C71000 [solid, hot rolled]» из встроенной библиотеки материалов с добавлением отсутствующих теплофизических свойств, а именно: poisson's ratio 0,33; isotropic tangent modulus = 1,25 [ГПа]; kinematic tangent modulus = 2,5 [ГПа]; hardening function = 40 [Па].

Источник лазерного излучения был задан как перемещающийся источник тепла с заданной мощностью и радиусом. Параметры источника лазерного воздействия приведены на рис. 1 и 2.

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
Rq	1[mm]	0.001 m	Радиус пятна контакта лазерного луча
vq	1.2 [m/min]	0.02 m/s	Скорость движения лазерного луча
qtot	1400[W]	1400 W	Мощность лазерного излучения
q0	$qtot^2/pi/Rq^2$	8.9127E8 W/m ²	Удельная мощность лазерного воздействия

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

При моделировании отображаемый температурный диапазон был выбран от 800 до 2000 °С. За цикл нагрев-охлаждение принимался временной промежуток, между началом нагрева и охлаждением всего образца до температуры ниже полиморфного превращения.

Для верификации результатов моделирования была проведена лазерная обработка биметалла ВТ1-0+МН19 с толщиной плакирующего слоя 0,3 мм на установке ТЛ 1200. Режим обработки: мощность лазерного излучения 1400 Вт, диаметр пятна 2 мм, скорость движения лазерного луча 0,8–1,2 м/мин

Образцы сплав МН19 (1 мм) + титан ВТ1-0 (2 мм) были получены сваркой взрывом по плоско-параллельной схеме. Взрывчатое вещество – смесь аммонита 6ЖВ с кварцевым песком в соотношении 70/30, высота заряда ВВ 20 мм, зазор между пластинами – 3 мм. Скорость детонации 2500 м/с, скорость соударения 762 м/с. Уменьшение толщины плакирующего слоя до 0,3 мм производилось путем прокатки биметалла на двухвалковом стане.

Металлографические исследования выполняли на модульном металлографическом микроскопе Олимпус ВХ-61.

Большой интерес в результатах моделирования представляли кадры пиков нагрева с максимальным удалением температур выше

2000 °С от точки воздействия лазерного луча и пики охлаждения с максимальным удалением температурного поля 880 °С от центральной оси ванны переплава.

Данными подтверждающими адекватность модели считались:

1. Совпадение области температуры плавления сплава МН19 (1200 °С) в модели с границей оплавления плакирующего слоя в эксперименте.

2. Совпадение области температур активного роста зерна титана (880 °С) в модели с границей зоны увеличенного размера зерна в эксперименте.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 и 4 показано распределение температурных полей в продольном сечении биметалла при лазерной обработке со скоростью движения лазерного луча 0,8 м/мин. Анализ представленных на рис. 3 данных показывает, что время выхода на стабильный режим нагрева занимает порядка 0,2 с. Пиковая температура достигает 9000 °С, скорость нагрева составляет порядка 40000 °С/с. Из-за отвода тепла на расстоянии 1,5 мм от центра воздействия лазерного луча происходит предварительный подогрев плакирующего слоя до 800 °С (рис. 4).

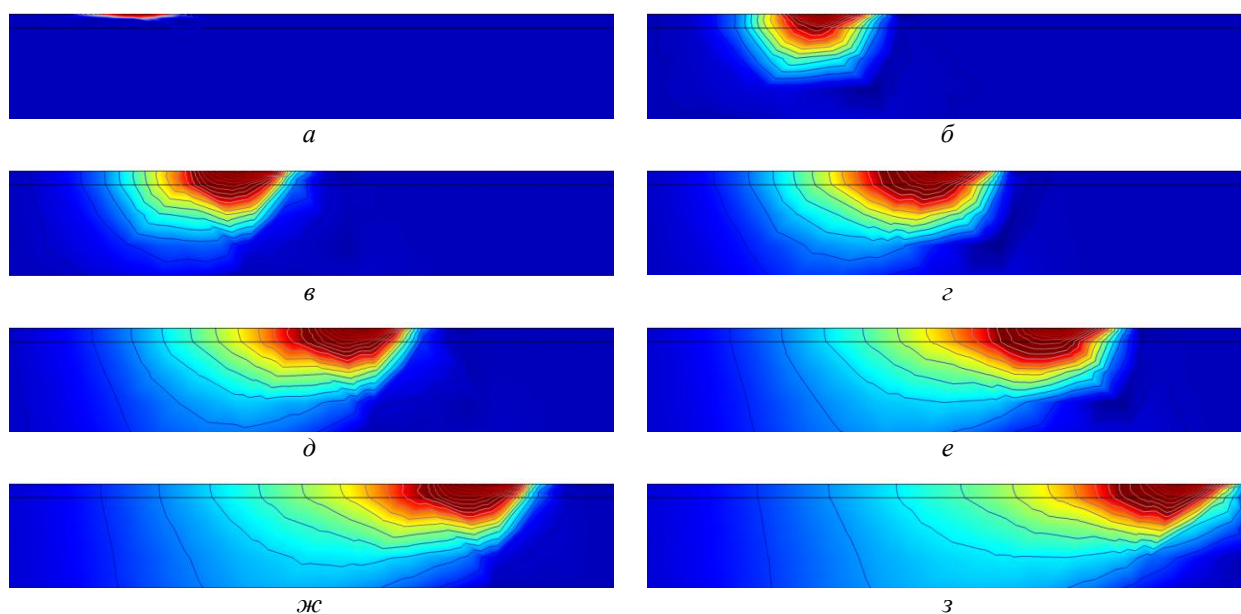


Рис. 3. Визуализация процесса нагрева в продольном сечении биметалла при лазерной обработке со скоростью движения лазерного луча 0,8 м/мин с разницей в 0,1 с

