

УДК 621.791.725

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ И НАПЛАВКЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Г. А. БАЕВИЧ, А. В. МАКСИМЕНКО, В. Н. МЫШКОВЕЦ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
университет имени Ф. Скорины»,
Республика Беларусь*

Введение

Получение соединений из низко- и среднелегированных конструкционных сталей при наплавке связано со значительными трудностями, которые заключаются в повышенной склонности к образованию трещин и сложностью получения физико-механических свойств наплавленного металла, равноценных свойствам основы.

Детали из высокопрочных сталей проходят термическую обработку (обычно они закаленные и низкоотпущенные). В процессе наплавки на поверхность таких деталей вследствие неравномерного нагрева и охлаждения в разных зонах соединения происходят различные структурные превращения. На одних участках образуются закалочные структуры, обладающие повышенной твердостью и хрупкостью, на других металл подвергается высокому отпуску и имеет пониженную твердость. Разупрочнение стали от 5 до 30 % происходит в зоне термического влияния (ЗТВ), что необходимо учитывать при проектировании технологических процессов наплавки высокопрочных сталей. Структура и свойства материала в каждой точке ЗТВ зависят от длительности его пребывания в интервалах температур, определяемых температурами фазовых превращений. Поэтому для формирования однородных структур в основном и наплавляемом металлах необходимо сокращать время пребывания материала в тех температурных условиях, в которых структура и свойства материала ухудшаются [1].

Целью данной работы является определение пространственно-энергетических и временных параметров импульса лазерного излучения, обеспечивающего плавление и перенос присадочного материала на основу с минимальным испарением металла, и формирование наплавленного слоя с физико-механическими свойствами, равноценными свойствам основы.

Экспериментальная часть

Для определения пространственно-энергетических и временных параметров импульса, обеспечивающего плавление и перенос присадочного материала на основу с минимальным испарением металла, выполнено моделирование процесса лазерной наплавки на основу из стали 30ХГСН2А присадкой диаметром $d = 0,2$ мм из того же материала. Расчет температурных полей проводился в рамках трехмерной конечно-элементной модели. В ходе моделирования решалось нелинейное уравнение теплопроводности [2]–[5] с учетом зависимости теплофизических свойств материала от температуры (рисунок 1) [6]. Распределение плотности мощности лазерного излучения по сечению пучка считалось однородным.

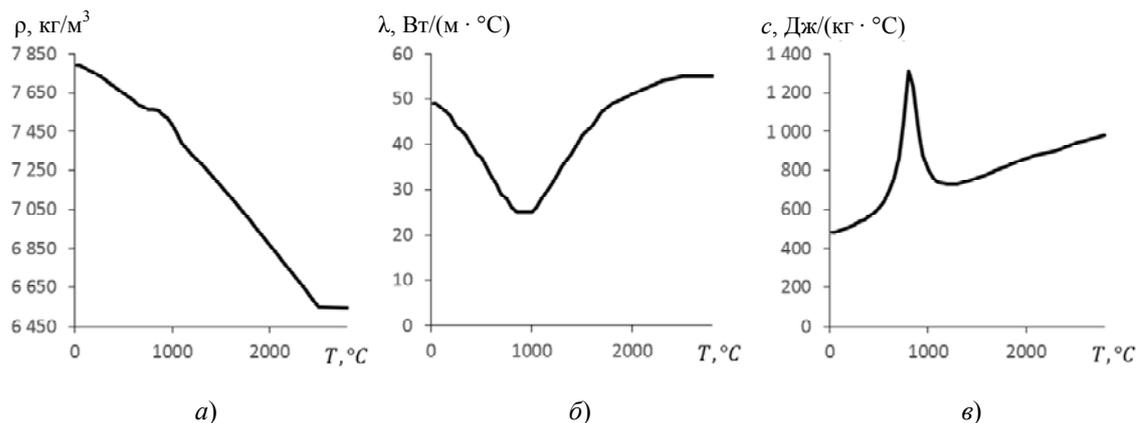


Рис. 1. Зависимость теплофизических свойств стали 30ХГСН2А от температуры: а – плотность; б – коэффициент теплопроводности; в – удельная теплоемкость

