

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2026, Том 13, № 1 / 2026, Vol. 13, Iss. 1 <https://resources.today/issue-1-2026.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/08INOR126.pdf>

DOI: 10.15862/08INOR126 (<https://doi.org/10.15862/08INOR126>)

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Чашин, Е. А. Интенсификация процессов термического цикла нагрева импульсным лазерным излучением /
Е. А. Чашин, И. В. Шилов, Ю. В. Молокин // Отходы и ресурсы. — 2026. — Т. 13. — № 1. — URL:
<https://resources.today/PDF/08INOR126.pdf>. DOI: 10.15862/08INOR126.

For citation:

Chaschin Ye.A., Shilov I.V., Molokin Yu.V. Intensification of thermal cycle processes using pulsed
laser radiation. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2026;13(1): 08INOR126. Available at:
<https://resources.today/PDF/08INOR126.pdf>. DOI: 10.15862/08INOR126. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 621.79.01

Чашин Евгений Анатольевич

ФГБОУ ВО «Ковровский государственный технологический университет имени В.А. Дегтярева», Ковров, Россия
Заведующий кафедрой «Электротехника»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: kanircha@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4000-0035>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=42261

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6506540880>; https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=6507486248

Шилов Игорь Вячеславович

ФГБОУ ВО «Ковровский государственный технологический университет имени В.А. Дегтярева», Ковров, Россия
Доцент кафедры «Электротехника»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: shilov@dksta.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=42266

Молокин Юрий Валентинович

ФГБОУ ВО «Ковровский государственный технологический университет имени В.А. Дегтярева», Ковров, Россия
Доцент кафедры «Электротехника»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: molokin@dksta.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1199093

Интенсификация процессов термического цикла нагрева импульсным лазерным излучением

Аннотация. В инженерной практике нередки случаи, когда для выполнения технологических операций нагревания и плавления материалов, без разрушения поверхности, применяются лазерные технологические комплексы, работающие в режиме генерации импульсов длительностью 0,1–6 мс. Однако практика их эксплуатации показывает меньшую энергетическую эффективность процессов обработки по сравнению с операциями лазерной резки, что ограничивает распространение технологических операций лазерной закалки и сварки. Одна из причин снижения энергетической эффективности связана с высокой отражательной способностью поверхности металлов, приводящая к снижению термического КПД процесса лазерного нагревания вследствие снижения доли лазерного излучения,

поглощаемого обрабатываемой поверхностью. Отражательная способность металла нелинейно зависит от температуры поверхности и изменяется в процессе нагрева импульсом лазерного излучения. Это делает актуальным повышение термического КПД импульсной лазерной металлообработки без разрушения поверхности посредством применения дополнительного источника обеспечивающего предварительный подогрев поверхности до температуры плавления. В статье, на примере лазерного технологического комплекса типа «Квант-15», генерирующего на длине волны 1,064 мкм импульсы длительностью 3 мс с энергией 6 Дж, выполнено моделирование процесса лазерной обработки без разрушения поверхности для металлической пластины, толщиной 1 мм. По результатам моделирования в пакете программ Mathcad, с учетом зависимости коэффициента поглощения поверхности от ее температуры, рассмотрена возможность повышения термического КПД технологической операции лазерной обработки без разрушения поверхности. Показано, что применение сопутствующего нагрева для интенсификации процесса лазерной сварки энергетически не целесообразно, в то время как интенсификация процесса термообработки позволяет повысить термический КПД до 25 % по сравнению с термическим КПД при традиционной лазерной обработке.

Ключевые слова: термический КПД; лазерное излучение; моделирование; сварка; теплообмен; отражательная способность; нагрев

Введение

Количество практических задач, решение которых требует применения концентрированных потоков энергии, отличающихся отсутствием механического воздействия, в настоящее время превышает 100 тыс. [1]. Среди источников концентрированных потоков энергии можно выделить получившие широкое распространение на металлообрабатывающих предприятиях источники лазерного излучения, высокотехнологическое оборудование на базе которых, позволяет выполнять операции размерной обработки с минимальной зоной термического влияния. Однако анализ востребованности технологических операций лазерной обработки показывает, что распространенность применения лазерного поверхностного термоупрочнения и сварки в 4-7 раз ниже по сравнению с операциями лазерной резки, а доля использования процессов нагревания и плавления материалов без разрушения не превышает 9 % [1; 2].