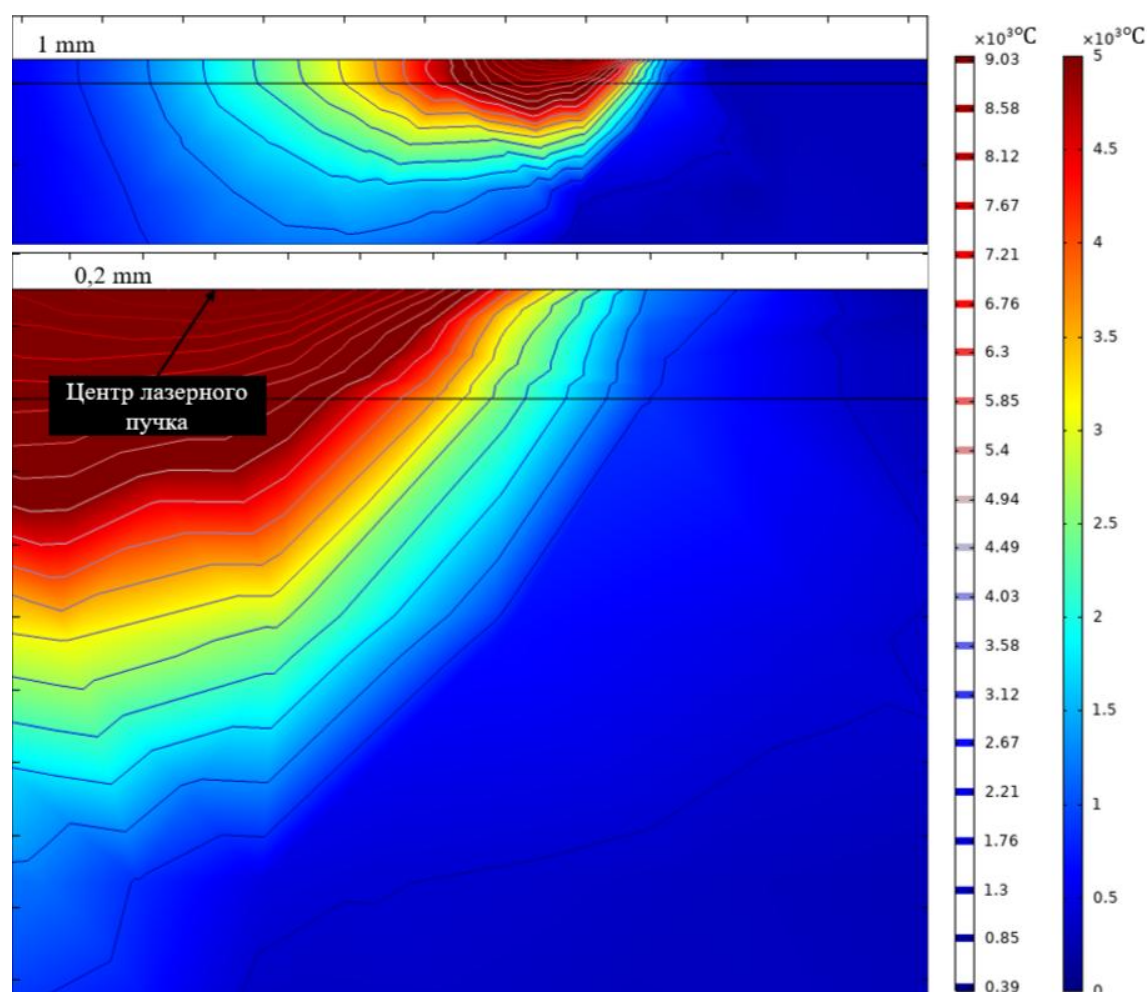


Рис. 4. Распределение температурных полей в продольном сечении при лазерной обработке, со скоростью движения лазерного луча 0,8 м/мин

На рис. 5–9 показано распределение температурных полей в поперечном сечении биметалла при лазерной обработке со скоростью движения лазерного луча 0,6–1,2 м/мин. Их анализ показал, что при прочих равных параметрах лазерной обработки увеличение скорости дви-

жения лазерного луча приводит к уменьшению толщины слоя титана, нагретого до температуры выше 2000 °С, и уменьшению времени воздействия пиковых температур. При этом максимальные температуры в пике нагрева находятся в диапазоне от 3890 до 4300 °С.

