

ВЛИЯНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

В. Ю. ХАСКИН^{1,2}, В. Н. КОРЖИК^{1,2}, Т. Г. ЧИЖСКАЯ³, В. Н. СИДОРЕЦ², ЛО ЗИЕ¹

¹Гуандунский Институт сварки (Китайско-украинский институт сварки им. Е. О. Патона), Гуанчжоу, Китай

²ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

³НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», г. Киев-56, пр-т Победы, 37.

В связи с высокой отражающей способностью меди принято считать, что лазерная сварка изделий из этого материала нецелесообразна. Однако в современной промышленности периодически возникают задачи соединения деталей из меди и ее сплавов узкими сварными швами с глубоким кинжальным проплавлением. При этом по техническим причинам использование электронно-лучевой сварки не всегда возможно, а достаточно широкая доступность волоконных (длина волны 1,07 мкм) и дисковых (длина волны 1,03 мкм) технологических лазеров последнего поколения делает задачу лазерной сварки таких материалов актуальной. Поэтому целью работы служило изучение условий поглощения лазерного излучения с длиной волны 1,03...1,07 мкм медью и ее сплавами при лазерной сварке с глубоким проплавлением, а также определение основных параметров режима сварки и оценка эффективности процесса. В работе показано, что для определенного сочетания толщины медного сплава и плотности мощности излучения с длиной волны 1,03...1,07 мкм, существует такая оптимальная скорость процесса сварки, при которой его технико-экономическая эффективность максимальна. Эта скорость должна быть такой, чтобы поглощательная способность (интегральная по пятну лазерного нагрева) составляла порядка 13...15 %. Превышение скорости сварки приводит к резкому снижению поглощательной способности, а, следовательно, необходимости повышения мощности излучения и удорожанию процесса. Уменьшение скорости сварки относительно оптимальной приводит к снижению производительности, перегреву металла в сварочной ванне и к таким дефектам формообразования шва, как провисание и выплески металла. Библиогр. 11, рис. 8.

Ключевые слова: лазерная сварка, медь, излучение твердотельного лазера, коэффициент поглощения, мощность излучения, скорость сварки

Одной из актуальных проблем современной науки и техники в области сварки металлов плавлением является создание новых источников тепла, которые позволяют управлять концентрацией тепловой энергии, вводимой в металл в процессе сварки. Это, в конечном итоге, дает возможность обеспечить требуемые производительность сварки, качество получаемого сварного соединения, стабильность процесса и воспроизводимость его результатов. В качестве такого управляемого источника тепла для сварки металлических материалов в последние десятилетия все чаще используется высококонцентрированный лазерный источник, который реализуется путем теплового воздействия на свариваемый металл сфокусированным лазерным пучком [1].

Вместе с тем закономерности влияния лазерного источника тепла на некоторые металлические материалы изучены пока что недостаточно. К таким материалам, в частности, относится медь и ее сплавы. В связи с высокой отражающей способностью меди принято считать, что лазерная сварка изделий из этого материала нецелесообразна. Однако в современной промышленности периодически возникают задачи соединения деталей из меди и ее сплавов

узкими сварными швами с глубоким кинжальным проплавлением. При этом по техническим причинам использование электронно-лучевой сварки не всегда возможно, а достаточно широкая доступность волоконных (длина волны 1,07 мкм) и дисковых (длина волны 1,03 мкм) технологических лазеров последнего поколения делает задачу лазерной сварки таких материалов актуальной [2].

Для решения этой задачи необходимо провести исследование физики процесса воздействия лазерного источника тепловой энергии на свариваемый металл с высокой теплопроводностью и отражающей способностью, которым является медь и ее сплавы, разработать соответствующие математические модели и выполнить компьютерное моделирование указанного процесса. При этом целесообразно оценить эффективность процесса лазерной сварки таких материалов путем определения основных параметров режима, т. е. необходимых затрат мощности излучения для сварки с соответствующей скоростью.

Поэтому целью данной работы является изучение условий поглощения лазерного излучения с длиной волны 1,03...1,07 мкм медью и ее сплавами при лазерной сварке с глубоким проплавлени-

нием, а также определение основных параметров режима сварки и оценка эффективности процесса.