Зависимость плотности мощности лазерного излучения от времени описывается системой уравнений (1):

$$p(t) = \begin{cases} \frac{2T_m\lambda}{t_1\sqrt{\alpha\pi}}\sqrt{t}, & 0 < t \leq t_1, \\ \frac{2T_m\lambda}{t_1\sqrt{\alpha\pi}}(\sqrt{t} - \sqrt{t-t_1}), & t_1 < t \leq t_2, \\ \frac{2T_m\lambda}{(t_3-t_2)\sqrt{\alpha\pi}}\sqrt{t-t_2} + p(t_2), & t_2 < t \leq t_3, \\ p(t_3)e^{-\frac{t-t_3}{\tau}}, & t_3 < t \leq t_4, \end{cases} \quad (1)$$

где λ – удельная теплопроводность материала присадки; α – температуропроводность материала присадки; T_m – температура плавления материала присадки; t_1 – время окончания первого фронта импульса; t_2 – время окончания второго фронта импульса; t_3 – время окончания третьего фронта импульса; t_4 – время окончания четвертого фронта импульса; τ – время спада четвертого фронта импульса.

Данный импульс имеет крутой первый фронт, достигающий максимального значения, соответствующего плотности мощности, необходимой для плавления поверхности присадочного материала в зоне воздействия лазерного излучения, убывающий второй фронт, обеспечивающий плавление всего объема присадочного материала. При воздействии крутого третьего фронта происходит отрыв расплавленного металла присадочного материала под действием силы давления отдачи, возникающей при испарении металла с поверхности расплава. Четвертый фронт импульса за счет относительно медленного снижения интенсивности излучения способствует заполнению расплавленным металлом углубления, образовавшегося в начальной части импульса, а также формированию наплавленного валика до момента начала кристаллизации металла [7].

Общий вид модели, конечно-элементное разбиение и схема воздействия лазерного излучения на поверхность присадки и основы представлены на рис. 2. Лазерный пучок фокусируется таким образом, что 50 % энергии поглощается присадкой, а 50 % металлом основы (рис. 2, а). В течение времени $0 < t \leq t_2$ металл присадки в области воздействия лазерного излучения нагревается и плавится, в момент времени t_3 капля расплава под действием сил тяжести и отдачи, возникающей при испарении с поверхности металла, отрывается от присадки, падает на основу и растекается по ней. Четвертый

фронт лазерного импульса за время $t_4 < t \leq t_3$ способствует формированию наплавленного валика. Формирование продольного валика обеспечивается в результате наплавки последовательно расположенных отдельных, перекрывающихся между собой, локальных наплавов с коэффициентом перекрытия 0,5 (рис. 2, б).

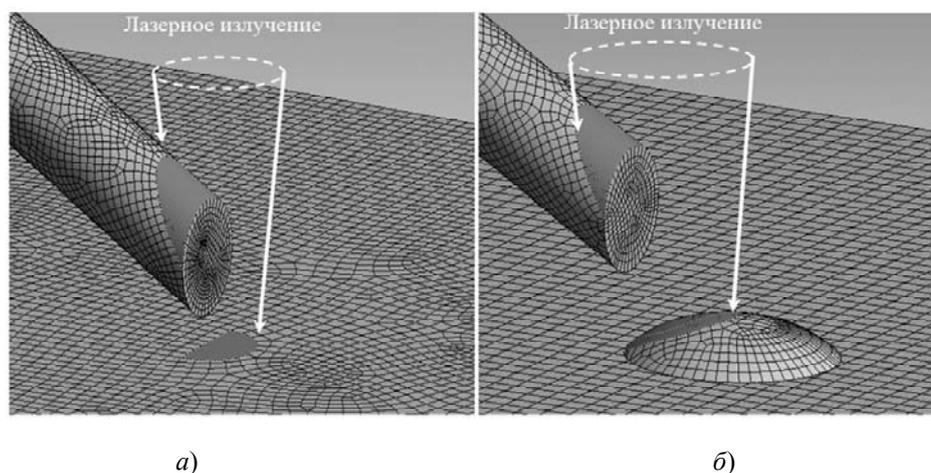


Рис. 2. Конечно-элементное разбиение и схема воздействия лазерного излучения на присадку и основу:
 а – воздействие лазерного излучения на поверхность присадки и основы при формировании первой локальной наплавки; б – воздействие лазерного излучения на поверхность присадки и первой локальной наплавки при формировании второй локальной наплавки

В результате проведенных исследований установлена форма, временные и энергетические параметры импульса лазерного излучения для плавления присадки из стали 30ХГСН2А диаметром 0,2 мм (рис. 3).