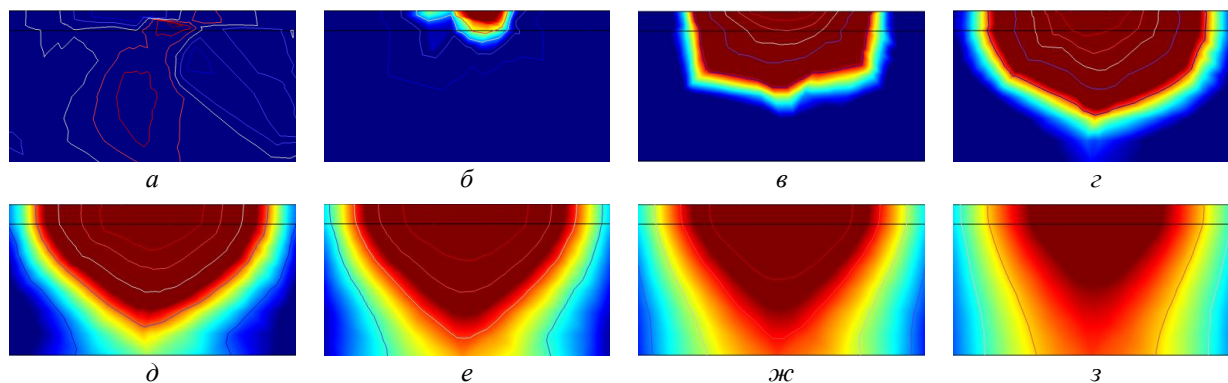


Рис. 5. Визуализация процесса нагрева и охлаждения с разницей в 0,1 с в поперечном сечении биметалла при лазерной обработке со скоростью 0,6 м/мин:

а – 0,1 с до начала нагрева; *б* – *г* – начало нагрева; *д* – пик нагрева; *е* – *ж* – охлаждение; *з* – пик охлаждения. Общее время цикла нагрев-охлаждение 9 с (см. также с. 15)