Одной из причин, вызывающих пониженную, в сравнении с лазерной резкой, востребованность технологий лазерного поверхностного термоупрочнения и сварки металлов, является меньшая энергетическая эффективность процесса нагрева и плавления материалов без разрушения. В значительной степени это вызвано высокой отражающей способностью металлов и, как следствие, малой долей лазерного излучения, поглощаемого обрабатываемой металлической поверхностью [3]. Если при выполнении технологических операций лазерной резки, с соблюдением известных требований [4] к интенсивности в пятне фокусировки, роль степени поглощения поверхностью лазерного излучения важна лишь на начальной стадии воздействия излучения, а затем, под действием процессов, связанных с многократным переотражением в сформированном канале глухого или сквозного отверстия, а так же поглощением излучения плазмой внутри канала, коэффициент поглощения приближается к 100 %. То при выполнении операций лазерной обработки нагревания и плавления материалов без разрушения поверхности, отражение излучения от поверхности металла в зоне обработки остается одним из ключевых физических параметров, который во многом определяет энергетическую эффективность процесса лазерного воздействия. Поэтому для увеличения востребованности технологических операций лазерного поверхностного термоупрочнения и сварки является актуальным решение задачи расширения функциональных возможностей лазерных установок путем интенсификации процессов обработки.

Одним из путей интенсификации лазерной обработки является повышение коэффициента поглощения лазерного излучения. Известно, что поглощательная способность поверхности металла может быть увеличена на 20–80 % за счет изменения свойств поверхности путем увеличения шероховатости [5] либо посредством нанесения специальных покрытий [6; 7]. Однако повышение поглощательной способности металла перечисленными способами отличается достаточно высокой неравномерностью оптических свойств поверхности, и, как следствие, произвольным изменением доли поглощенного лазерного излучения. К недостаткам так же следует отнести снижения производственной технологичности, а также увеличение трудоемкости и продолжительности технологических циклов. Поэтому методы интенсификации процессов лазерной обработки путем увеличения шероховатости и нанесения поглощающих покрытий не получили широкого распространения.

Основные закономерности явлений переноса теплоты, методология исследования механизма и процессов теплообмена [8] показывают, что увеличения эффективности процессов лазерной обработки можно добиться, сократив время, затрачиваемое на нагрев поверхности. Это может быть реализовано наложением воздействия дополнительных источников, доля которых в общей структуре энергетических затрат на реализацию технологического процесса не превышает 1–10 % [9]. Реализация работ в этом направлении позволила к настоящему времени разработать технологии комбинированной обработки, в которых повышение эффективности использования энергии лазерного излучения за счет сопутствующего нагрева, осуществляется наложением воздействия других источников, таких как плазменный [10], дуговой [11], светолучевой [12] и пр. Однако практическое применение в едином технологическом процессе комбинированного лазерного воздействия совместно с сопутствующими источниками нагрева, показало значительный рост размеров зоны термического влияния месте воздействия сопутствующего источника тепла, что в целом оказывает негативное влияние на физико-механические характеристики и эксплуатационную технологичность обработанного изделия.

Таким образом, в теории и практике применения технологических комплексов, при решении актуальной задачи повышения востребованности технологических операций лазерного поверхностного термоупрочнения и сварки возникает противоречие между требованиями к интенсификации процессов обработки, и требованиями к сохранению производственной и эксплуатационной технологичности. Это делает актуальным решение научно-технической проблемы, связанной с сохранением технологичности процессов лазерного термоупрочнения и сварки металлов при повышении эффективности передачи энергии от лазерного излучения.

Работы, выполненные нами ранее [13] показали, что один из возможных путей решения этой проблемы заключается в увеличении степени локализации сопутствующего теплового источника в объеме зоны обрабатываемого материала, путем нагрева обрабатываемой поверхности воздействием модулированного лазерного излучения от парциального источника малой мощности. Импульсы модулированного излучения, нагревая поверхностный слой на глубину менее мкм, создают в локальной зоне условия для наилучшего поглощения излучения основного лазера. Целью исследования является оценка изменения термического КПД процессов нагревания и плавления материалов без разрушения при увеличении поглощательной способности металла нагревом импульсами модулированного излучения от сопутствующего теплового источника.

Методы

В качестве объекта исследования, на примере установки Квант-15, рассмотрим импульсную лазерную обработку сфокусированным лазерным. Типовые технические характеристики установки предполагают значения: длина волны 1,064 мкм, длительность импульса 0,1–6 мс; энергия импульса до 8 Дж, размер пятна в зоне обработки $0,3^{+0,2}-1,3^{+0,2}$ мм.