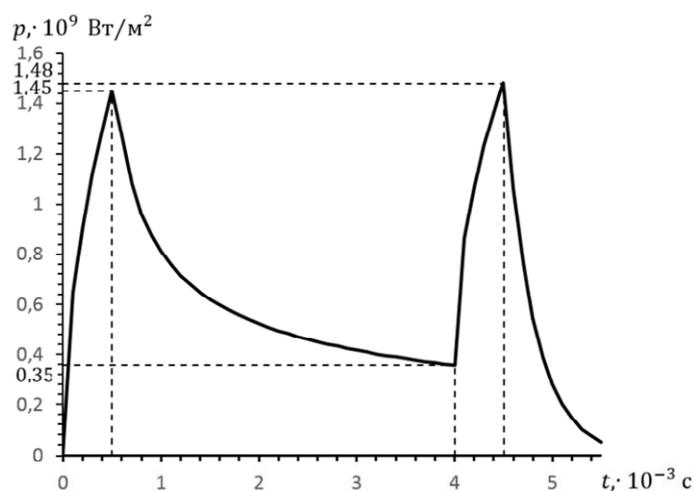


Рис. 3. Форма импульса лазерного излучения для плавления присадки из стали 30ХГСН2А диаметром 0,2 мм

Рассмотрим формирование трехслойного покрытия при наплавке на основу из стали 30ХГСН2А присадкой диаметром $d = 0,2$ мм из того же материала. После наплавки первого валика ($h = 90$ мкм) при использовании импульсов данной формы образуется зона закалки, ширина которой составляет 50 мкм (рис. 4, а, з).