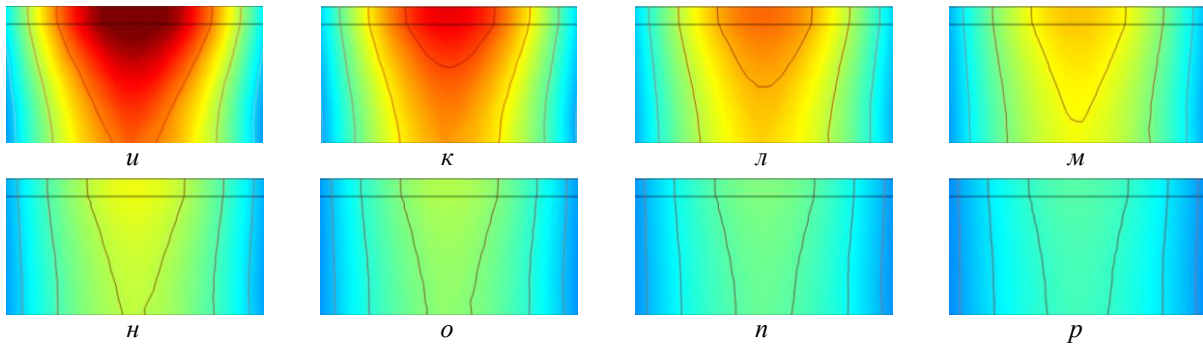


Рис. 5. Окончание

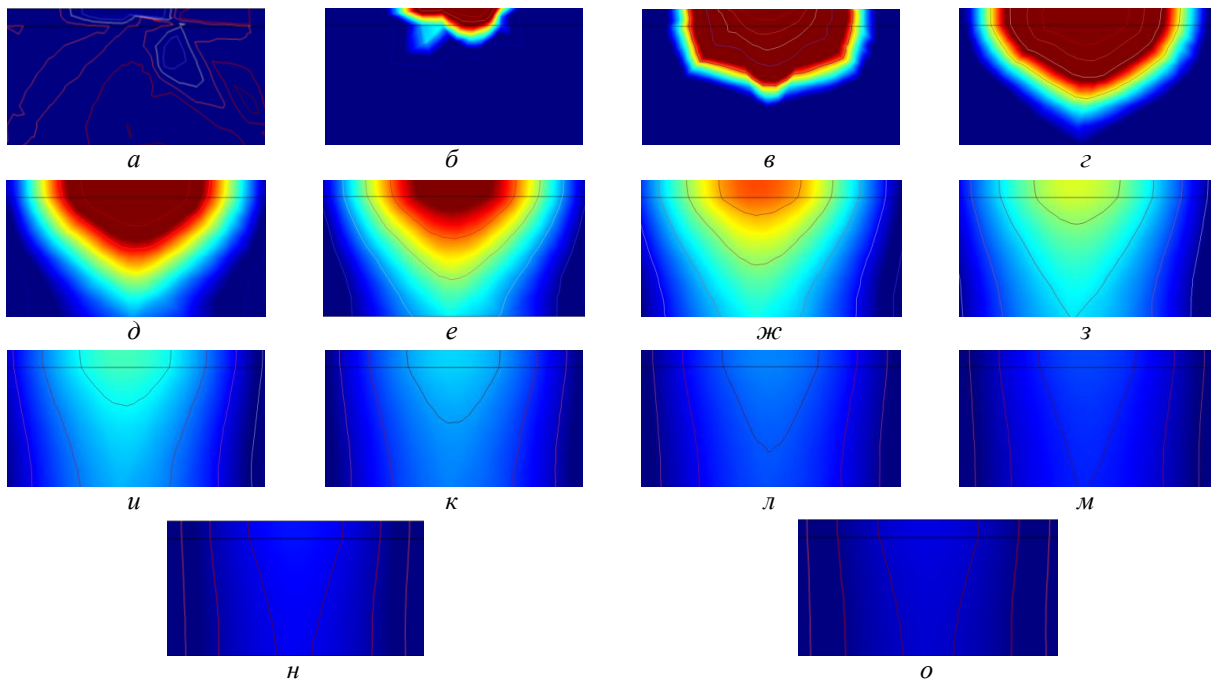


Рис. 6. Визуализация процесса нагрева и охлаждения с разницей в 0,1 с в поперечном сечении биметалла при лазерной обработке со скоростью 0,8 м/мин:
а – 0,1 с до начала нагрева; б – в – начало нагрева; г – пик нагрева; д – о – охлаждение; ж – пик охлаждения; о – конец охлаждения.
Общее время цикла нагрев-охлаждение 1,3 с

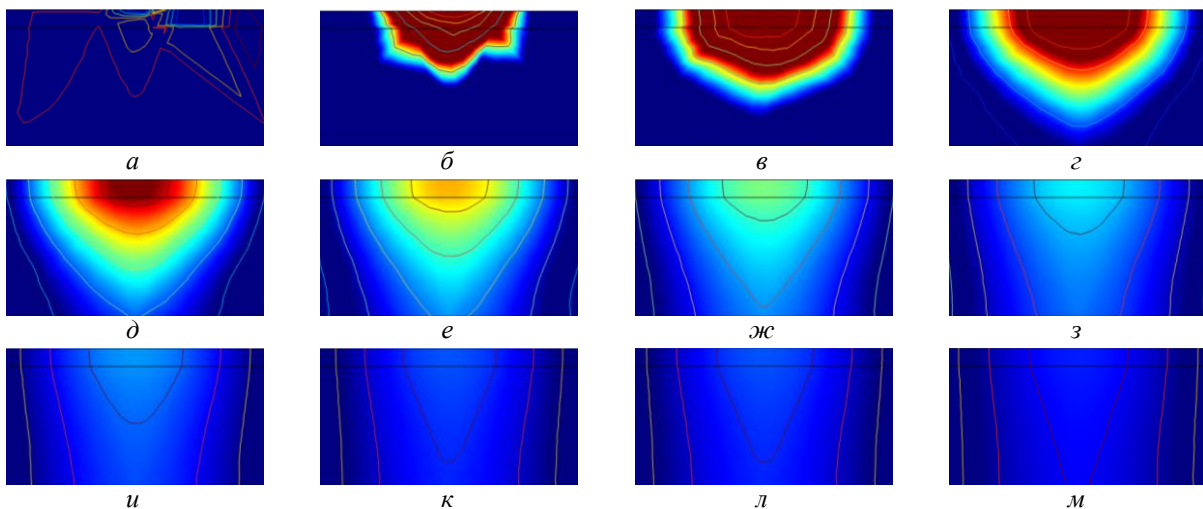


Рис. 7. Визуализация процесса нагрева и охлаждения с разницей в 0,1 с в поперечном сечении биметалла при лазерной обработке со скоростью 1 м/мин:
а – за 0,1 секунды до начала нагрева; б – начало нагрева; в – пик нагрева; г – м – охлаждение; ж – пик охлаждения; м – конец охлаждения всего сечения до температуры 880 °С. Общее время цикла нагрев-охлаждение 1,1 с