В работе, на примере воздействия 3 мс импульса лазерного излучения с энергией 6 Дж на листовую прокат, выполним в пакете программ mathcad моделирование тепловых процессов, возникающих в материале. При принятых режимах лазерного воздействия, плотность потока лазерного излучения не превышает 10^9 Вт/см², поэтому влиянием плазмы, поглощающей и рассеивающей лазерное излучение, можно пренебречь и тепловые процессы, возникающие в материале под воздействием лазерных импульсов миллисекундной длительности, удобно описать уравнением теплопроводности, которое в приближении двумерной осесимметричной цилиндрической системы координат (r, z) , имеет вид [14]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T, \quad (1)$$

где:

T — температура;

$\alpha = \frac{\lambda_T}{\rho c}$ — коэффициент температуропроводности;

λ_T — теплопроводность;

ρ — плотность материала;

c — теплоемкость материала.

В приближении нормального падения лазерного излучения, для решения дифференциального уравнения (1) принимаем следующие граничные условия [15]:

Для поверхности, на которую воздействуют импульсом лазерного излучения:

$$-\lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = AI(r) - \rho V_S \Delta H, \quad (2)$$

где:

$I(r)$ — распределение интенсивности излучения в пучке;

A — поглощательная способность облучаемой поверхности (рис. 2);

V_S — скорость фронта испарения материала с поверхности;

ΔH — удельная энтальпия испарения.

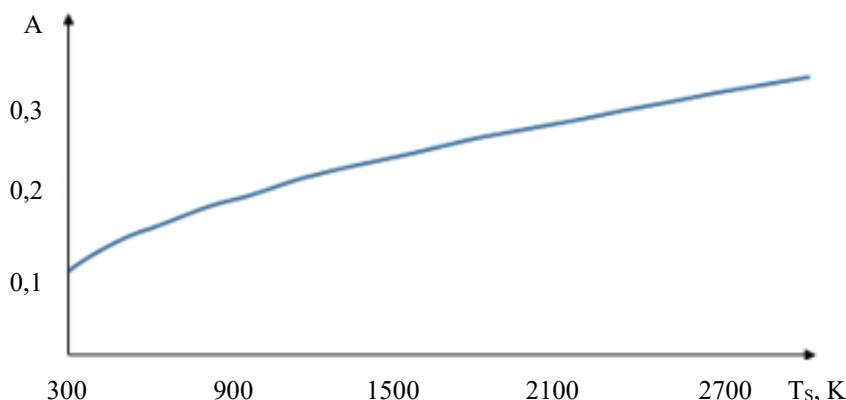


Рисунок 1. Диаграмма зависимости поглощательной способности A от температуры поверхности T_s [16]

Для противоположной (необлучаемой) поверхности пластины толщиной $H_{пл}$ принимаем граничное условие теплоизолированности:

$$-\lambda_T \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=H_{пл}} = 0. \quad (3)$$

Решение тепловой задачи выполняется методом переменных направлений с помощью неявной конечно-разностной схемы. При этом, по ходу решения, интенсивность поверхностного тепловыделения в зоне воздействия луча согласовывается с получаемой температурой поверхности через изменение поглотительной способности поверхности (рис. 1) и величины испарительных потерь. Вклад испарительных потерь в изменение поверхностного тепловыделения удобно учитывать по результатам вычисления скорости движения фронта испарения. В расчетах принимаем, что скорость движения фронта испарения V_S связана функциональной зависимостью с температурой поверхности T_S по закону Герца — Кнудсена:

$$V_S = \frac{0.82}{\rho} \sqrt{\frac{M}{2\pi R_U T_S}} \times P_H, \quad (4)$$

где:

P_H — давление насыщенного пара;

M — молярная масса;

R_U — универсальная газовая постоянная.

$$P_H = 10^5 \exp \left[\frac{L_b}{R_U} \left(\frac{1}{T_V} - \frac{1}{T_S} \right) \right], \quad (5)$$

где:

L_b — удельная теплота испарения материала;

T_V — температура кипения материала.

Результаты

Оценку изменения термического КПД выполним для случая лазерной обработки 3 мс импульсами излучения с энергией 6 Дж реализующих процессы лазерного поверхностного термоупрочнения (диаметр пятна фокусировки 0,8 мм) и сварки металлов (диаметр пятна фокусировки 0,9 мм). В качестве объекта моделирования принимаем черный листовой металлопрокат толщиной 1 мм.

На рисунке 3 приведены зависимости изменения, с течением времени t , интенсивности в центре пучка падающего лазерного излучения I , поглощенной интенсивности $q = I \times A$ и поглотительной способности A в центре пятна лазерного воздействия.

