### УДК 621.785.54

# ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТРЫ И РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ТОНКОСТЕННОГО ЦИЛИНДРА ИЗ ПОРОШКОВОГО ПСЕВДОСПЛАВА СТАЛЬ-МЕДЬ

© 2012 В.Г. Гилев<sup>1</sup>, Е.А. Морозов<sup>2</sup>, А.С. Денисова<sup>1</sup>, А.М. Ханов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ЗАО «Новомет-Пермь»

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет

### Поступила в редакцию 26.10.2012

Приведены результаты исследований микроструктуры и микротвердости поверхностного слоя порошкового псевдосплава сталь-медь после лазерной термической обработки волоконным лазером мощностью 1 кВт.

Ключевые слова: лазерная термообработка, порошковая металлургия, псевдосплав сталь-медь, микроструктура, микротвердость

Типичным режимом термообработки порошкового псевдосплава сталь-медь типа ЖГр1Д15 является закалка от температуры 780°С, при этом достигается твердость 45 HRC [1]. Повышение температуры закалки приводит к снижению твердости из-за образования остаточного аустенита. При скоростных поверхностных методах термообработки, например, таких, как лазерная закалка, возможно достижение более высоких значений твердости, а оптимальные режимы закалки обычно подбираются экспериментально для каждого материала и типа лазера. Применение лазерной термической обработки (ЛТО) в машиностроении имеет следующие преимущества: обеспечиваются локальный нагрев с отсутствием или минимальными деформациями и охлаждение по механизму теплопроводности вглубь материала, как правило, без применения охлаждающих сред; достигаются высокие физико-механические свойства поверхностных слоев, обусловленные высокими скоростями нагрева и охлаждения, составляющими 10<sup>4</sup>...10<sup>6</sup> °C/с. Лазерный луч как технологический инструмент обеспечивает на локальной поверхности детали нужные термические циклы нагрева-охлаждения поверхностных слоев. При лазерном нагреве повышается температура критической точки Ac3 диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C, при этом увеличивается разность свободных энергий и растет скорость диффузии углерода в железе [2].

Опыт применения лазерной термической обработки обширен [3], однако число публикаций о ЛТО порошковых сталей ограничено [4-8], а ЛТО порошковых псевдосплавов сталь-медь не изучена. Ориентирами при разработке процессов ЛТО порошковых сталей могут быть закономерности, установленные на обычных сталях. В частности, доля остаточного аустенита коррелирует с максимальной температурой, которая пропорциональна параметру

$$\frac{P}{\lambda d} \left(\frac{a}{d\upsilon}\right)^{0.4},\tag{1}$$

где P – мощность, v – скорость перемещения, λ, α – теплопроводность и температуропроводность материала [9, 10]. Размеры упрочненной зоны для стали 45 пропорциональны [9] параметру:

$$P/(d \cdot v)^{0,4} \tag{2}$$

Из выражения (1) следует, что влияние любого из параметров лазерного нагрева (P,d, v) на структуру закаленной стали неоднозначно [10]. Так, при увеличении скорости перемещения теплового пучка при прочих равных условиях одновременно понижается максимальная температура нагрева, т.е. температура аустенизации, время пребывания в аустенитной области, и увеличивается скорость охлаждения. Влияние самой температуры нагрева также неоднозначно: при ее возрастании увеличивается степень растворения в аустените углерода и других примесей, что повышает устойчивость аустенита, но приводит к росту его зерна, вызывая повышение мартенситной точки M<sub>H</sub>. Вследствие этого заранее трудно предсказать, к какому структурному изменению в стали или чугуне данного химического состава приведет изменение хотя бы одного из параметров лазерного нагрева. Это можно определить лишь экспериментально [10].

Гилев Виктор Григорьевич, кандидат технических наук, инженер-исследователь инженерно-техничес-кого центра департамента инновационных разработок. E-mail: Gilev@novomet.ru

Морозов Евгений Александрович, ассистент кафедры «Конструирование машин и технология обработки материалов». E-mail: morozov.laser@gmail.com

Денисова Анна Сергеевна, математик инженернотехнического центра департамента инновационных разработок. E-mail: a.denisova@novomet.ru

Ханов Алмаз Муллаянович, доктор технических наук, профессор, декан механико-технологического факультета. E-mail: mtf-dekanat@pstu.ru

Анализ литературы показывает, что наиболее значимыми параметрами, оказывающими влияние на процессы, протекающие при лазерной обработке и на свойства обработанных материалов, являются мощность лазера, плотность мощности и скорость перемещения лазера. Важное значение также имеет вид распределение мощности и форма пучка лазера (круглая или прямоугольная), длина волны и тип лазера, шероховатость поверхности, свойства и структура обрабатываемого материала. Важной особенностью порошковой металлургии является возможность создавать керметы и псевдосплавы, то есть материалы, состоящие из компонентов с сильно отличающимися свойствами.