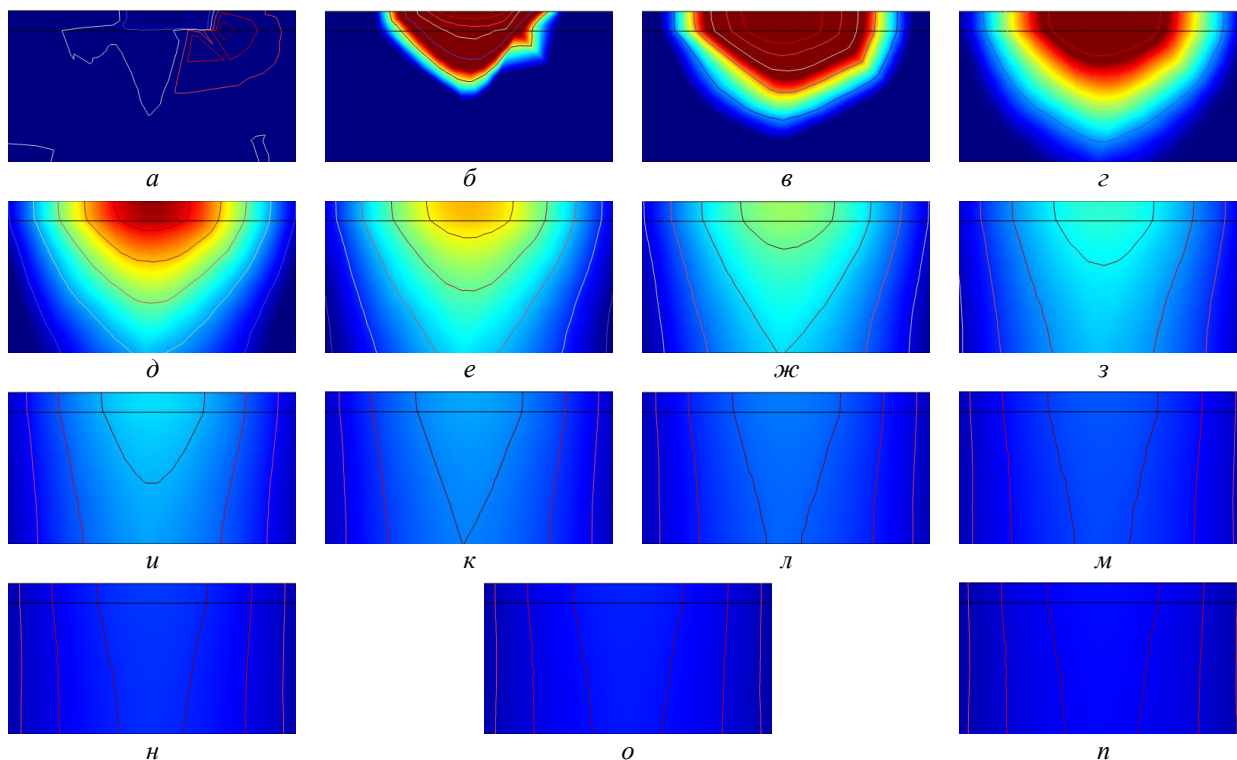


Рис. 8. Визуализация процесса нагрева и охлаждения с разницей в 0,1 с в поперечном сечении биметалла при лазерной обработке со скоростью 1,2 м/мин:

a – за 0,1 с до начала нагрева; *б* – начало нагрева; *в* – пик нагрева; *г* – *п* – охлаждение; *и* – пик охлаждения; *п* – конец охлаждения всего сечения до температуры 880 °С. Общее время цикла нагрев-охлаждение 1,4 с

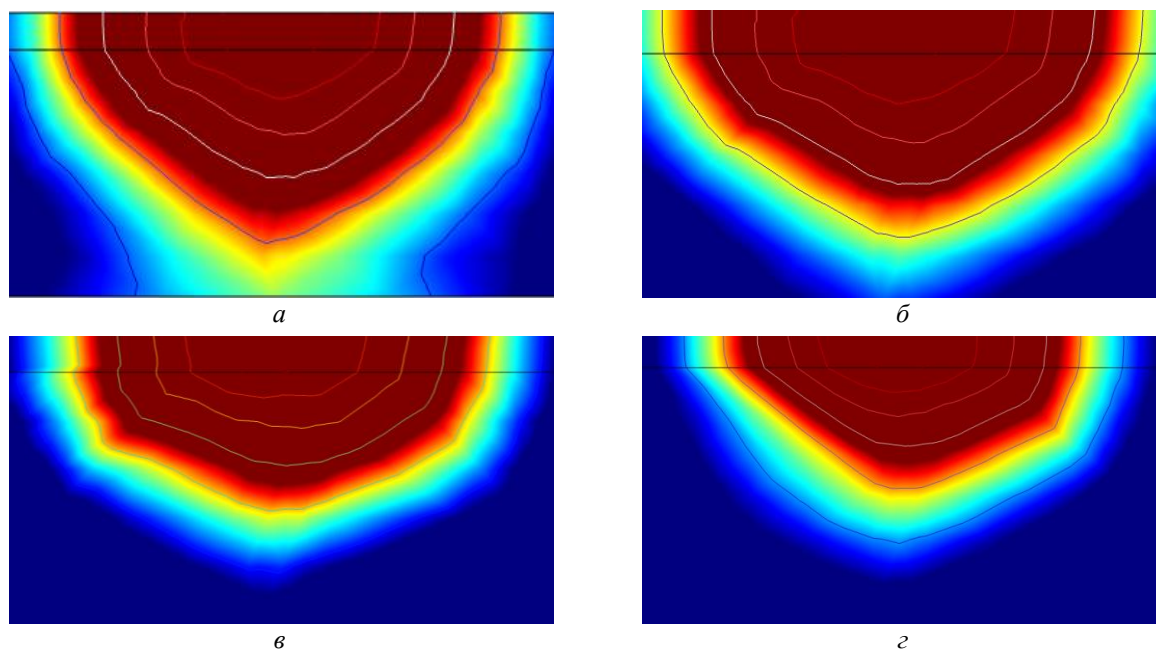


Рис. 9. Распределение температурных полей в пике нагрева при скорости движения лазерного луча 0,6 (*a*), 0,8 (*б*), 1,0 (*в*) и 1,2 (*г*) м/мин

Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными при лазерной обработке биметалла ВТ1-0+МН19 со скоростью движения лазерного луча 0,8–1,2 м/мин (рис. 10–12) показало следу-

ющее. Область температурных полей 1200 °С в пиках нагрева совпадает с границей оплавления сплава МН19, а область температурного поля 900 °С в пике охлаждения совпадает с границей области увеличенного размера зерна тит-

тана, что свидетельствует об адекватности данных, полученных при моделировании. Увеличение скорости движения лазерного источника приводит к уменьшению времени цикла нагрева-охлаждение, ранней кристаллизации ванны расплава и получению неоднородной по сечению микроструктуры. В исследованном диапазоне скоростей однородная структура ванны

переплава была получена при скорости движения лазерного источника 0,8 м/мин (рис. 13). Образование неоднородной структуры ванны переплава при обработке с более высокими скоростями может быть связано с недостатком времени воздействия пиковых температур, необходимого для завершения процесса структурных превращений.