Рисунок 2 иллюстрируют динамику изменения поглощенной интенсивности лазерного излучения и температуры в центре пятна лазерного нагрева на поверхности образца. Видно, что поглощенная поверхностью обрабатываемой детали интенсивность $q(t)$ отличается от распределения интенсивности падающего лазерного излучения $I(t)$ как по амплитуде, так и по форме распределения кривой, т. к. зависящая от температуры поверхности поглотительная способность A нелинейно изменяется. Представленные результаты математического моделирования, описывающие два вида импульсной лазерной обработки (рис. 2 а, б): лазерного термоупрочнения без интенсивного испарения поверхности и сварки, типичны и соответствуют известным зависимостям [16], что показывает на качественную достоверность выполненных расчетов.

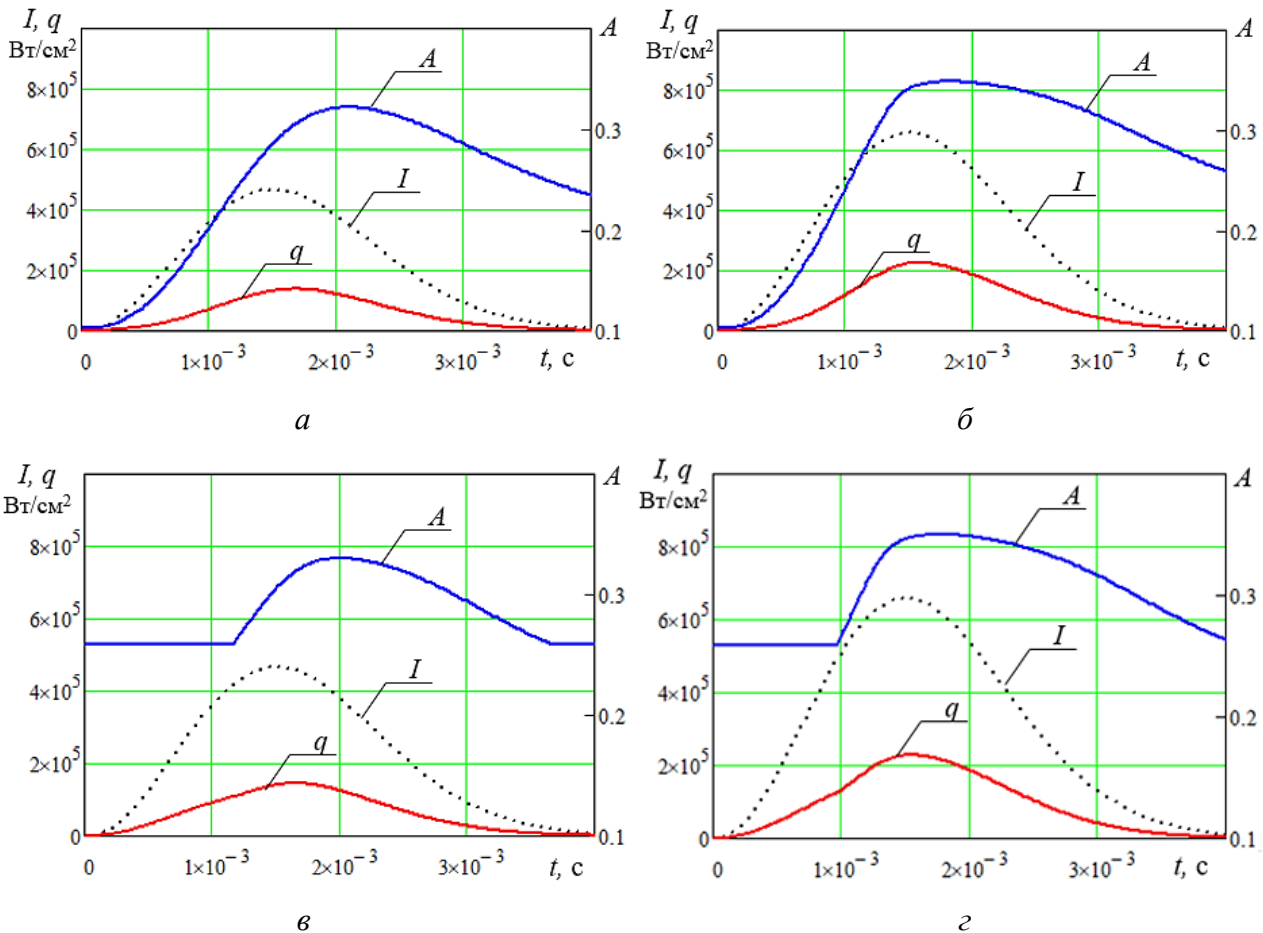


Рисунок 2. Временная зависимость интенсивности лазерного воздействия и поглощательной способности A поверхности при термоупрочнении (а, в) и сварке (б, г): а, б — при импульсной обработке; в, г — при импульсной обработке и сопутствующем нагреве(разработан авторами)

В приближении отсутствия изменения начальной температуры поверхности при сопутствующем нагреве, рассмотрим зависимости изменения с течением времени t поглощенной интенсивности q и температуры поверхности T_s в центре пятна лазерного воздействия. Анализ полученных зависимостей (рис. 2, 3) позволяет выделить следующие последовательные этапы лазерного нагрева:

- начальный этап — на котором поверхность нагревается до температуры плавления T_mFe ;
- второй этап — продолжительность которого ограничена временем достижения максимальной температуры на поверхности;
- третий этап — остывание поверхности.