Лазерная сварка характеризуется образованием парогазового канала проплавления в свариваемом металле. В работе [2] детально описано поведение этого канала в процессе сварки. В частности, отмечено, что на его передней стенке существует слой расплавленного металла, испытывающий постоянные «возмущения», как то образование искривления в виде ступеньки, которая периодически перемещается по высоте канала. При этом удаление материала с передней стенки осуществляется послойно при перемещении ступеньки сверху вниз. Это можно объяснить увеличением слоя расплавленного металла на передней стенке, происходящим за счет перехода энергии излучения в выделяющуюся на этой стенке тепловую энергию, в сочетании с происходящими в сварочной ванне гидродинамическими процессами.

Известно, что часть энергии излучения поглощается свариваемым металлом, а часть отражается от него. Доля поглощенного излучения тем больше, чем выше температура металла. Образовавшийся на передней стенке расплав хорошо поглощает излучение, однако за счет перемещения по ходу сварки передняя часть лазерного пучка все время попадает на слабо нагретый металл, что приводит к снижению коэффициента поглощения. Поэтому при лазерной сварке одновременно наблюдаются два процесса:

- улучшение условий поглощения лазерного излучения за счет попадания его на нагретый и расплавленный металл передней стенки парогазового канала, а также улавливания определенной доли излучения за счет его переотражения от стенок канала;

- интенсивное отражение лазерного излучения слабо нагретым металлом, находящимся непосредственно перед парогазовым каналом по ходу сварки.

Для оценки условий поглощения сфокусированного лазерного излучения медью и ее сплавами при лазерной сварке предположим, что плоский образец нагревается источником тепла высокой интенсивности, а пространственное распределение теплового потока, вводимого в образец, симметрично относительно оси, перпендикулярной его поверхности (относительно оси лазерного пучка). Длину волны излучения, применяемого для сварки твердотельного лазера, принимаем равной $\lambda = 1,06$ мкм, как входящую в исследуемый диапазон $1,03 \dots 1,07$ мкм.

Для определения температурной зависимости коэффициента поглощения лазерного излучения металлическими материалами $A(T_s)$ будем рассматривать исследуемый металл (медь) в рамках мо-

дели почти свободных электронов. В этом случае, согласно формулам Друде–Зинера [3], для действительной ϵ_1 и мнимой ϵ_2 частей комплексной диэлектрической проницаемости металла на частоте лазерного излучения $\omega = 2\pi c/\lambda$, где c — скорость света, λ — длина волны излучения, имеем:

$$\epsilon_1 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_C^2}; \quad (1)$$

$$\epsilon_2 \omega = 4\pi\sigma = \frac{\omega_C \omega_p^2}{\omega^2 + \omega_C^2}. \quad (2)$$

Здесь ω_p — частота плазменных колебаний свободных электронов металла, ω_C — частота, численно равная обратному времени релаксации электронов проводимости. Величина плазменной частоты определяется по формуле:

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi n e N_e}{m_e^*}, \quad (3)$$

в которой e и m_e^* — заряд и эффективная масса электрона в металле [4]. Концентрация электронов проводимости $N_e = V/\Omega$ определяется через валентность V и атомный объем Ω . Значение валентности для меди принималось равным двум. Атомный объем был получен на основе экспериментальных данных по плотности меди, приведенных в работе [5].

В предельном случае постоянного поля, когда $\omega = 0$, высокочастотная оптическая проводимость σ превращается в статическую проводимость металла:

$$\sigma(0) = \frac{N_e e^2}{m_e \omega_C}. \quad (4)$$

Температурную зависимость частоты релаксации ω_C для рассматриваемых металлов в твердом состоянии учитывали с помощью следующей формулы [6]:

$$\omega_C = K T^{\theta/5} \int_0^{\theta/T} \frac{z^4 dz}{e^z - 1}, \quad (5)$$

где θ — температура Дебая. Значения ω_C и, соответственно, K при комнатной температуре для меди выбирались в соответствии с данными работы [7]. Для меди в жидком состоянии использовались экспериментальные значения из работ [8, 9]. Полученные таким образом расчетные данные приведены на рис. 1.