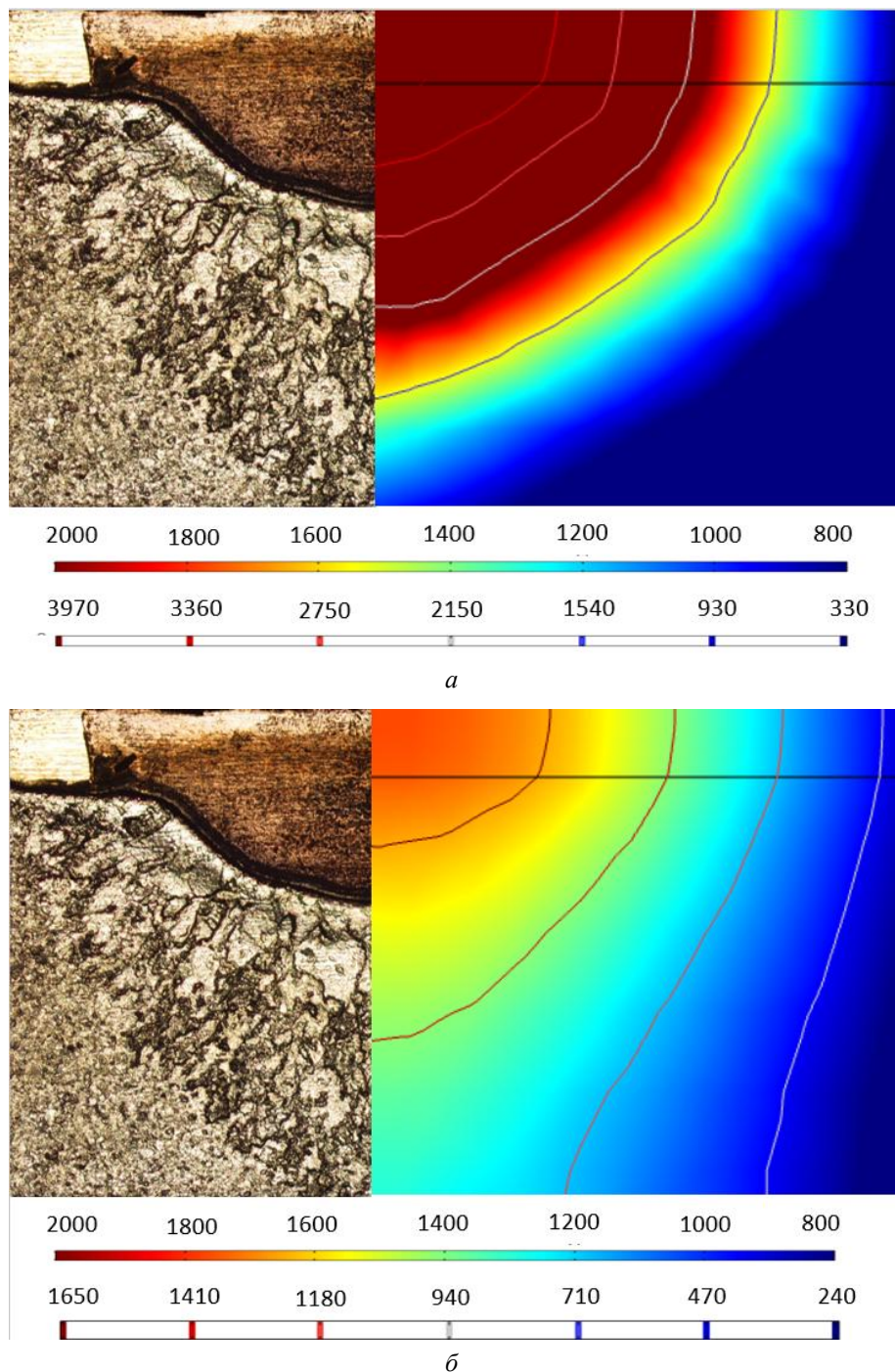


Рис. 10. Сопоставление распределения температурных полей при обработке со скоростью движения лазерного луча 0,8 м/мин в пиках нагрева (а) и охлаждения (б) со структурой ванны переплава и зоны термического влияния