На начальном этапе воздействия, длительность которого определяется моментом достижения поверхностью температуры плавления T_mFe , при традиционной лазерной обработке импульсами излучения (рис. 2, 3 а, б) поглощательная способность A поверхности нелинейно возрастает по мере роста температуры поверхности металла T_s (рис. 1), что ограничивает темп ввода энергии импульса лазерного излучения и соответственно скорость роста поглощенной интенсивности q отстает от нарастания интенсивности падающего лазерного излучения I . При сопутствующем предварительном нагреве (рис. 2, 3 а, б) поглощательная способность соответствует значениям, достигаемым при температуре плавления поверхности и практически

не изменяется, поэтому скорости нарастания поглощенной интенсивности q и интенсивности падающего лазерного излучения I совпадают, а температура плавления T_{mFe} поверхности достигается быстрее на 10 %.

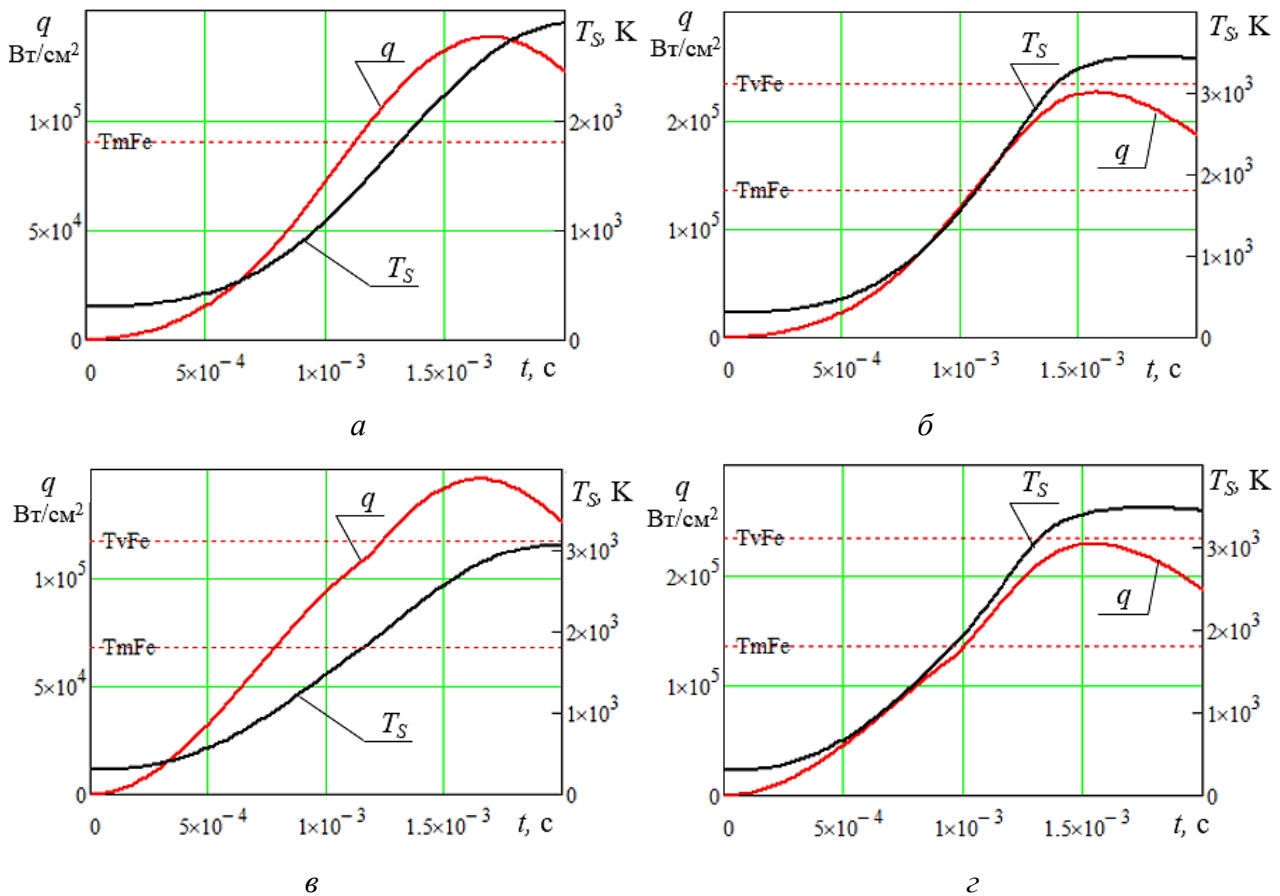


Рисунок 3. Временная зависимость интенсивности лазерного воздействия и температуры поверхности при термоупрочнении (а, в) и сварке (б, г): а, б — при импульсной обработке; в, г — при импульсной обработке и сопутствующем нагреве (разработан авторами)