Представленная на этом рисунке температурная зависимость имеет характерный разрыв при температуре плавления металла T_m . По формулам (1) и (2) с использованием (3)–(5) были построены температурные зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости для меди на частоте излучения твердотельного лазера ($\lambda = 1,06$ мкм), изображен-

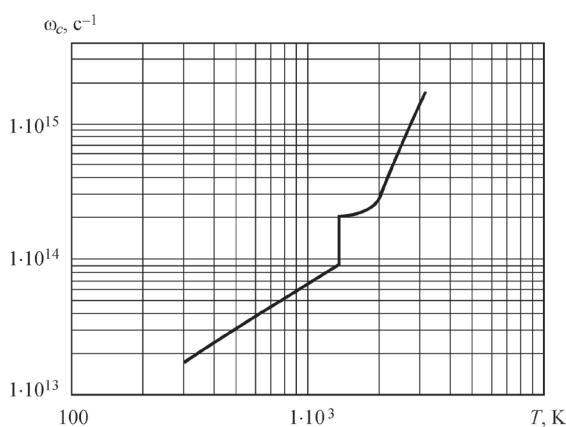


Рис. 1. Зависимость частоты релаксации ω_c от температуры T для меди

ные на рис. 2 (здесь и далее температура выражена в градусах Кельвина).

Для дальнейших расчетов удобно ввести действительную n и мнимую k части комплексного показателя преломления металла на частоте лазерного излучения

$$\sqrt{\varepsilon} = \sqrt{\varepsilon_1 + i\varepsilon_2} = n + ik, \quad (6)$$

используя для этого следующие формулы:

$$n = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1}{2}}, \quad (7)$$

$$k = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1}{2}}. \quad (8)$$

Температурные зависимости действительной и мнимой части комплексного показателя преломления для меди представлены на рис. 3.

Используя полученные значения n и k , определим коэффициент поглощения лазерного излучения, нормально падающего на плоскую поверхность металла (поглощательную способность), по известной формуле

$$A = \frac{4n}{(1+n)^2 + k^2}. \quad (9)$$

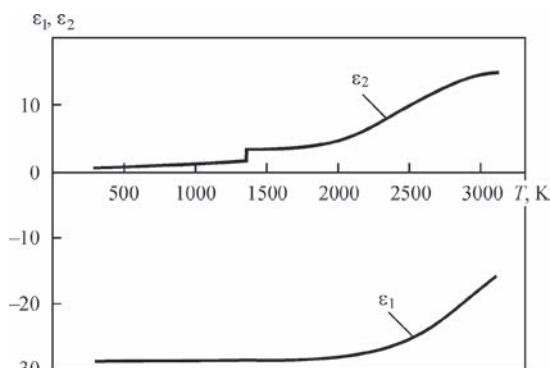


Рис. 2. Зависимости действительной ε_1 и мнимой ε_2 частей комплексной диэлектрической проницаемости меди от температуры T на частоте излучения твердотельного лазера ($\lambda = 1,06$ мкм)

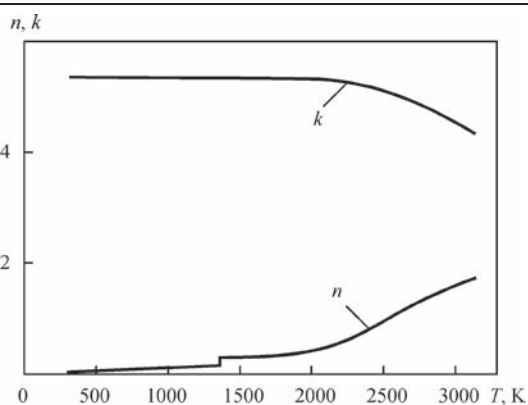


Рис. 3. Зависимости действительной n и мнимой k части комплексного показателя преломления меди от температуры T на частоте излучения твердотельного лазера ($\lambda = 1,06$ мкм)

В некоторых случаях более важным параметром является коэффициент отражения (отражательная способность), который можно определить по формуле

$$R = 1 - A = \frac{(1-n)^2 + k^2}{(1+n)^2 + k^2}. \quad (10)$$

На рис. 4 представлены результаты расчетов температурных зависимостей коэффициента поглощения излучения твердотельного лазера для меди в диапазоне температур от комнатной до температуры кипения металла T_b и выше.

Полученная для выбранного типа излучения расчетная зависимость поглощательной способности сравнивалась с имеющимися экспериментальными данными [6–9], при этом совпадение было вполне удовлетворительным. Согласно зависимости, приведенной на рис. 5, для достижения максимальных значений коэффициента поглощения поверхности свариваемого медного сплава в зоне действия лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм, ее следует нагревать до температуры кипения T_b . Однако даже нагрева до температуры плавления T_m достаточно для резкого скачкообразного увеличения поглощательной способности с 2,0...2,5 до 4,5...5,0 %.