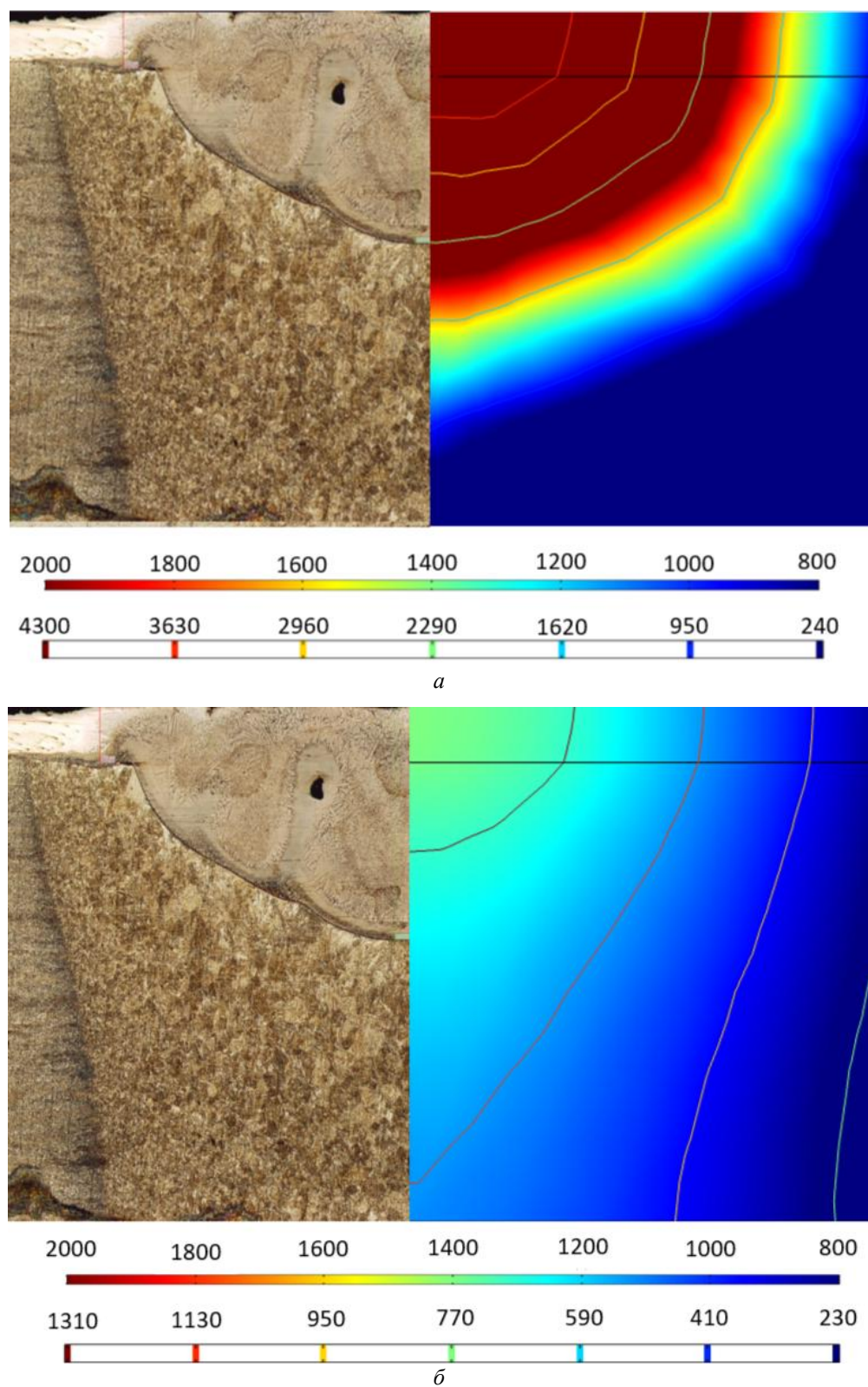


Рис. 11. Сопоставление распределения температурных полей при обработке со скоростью движения лазерного луча 1,0 м/мин в пиках нагрева (а) и охлаждения (б)