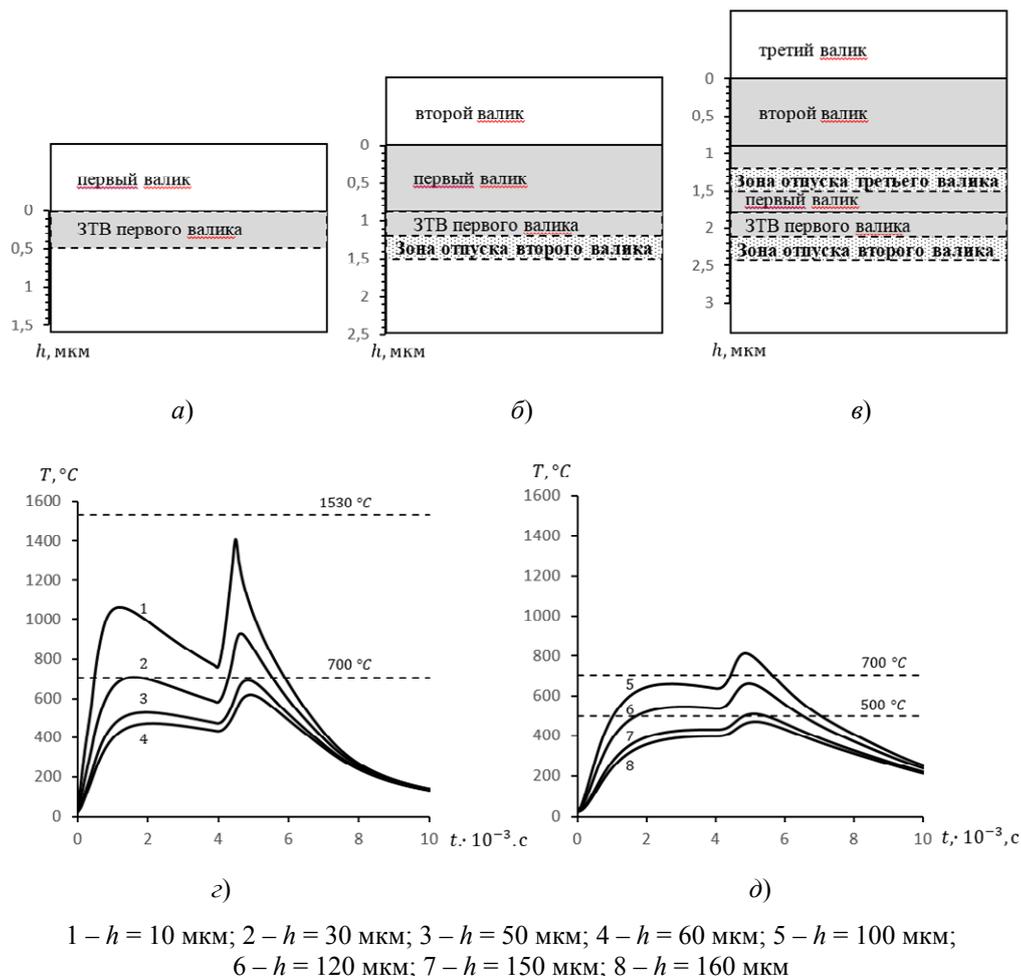


Рис. 4. Схема реализации и термические циклы наплавки валиками с отпуском закаленных зон основы:

а – схема наплавки первого валика; б – схема наплавки второго валика;
в – схема наплавки третьего валика; г – термический цикл при наплавке первого валика; д – термический цикл при наплавке второго валика

При наплавке второго валика формируются зона закалки и зона отпуска, частично охватывающая зону закалки ($h = 120\text{--}150$ мкм от поверхности наплавки слоя), возникающую после наплавки первого валика (рис. 4, б, д). Наплавка третьего валика также сопровождается формированием зон отпуска таких же размеров (рис. 4, в).

При наплавке третьего валика зона отпуска должна полностью охватить зону закалки, не отпущенную при наплавке предыдущих слоев ($h = 120\text{--}210$ мкм) (рис. 4, в), однако при использовании данной формы импульса зона отпуска составляет ($h = 120\text{--}150$ мкм). Таким образом, многослойная наплавка сопровождается образованием чередующихся структур с повышенной и пониженной твердостью.

Для повышения однородности распределения микротвердости в наплавляемом металле и ЗТВ наплавка каждого последующего валика должна производиться при условии прогрева сечения предыдущего валика до температур несколько ниже точки A_{c1} . Термический цикл в этой зоне должен быть организован таким образом, чтобы в ней наблюдались минимальные значения температуры нагрева и минимальные длительности пребывания металла при температуре выше температуры отпуска. В результате такого воздействия металл предыдущих валиков, а также металл ЗТВ могут изменять свою структуру до равновесного состояния [8].

Дальнейшие исследования показали, что для формирования зоны отпуска требуемой ширины ($h = 120\text{--}210$ мкм) необходимо использовать импульс, представленный на рис. 5.

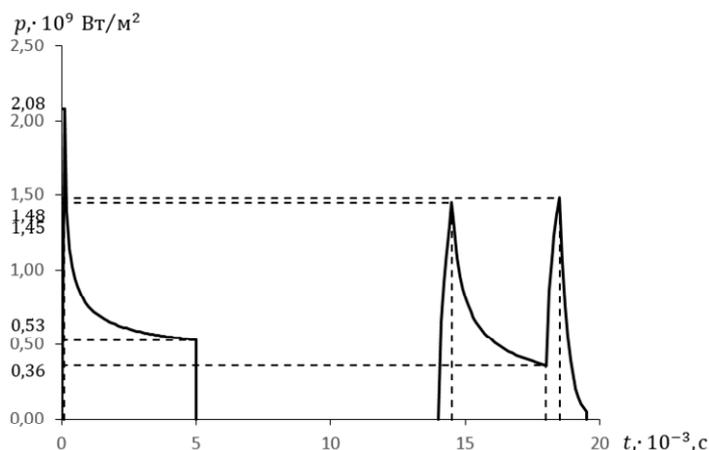
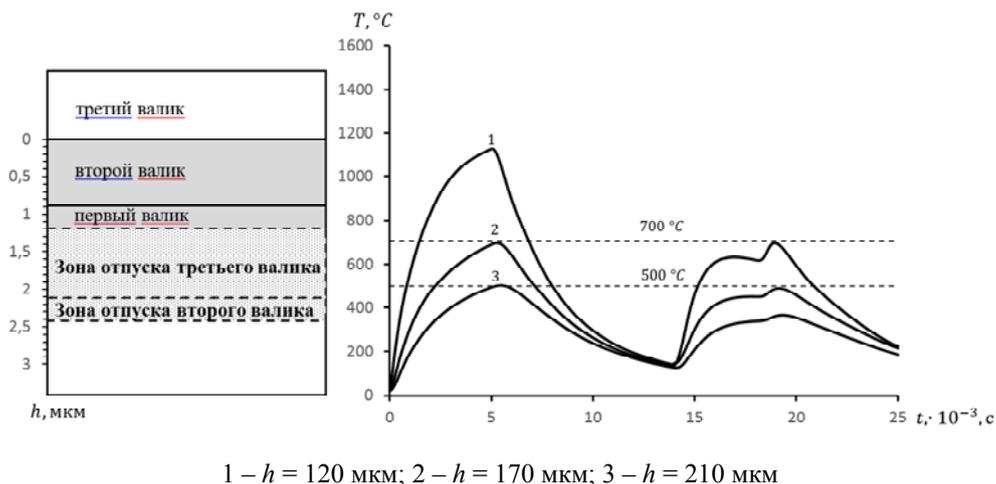