Продолжительность второго этапа, при неизменной длительности импульса падающего лазерного излучения 3 мс, различается, т. к. из-за разницы в темпе ввода энергии лазерного излучения температура плавления T_{mFe} достигается в разные моменты времени. На этом этапе поглощательная способность A поверхности возрастает во всех случаях, что сопровождается ростом поглощенной интенсивности q . Следует отметить, что при сварке, максимальные значения T_s , достигаемые при воздействии импульса лазерного излучения без и с сопутствующим нагревом, примерно равны и составляют 3 450 и 3 480 К соответственно. Незначительная разность температур сопровождается достижением примерно равных значений A , величина которой достигает 0,35. При этом температура T_s в момент наибольшего нагрева поверхности превышает температуру кипения T_{vFe} во всех случаях обработки, что свидетельствует о начале процесса испарения металла из ванны расплава. Однако при операции сварки превышение температуры кипения не является недостатком, т. к. после окончания действия импульса лазерного излучения, зона испаренного металла заполняется из окружающей ванны расплава.

На втором этапе воздействия при термоупрочнении (см. рис. 3, а, в) максимальные значения T_s , достигаемые при воздействии импульса лазерного излучения без и с сопутствующим нагревом, различаются примерно на 3 % и составляют 2 900 и 3 000 К соответственно. Большая температура поверхности, достигаемая при сопутствующем нагреве

на первом этапе, сопровождается увеличением A , величина которой возрастает с 0,32 до 0,33. Сопутствующий нагрев первом этапе, не приводит к превышению уровня T_{vFe} . Т. о. во всех случаях воздействия сопутствующий нагрев позволяет выполнять заданные технологические операции. При этом инерционность протекания теплофизических процессов сопровождается возникновением разницы достижения кривыми максимума поглощенной интенсивности q и температуры на поверхности T_s . А именно максимальная температура достигается через 2 мс от начала действия импульса, максимум интенсивности которого достигается через 1,5 мс.

На третьем этапе, интенсивность падающего излучения спадает I , поглощательная способность A и температура поверхности спадают с меньшей скоростью. Учитывая, что длительность плавящего импульса не зависит от длительности протекания второго этапа, сравнительную оценку изменения термического КПД удобно выполнить на основании анализа зависимостей изменения температуры T по глубине z образца в центре пятна лазерного воздействия (рис. 4) в момент времени 2 мс от начала действия плавящего импульса.

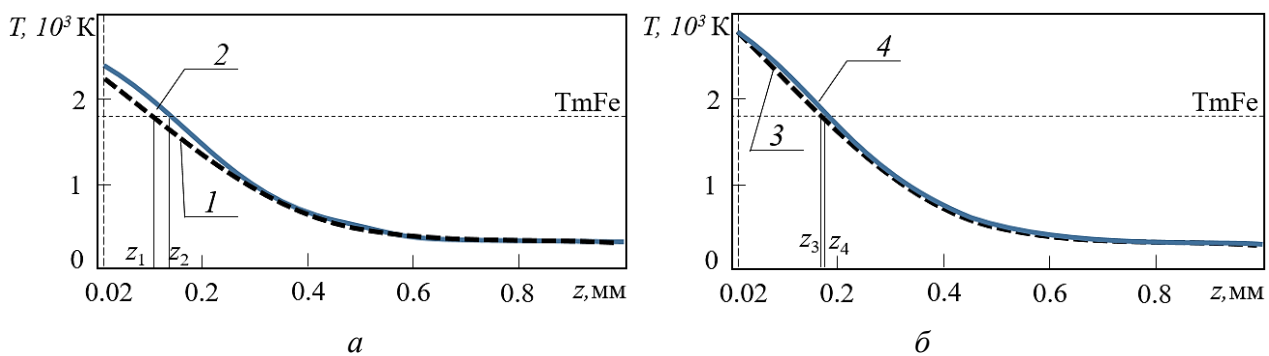


Рисунок 4. Временная зависимость температуры в теле образца при термоупрочнении (а) и сварке (б): 1, 3 — при импульсной обработке; 2, 4 — при импульсной обработке и сопутствующем нагреве (разработан авторами)