Для определения распределений температур по глубине и на поверхности свариваемого сфокуси-

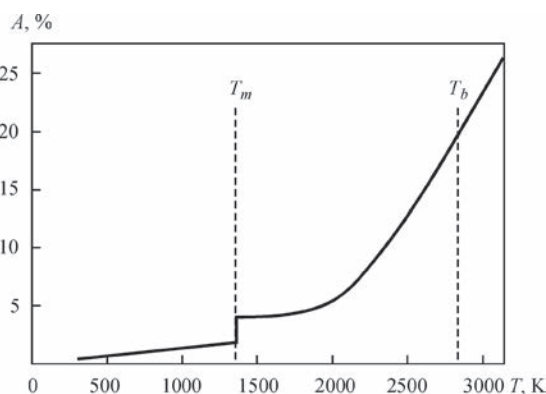


Рис. 4. Зависимости поглощательной способности A меди от температуры T для излучения с длиной волны 1,06 мкм

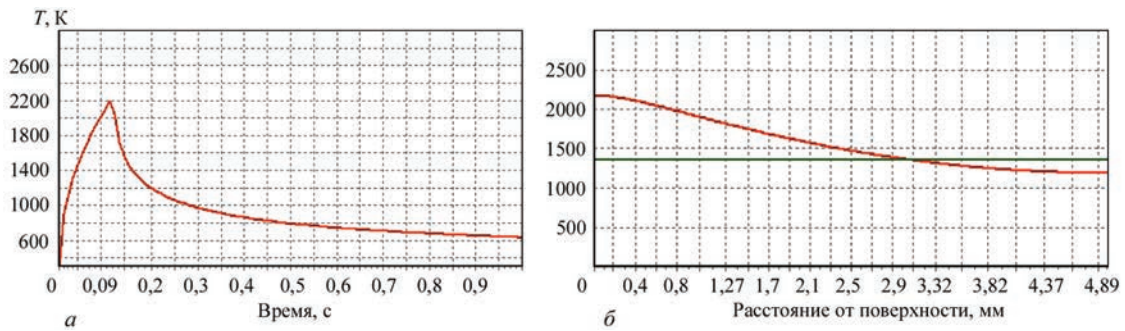


Рис. 5. Распределение температур T на поверхности (a) и по глубине (b) медной пластины толщиной 5 мм при лазерной сварке излучением твердотельного лазера ($A = 13\%$) с плотностью мощности $4,5 \cdot 10^7$ Вт/см² и скоростью $v_{св} = 90$ м/ч (25 мм/с)

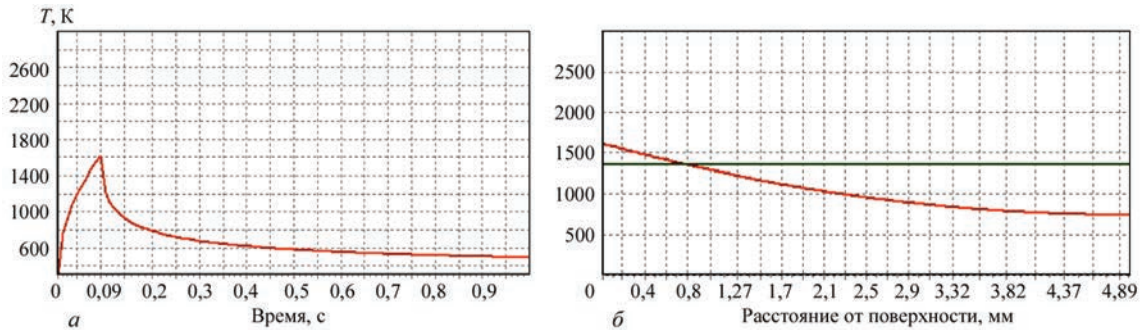


Рис. 6. Распределение температур T на поверхности (a) и по глубине (b) медной пластины толщиной 5 мм при лазерной сварке излучением твердотельного лазера ($A = 10\%$) с плотностью мощности $4,5 \cdot 10^7$ Вт/см² и скоростью $v_{св} = 120$ м/ч (33,3 мм/с)

рованным лазерным излучением медного образца был проведен расчет методом конечных разностей с привлечением неявной разностной схемы. Для этого применили компьютерный программный продукт собственной разработки, основанный на расчетно-экспериментальной методике, описанной в работе [10]. При проведении расчетов использовали теплофизические характеристики меди, приведенные в работе [11]. Получаемые в процессе компьютерного моделирования данные сравнивались с результатами экспериментов. При проведении последних использовали дисковый лазер модели TruDisk 10002 (фирма «TRUMPF», Германия) мощностью до 10,0 кВт. Для перемещения сварочной головки использовали робот модели KR 60 HA (фирма «KUKA», Германия). Сварку образцов из меди типа M1 размером 100×50×3 мм выполняли в защите аргона наплавочными швами и встык с плотностью мощности лазерного излучения $4,5 \cdot 10^7$ Вт/см².