Рис. 5. Форма импульса сфокусированного лазерного излучения для плавления присадки из стали 30ХГСН2А диаметром 0,2 мм

Первая часть импульса длительностью $t_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ с воздействует на наплавленный металл, обеспечивая термический цикл (рис. 6, б), формирующий зону отпуска $h = 170\text{--}210$ мкм. Вторая часть импульса длительностью $t_2 = 5,5 \cdot 10^{-3}$ с обеспечивает формирование локальной наплавки с минимальным испарением металла и зоны отпуска $h = 120\text{--}170$ мкм. Таким образом, использование импульса данной формы позволяет осуществлять локальные наплавки и формировать зону отпуска, полностью охватывающую зону закалки, возникающую после наплавки предыдущего валика (рис. 6, а).



1 – $h = 120$ мкм; 2 – $h = 170$ мкм; 3 – $h = 210$ мкм

Рис. 6. Схема реализации и термические циклы наплавки третьего валика с отпуском закаленных зон основы:
а – схема наплавки третьего валика; б – термический цикл при наплавке третьего валика

При выполнении многослойной наплавки верхний слой наплавленного материала $h = 210$ мкм оказывается в состоянии с повышенной твердостью. Данный слой может быть удален в ходе механической обработки детали. Кроме этого формирова-

ние верхнего слоя наплавляемого металла с физико-механическими свойствами, равноценными свойствам основы, может быть выполнено обработкой поверхности детали лазерными импульсами (рис. 7).

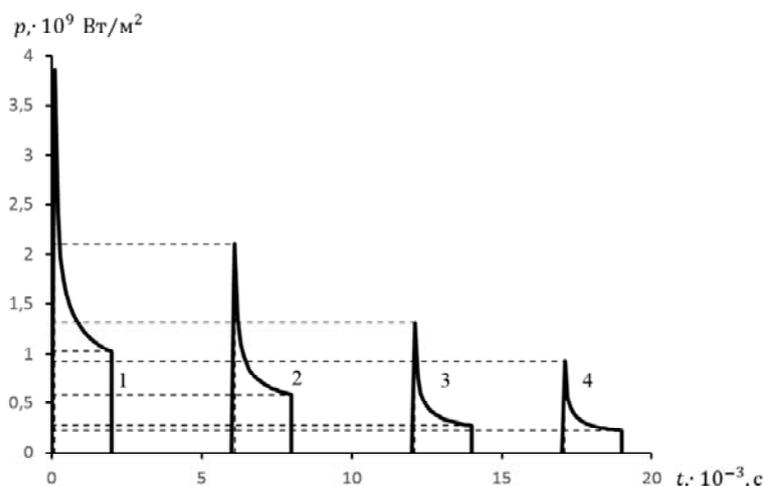
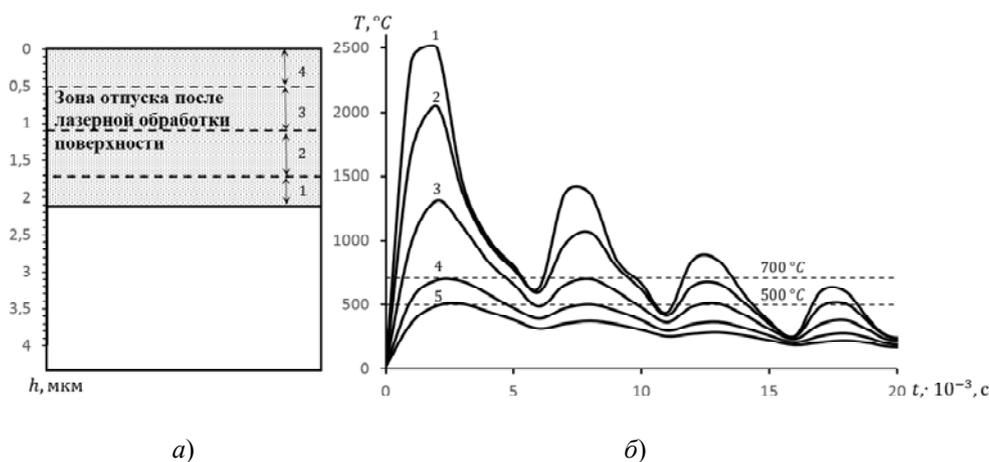