Обсуждение

Оценим, как увеличение продолжительности жизни ванны расплава, влияет на термический КПД. На рисунке 5 приведены зависимости динамики температуры в центре пятна лазерного воздействия по глубине z от обрабатываемой поверхности. Видно, что температура плавления T_{mFe} достигается на глубине, величина которой при импульсном термоупрочнении составляет $z_1 = 100$ мкм, а при сопутствующем нагреве возрастает до $z_2 = 125$ мкм. При сварке глубина на которой достигается температура плавления так же увеличивается соответственно с $z_3 = 160$ мкм до 170 мкм. Зная увеличение глубины, до которой распространяется фронт расплавленного металла несложно оценить величину изменения термического КПД как отношение z_2/z_1 и z_4/z_3 . Как видно из приведенных на рисунке 5 результатов, термический КПД при сопутствующем нагреве импульсами модулированного излучения возрастает на 25 % и 6 % при термоупрочнении и сварке соответственно. Меньшая при сварке, по сравнению с термоупрочнением, величина увеличения глубины, на которой металл остается в расплавленном состоянии, связана с меньшим относительным изменением, достигаемых при действии плавящего импульса, значений A и как следствие с меньшим изменением скорости ввода энергии плавящего импульса в металл.

Так же следует отметить, что воздействие дополнительных источников, обеспечивающих сопутствующий нагрев, сопровождается ростом на 1–10 % энергетических затрат в общей структуре энергетических затрат на реализацию технологического процесса [9]. Т. о. применение сопутствующего нагрева для интенсификации процесса лазерной сварки энергетически не

целесообразно, в то время как интенсификация процесса термообработки позволяет повысить энергетическую эффективность на 15–24 %.

Выводы

В статье, выполнено математическое моделирование процесса нагрева импульсным лазерным излучением. На примере воздействия 3 мс импульсами с энергией 6 Дж показана возможность увеличения термического КПД процесса лазерной термообработки на 25 % от имеющихся значений.

Полученные результаты могут представлять практический интерес при разработке новых технологий лазерной закалки с использованием импульсного лазерного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афримович, В.Б. Тенденции развития рынка лазерных технологий для решения задач лазерной обработки материалов. Часть 2. Рынок лазерных технологий в России и Самарской области / В.Б. Афримович, В.С. Казакевич, С.И. Ярьско // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2014. — № т. 16, № 4. — С. 276–286. — EDN SZGRNB.
2. Игнатов А.Г. Рынок лазерных технологий 2004–2015 // Ритм машиностроения. — 2015. — № 7. — С. 28–35. — EDN TWSPXH.
3. Карасёв, В.А. Термический КПД и эффективный коэффициент поглощения лазерного излучения при газолазерной резке низкоуглеродистой стали в струе азота и воздуха / В.А. Карасёв, В.С. Голубев, Е.О. Филиппова // Физика и химия обработки материалов. — 2009. — № 6. — С. 72–77. — EDN ИТЕСУН.
4. Каюков, С.В. Расширение возможностей импульсных YAG-лазеров миллисекундного диапазона длительности в технологии сварки / С.В. Каюков // Квантовая электроника. — 2000. — Т.30. № 11. — С. 941–948. — URL: <https://quantum-electronics.ru/wp-content/uploads/2000/11/1825.pdf>.
5. Альес, М.Ю. Отражение лазерного излучения с гауссовым распределением интенсивности от шероховатой поверхности / М.Ю. Альес, А.И. Калугин, Д.Н. Кочурова, Е.А. Антонов, В.Ю. Трубицын // Химическая физика и мезоскопия. — 2022. — Т. 24. № 4. — С. 454–462. — DOI 10.15350/17270529.2022.4.36.
6. Ахманов, С.А. Воздействие мощного лазерного излучения на поверхность полупроводников и металлов: нелинейно-оптические эффекты и нелинейно-оптическая диагностика / С.А. Ахманов, В.И. Емельянов, Н.И. Коротеев, В.Н. Семиногов // Успехи физических наук. — 1985. — Т. 147. № 12. — С. 675–745. — EDN XPPDIT.
7. Русин, С.П. Изменение оптических свойств системы «оксидная пленка-металл» в процессе роста пленки: компьютерное моделирование / С.П. Русин. // Теплофизика и аэромеханика. — 2012. — Т.19, №5. — С. 643–654. — EDN PEZMJT.
8. Шиганов, И.Н. Лазерная сварка алюминиевых сплавов / И.Н. Шиганов, А.Б. Холопов // Фотоника. — 2010. — №3. Т.21. — С. 6–11. — EDN OAKUTV.
9. Кочуев, Д.А. Формирование порошковых материалов при комбинированном воздействии импульсного лазерного излучения и электрического дугового