Исследования показывают, что для фиксированной толщины провариваемого образца (в нашем случае $\delta = 3$ мм) можно подобрать такую скорость сварки v_{opt} , при которой не более одной трети длины теплового источника (т. е. диаметра лазерного излучения) постоянно действует на твердую поверхность меди, находящуюся непосредственно перед парогазовым каналом по ходу сварки. В этой области поглощательная способность поверхности A изменяется от 2,0 до 5,0 %. Примерно две трети длины теплового источника (т. е. диаметра лазерного излучения) в таком случае будут попадать в парогазовый канал, тем-

пература в котором достигает не менее 2900 К, а поглощательная способность — 19...20 %. Такая скорость сварки составляет порядка $v_{opt} \approx 25$ мм/с (90 м/ч). Она обеспечивает интегральную по пятну лазерного нагрева поглощательную способность в пределах 13...15 %. В этом случае глубина провара составит не менее 3 мм (см. рис. 5).

С повышением скорости сварки $v_{св} \geq v_{opt}$ доля лазерной энергии, приходящаяся на область с низкой поглощательной способностью, будет повышаться, а часть этой энергии, приходящаяся на область с высокой поглощательной способностью, наоборот — падать. Это приведет к снижению интегральной поглощательной способности менее 13 % и, следовательно, необходимости повышения мощности лазерного излучения. Последний момент приведет к росту стоимости погонного метра сварного шва и соответственному понижению технической и экономической эффективности процесса. В этом случае глубина провара составит значительно меньше необходимых 3 мм, что приведет к непровару (рис. 6).

С понижением скорости сварки относительно выбранной ($v_{св} \leq v_{opt}$) большая часть излучения будет попадать в парогазовый канал, и поглощательная способность повысится свыше 15 %. Однако в этом случае производительность процесса снизится ($v_{св} \leq 16,7$ мм/с или $v_{св} \leq 60$ м/ч), и он станет менее эффективным. В этом случае глубина провара значительно превысит необходимые 3 мм, что приведет к таким дефектам формообразования, как провисание и выплески металла шва (рис. 7).

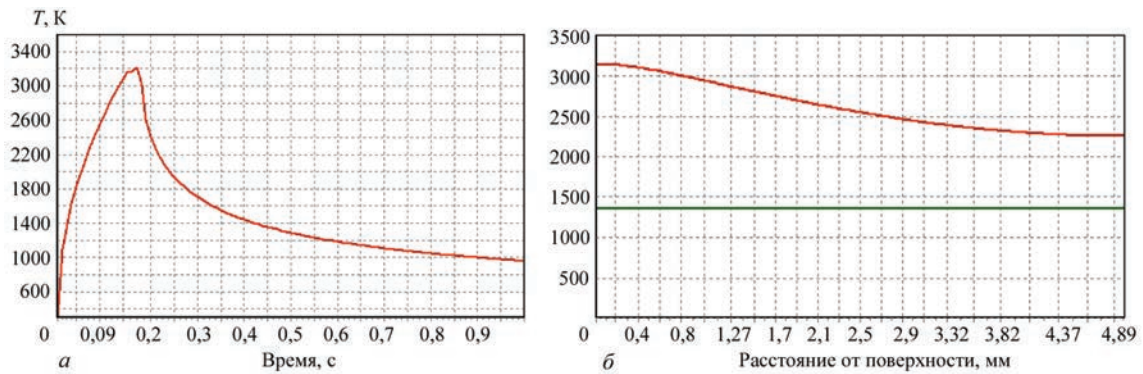


Рис. 7. Распределение температур T на поверхности (а) и по глубине (б) медной пластины толщиной 5 мм при лазерной сварке излучением твердотельного лазера ($A = 17\%$) с плотностью мощности $4,5 \cdot 10^7$ Вт/см² и скоростью $v_{св} = 60$ м/ч (16,7 мм/с)