Рис. 7. Форма импульса лазерного излучения для плавления присадки из стали 30ХГСН2А диаметром 0,2 мм:
1 – первая часть ($t = (0-2)10^{-3}$ с); 2 – вторая часть ($t = (6-8)10^{-3}$ с);
3 – третья часть ($t = (12-14)10^{-3}$ с); 4 – четвертая часть ($t = (17-19)10^{-3}$ с)

Импульс имеет четыре части длительностью $t = 2 \cdot 10^{-3}$ с каждая. Первая часть импульса обеспечивает термический цикл (рис. 8, б), формирующий зону отпуска на глубине $h = 170-210$ мкм, вторая часть – отпуск $h = 110-170$ мкм, третья часть обеспечивает отпуск $h = 50-110$ мкм, четвертая часть обеспечит отпуск $h = 0-50$ мкм (рис. 8, а).



1 – $h = 0$ мкм; 2 – $h = 50$ мкм; 3 – $h = 110$ мкм; 4 – $h = 170$ мкм; 5 – $h = 210$ мкм

Рис. 8. Схема реализации и термические циклы лазерной обработки поверхности детали:
а – схема лазерной обработки поверхности; б – термический цикл при лазерной обработке поверхности

Заключение

Установлено влияние формы импульса лазерного излучения на характер плавления и переноса присадочного материала на основу с минимальным испарением металла.

Определены форма и пространственно-энергетические параметры лазерного импульса, использование которого при наплавке на поверхность изделий из высокопрочной стали (30ХГСН2А) присадочным материалом из стали 30ХГСН2А позволяет получать слои с физико-механическими свойствами, равноценными свойствам основы.

Установлены пространственно-энергетические и временные параметры лазерного излучения для отпуска верхнего слоя наплавленного металла.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов импульсной лазерной сварки и наплавки металлов.

Литература

1. Грабин, В. Ф. *Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей* / В. Ф. Грабин, А. В. Денисенко. – Киев : Наукова Думка, 1978. – 276 с.
2. Tseng, W. C. Simulation study on laser cladding on preplaced powder layer with a tailored laser heat source / W. C. Tseng, J. N. Aoh // *Optics & Laser Technology*. – 2013. – Vol. 48. – P. 141–152.
3. Мышковец, В. Н. Моделирование процесса импульсной лазерной сварки тонкостенных конструкций из алюминиевых сплавов / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, Г. А. Баевич // *Материалы. Технологии. Инструменты*. – 2012. – № 3. – С. 16–20.
4. Farnia, A. Effects of pulse duration and overlapping factor on melting ratio in preplaced pulsed Nd:YAG laser cladding / A. Farnia, F. M. Ghainia, J. Sabbaghzadeh // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2013. – Vol. 51. – P. 69–76.
5. Mumtaz, K. A. Selective Laser Melting of thin wall parts using pulse shaping / K. A. Mumtaz, N. Hopkinson // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2010. – Vol. 210. – P. 279–287.
6. Зиновьев, В. Е. *Теплофизические свойства металлов при высоких температурах : справочник* / В. Е. Зиновьев. – М. : *Металлургия*, 1989. – 384 с.
7. Григорьянц, А. Г. *Технологические процессы лазерной обработки* / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 663 с.
8. Петров, Г. Л. *Теория сварочных процессов* / Г. Л. Петров, А. С. Тумарев. – М. : *Машиностроение*, 1987. – 462 с.

Получено 07.10.2015 г.