- разряда / Д.А. Кочуев // Известия РАН. Серия физическая. — 2020. — Т. 84. № 3. — С. 425–431 — DOI 10.31857/S036767652003014X.
10. Шелягин, В.А. и др. Технологические особенности лазерной, микроплазменной и гибридной лазерной-микроплазменной сварки алюминиевых сплавов / В.А. Шелягин, А.М. Оришич и др. // Автоматическая сварка. — 2014 — № 5(734). — С. 35–42. — EDN TSYUUT.
 11. Лопота, В.А. Новые технологии термообработки, сварки и наплавки материалов с использованием волоконных лазеров большой мощности / В.А. Лопота, Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, Е.В. Земляков, Е.А. Валдайцева // Заготовительные производства в машиностроении. — 2012. — № 10. — С. 6–13. — EDN PFKDER.
 12. Алексеев, Г.Д. Применение лазерно-световых технологий в наноиндустрии / Г.Д. Алексеев, Ю.Н. Булкин, А.И. Грибов, А.И. Мисюров, Б.М. Федоров и др. // Наноиндустрия. — 2008. — № 1. — С. 12–16. — EDN OBQPSZ.
 13. Fedin, A.V. Welding of aluminum alloys by combined radiation / A.V. Fedin, Y.A. Chaschin // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering, Suzdal, 20–26 июня 2001 года / editors: Panchenko V.Y., Golubev V.S.. Vol. 4644. — Suzdal, 2002. — P. 105–108. — DOI 10.1117/12.464118. — EDN OGTGMH.
 14. Метод решения тепловой задачи для моделирования процесса проплавления при комбинированном лазерном воздействии / Ю.А. Арутюнов, А.А. Дробязко, Е.А. Чащин и др. // Фундаментальные исследования. — 2017. — № 8-1. — С. 14–20. — EDN ZELKJP.
 15. Манако, В.В. Аналитическое решение задачи нагрева образца движущимся лучом лазера / В.В. Манако, В.А. Путилин // Вестн. СамГТУ. Сер.: Физ.-мат. науки. — 2009. — No 1(18). — С. 206–213. — EDN KZZXQF.
 16. Бирюков, В.П. Изменение структуры и свойств сталей при лазерном упрочнении / В.П. Бирюков // Фотоника. — 2012 — № 3 — С. 22–26. — EDN OXNPXB.

Chaschin Yevgeny Anatolievich

The Kovrov State Technological University named after V.A. Degtyarev, Kovrov, Russia
E-mail: kanircha@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4000-0035>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=42261

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6506540880>; https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=6507486248

Shilov Igor Vyacheslavovich

The Kovrov State Technological University named after V.A. Degtyarev, Kovrov, Russia
E-mail: shilov@dksta.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=42266

Molokin Yurzij Valentinovich

The Kovrov State Technological University named after V.A. Degtyarev, Kovrov, Russia
E-mail: molokin@dksta.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1199093

Intensification of thermal cycle processes using pulsed laser radiation

Abstract. In engineering practice, laser processing systems operating in pulse generation modes with durations of 0,1–6 ms are often used to perform heating and melting operations without damaging the surface. However, practical experience with these systems demonstrates lower energy efficiency compared to laser cutting, limiting the widespread use of laser hardening and welding processes. One reason for this reduced energy efficiency is the high reflectivity of metal surfaces, which leads to a decrease in the thermal efficiency of the laser heating process due to a reduced proportion of laser radiation absorbed by the treated surface. The reflectivity of metal depends nonlinearly on surface temperature and changes during heating with a laser pulse. This makes it important to increase the thermal efficiency of pulsed laser metalworking without damaging the surface by using an additional source that preheats the surface to melting temperature. In the article, on the example of the laser technological complex of the type «Kwant-15», generating at a wavelength of 1,064 μm pulses of 3 ms duration with an energy of 6 J, the simulation of the process of laser processing without destruction of the surface for a metal plate, 1 mm thick, is performed. According to the results of modeling in the Mathcad software package, taking into account the dependence of the absorption coefficient of the surface on its temperature, the possibility of increasing the thermal efficiency of the technological operation of laser processing without destruction of the surface is considered. It has been shown that the use of concomitant heating to intensify the laser welding process is not energetically feasible, while the intensification of the heat treatment process allows for an increase in thermal efficiency of up to 25 % compared to the thermal efficiency of traditional laser processing.

Keywords: thermal efficiency; laser radiation; modeling; welding; heat transfer; reflectivity; heating