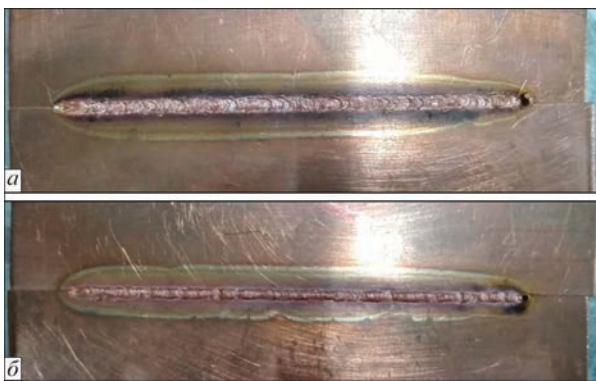


Рис. 8. Стыковое соединение листовой меди М1 ($\delta = 3$ мм), полученное лазерной сваркой в аргоне излучением с плотностью мощности $4,5 \cdot 10^7$ Вт/см² и скоростью $v_{св} = 90$ м/ч (25 мм/с): а — верх; б — низ

Для выполнения экспериментальной проверки спрогнозированных результатов лазерной сварки на плоских образцах выполняли наплавочные швы, затем измеряли глубину проваров по макрошлифам и сопоставляли с расчетными данными. Кроме этого, на расчетных режимах сваривали стыковые соединения (рис. 8). Такая проверка позволила установить, что точность расчетов составляет порядка 5...8 %, что в случае технологических расчетов является удовлетворительным показателем.

Таким образом, изучение условий поглощения лазерного излучения с длиной волны 1,03...1,07 мкм при сварке с глубоким проплавлением меди и ее сплавов позволяет утверждать, что для определенного сочетания толщины свариваемого материала и плотности мощности излучения существует такая оптимальная скорость процесса, при которой его технико-экономическая эффективность максимальна. Эта скорость соответствует интегральной по пятну лазерного нагрева поглощательной способности порядка 13...15 %. Превышение скорости сварки приводит к резкому снижению поглощательной способности, а, следовательно, необходимости повышения мощности излучения и удорожанию процесса. Уменьшение скорости сварки относительно опти-

мальной приводит к снижению производительности, перегреву металла в сварочной ванне и к таким дефектам формообразования шва, как провисание и выплески металла.

Работа выполнялась при поддержке Программы иностранных экспертов КНР № WQ20124400119, Программы инновационной группы провинции Гуандун КНР № 201101C0104901263, Гуандунского научно-технического проекта № 2015A050502039, Гуандунского научно-технического проекта № 2016B050501002.

1. Григорьянц А. Г. Лазерная техника и технология; в 7 кн.; кн. 5. Лазерная сварка металлов: учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Высшая школа, 1988 – 207 с.
2. Бернадский В. Н. Современный рынок лазерной техники для сварки и обработки материалов / В. Н. Бернадский, В. Д. Шелягин, О. К. Маковецкая // Автоматическая сварка. – 2007. – № 10. – С. 53–59.
3. Носков М. М. Оптические и магнитооптические свойства металлов / М. М. Носков. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. – 219 с.
4. Киселев А. И. Эффективная масса электронов в расплавах алюминия, цезия и бинарной системы Al–3 at % Ce / А. И. Киселев, Л. А. Акашев, В. И. Кононенко // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74, Вып. 3. – С. 20–23.
5. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник / В. Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
6. Ujihara K. Reflectivity of metals at high temperatures / K. Ujihara // Journal of Applied Physics. – 1972. – Vol. 43, № 5. – P. 2376–2383.
7. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared / M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell [et. al] // Applied Optics. – 1983. – Vol. 22, № 7. – P. 1099–1119.
8. Miller J. Optical properties of liquid metals at high temperatures / J. Miller // Phil. Mag. – 1969. – Vol. 20, Is. 168, № 12. – P. 1115–1132.
9. Comins N. R. The optical properties of liquid metals / N. R. Comins // Phil. Mag. – 1972. – Vol. 25, Is. 4. – P. 817–831.
10. Хаскин В. Ю. Расчетно-экспериментальный метод определения параметров режимов процессов лазерной наплавки / В. Ю. Хаскин // Наука та інновації. – 2012. – Т. 8, № 6. – С. 5–16.
11. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник / В. Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.

Поступила в редакцию 11.10.2016