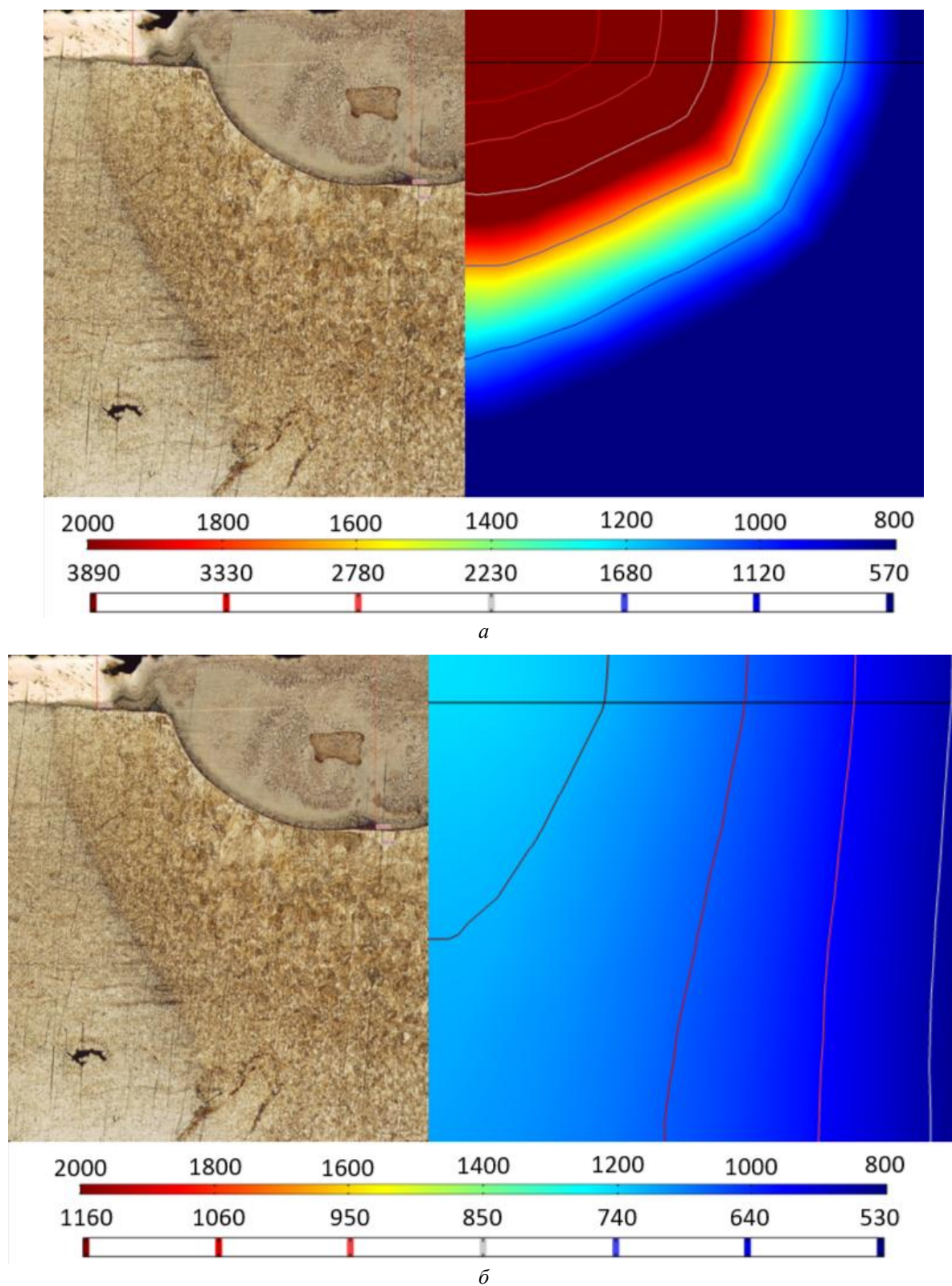


Рис. 12. Сопоставление распределения температурных полей при обработке со скоростью движения лазерного луча 1,2 м/мин в пиках нагрева (а) и охлаждения (б)

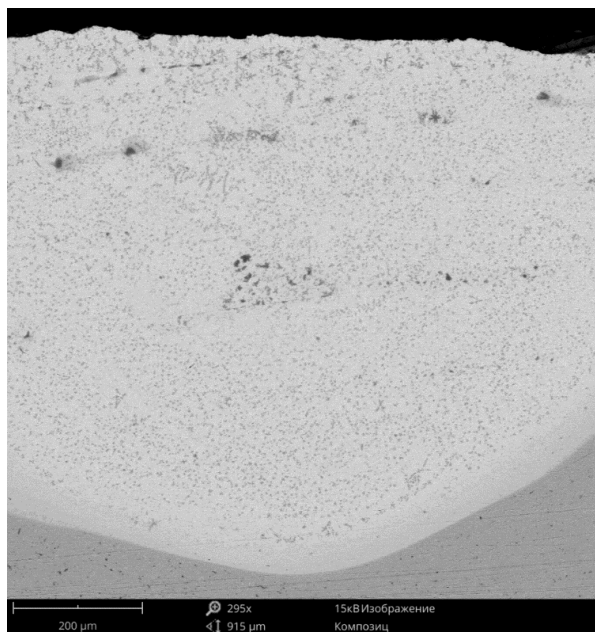


Рис. 13. СЭМ-изображение ванны переплава после обработки со скоростью движения лазерного источника 0,8 м/мин

Выводы

1. Разработанная модель позволяет прогнозировать температуру нагрева биметалла ВТ1-0+МН19 при лазерной обработке, а также осуществлять подбор ее режимов.
2. При прочих равных параметрах лазерной обработки увеличение скорости движения лазерного луча приводит к уменьшению расстояния до слоев титана, нагретых до пиковых температур, и уменьшению времени их воздействия.
3. В исследованном диапазоне скоростей однородная структура ванны переплава получена при скорости движения лазерного источника

0,8 м/мин. Образование неоднородной структуры ванны переплава при обработке с более высокими скоростями может быть связано с недостатком времени воздействия пиковых температур, необходимого для завершения процесса структурных превращений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Шморгун, В. Г. Локальное легирование титана медью / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. Г. Серов, Р. Е. Новиков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 (237) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 12–16.
3. Шморгун, В. Г. Structure and properties of intermetallic coatings formed by laser alloying of a titanium surface with copper / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. Г. Серов, // Materials Today: Proceedings. Vol. 25, part 3 : III All-Russian Conference (with International Participation) Hot Topics of Solid State Chemistry : From New Ideas to New Materials (Novosibirsk, Russia, October 1-5, 2019) / ed. by T. Shakhtshneider [et al.] ; Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Novosibirsk State University. – [Publisher: Elsevier], 2020. – P. 493–496.
4. Шморгун, В. Г. Formation of coatings based on titanium cuprides by explosive welding with subsequent laser treatment / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. Г. Серов, В. О. Харламов, А. С. Кайгородов // Metal Science and Heat Treatment. – 2020. – Vol. 62, No. 5-6 (September). – P. 387–392.
5. 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.