Цель работы: выяснение возможности ЛТО псевдосплавов на примере порошкового материала ЖГр1Д15-типичного псевдосплава, состоящего из стальной матрицы и более легкоплавких включений меди. Лазерная обработка подобных материалов ранее не исследовалась. Материал ЖГр1Д15 не имеет аналогов среди традиционных сталей.

Основная проблема при обработке исследуемой стали с оплавлением – большое количество меди в составе материала. Растворимость меди в феррите не более 2%. Наиболее близким исследованием скоростной термообработки подобного состава является работа [11], в которой исследовалась сталь 45 после внедрения меди в поверхность при взрыве медной проволоки, нагретой пропусканием по ней тока с последующей электроннолучевой переплавкой поверхности. По результатам исследований в [11] получена зависимость микротвердости от содержания меди. Твердость падает с увеличением содержания меди, но при 15% меди согласно [11] микротвердость еще достаточно высока ~1000 HV.

Методика проведения исследований. Для обработки использовались образцы в виде полого цилиндра с толщиной стенки 2,6 мм. Исследуемый материал имеет состав 1% С, 15% Си остальное железо. Структура материала в спеченном состоянии, приведенная на рис.1, состоит в основном из зерен железоуглеродистого перлита, включений меди, небольшого количества феррита. Твердость материала в исходном состоянии составляет 70-100 HRB. В работе применялась система ОРТОМЕС LENS 850-R с волоконным лазером YLR-1000 IPG Photonics с пятном круглого сечения и гауссовым распределением мощности. При выборе параметров лазерной обработки в качестве ориентира взята работа [12]. При планировании эксперимента задавались параметры: мощность лазера W, плотность мощности I, и скорость перемещения пучка лазера по поверхности v. I=W/S, S =  $\pi d^2$ , где d – диаметр пятна пучка лазера в месте падения на обрабатываемую поверхность. Размер пятна регулировался изменением расстояния Z от фокальной плоскости до обрабатываемой поверхности.

Для расчета использовалась формула из [13] для зависимости текущего радиуса  $\omega(Z)$  от положения поверхности образца по отношению к фокальной плоскости:

$$\omega(Z) = \overline{\omega}_0 \left[ 1 + \left( \frac{M^2 \lambda \cdot Z}{\pi \cdot \overline{\omega}_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где:  $\omega(Z) = d/2$ , Z – расстояние от фокальной плоскости,  $\omega_0$  – минимальный радиус луча (радиус в фокальной плоскости);  $M^2$  – фактор качества луча,  $\lambda$  – длина волны лазера.



Рис. 1. Микроструктура исследуемой стали ЖГр1Д15 в спеченном состоянии

Также принимали во внимание соотношение [14]

$$M^{2} = \frac{BPP}{\lambda/\pi}$$
(2)

где параметр BPP (Beam Parameter Product) взят из документации на лазер BPP=2,5-2,7 мм\*мрад.

Обработка проводилась одиночными проходами лазера в среде аргона для предотвращения окисления. Условия проведения режимов лазерной обработки приведены в табл. 1.

Исходная шероховатость поверхности образцов после токарной обработки измерена на приборе профилограф-профилометр Абрис-ПМ7. R<sub>a</sub> < 0,5 мкм, R<sub>z</sub> < 1,0 мкм. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3М. Микроструктура после лазерной термообработки исследовалась на микроскопе Olimpus GX-51 при увеличении 200-1000 крат. Состояние поверхности изучалось на микроскопе МБС-10. Для выявления микроструктуры использовался травитель 3% HNO<sub>3</sub>. Для выяснения закономерностей в размерах образующихся зон расплава и зон термического влияния результаты замеров обрабатывались для получения аппроксимаций В математическом пакете Mathematika. Точность аппроксимаций оценивалась по величине среднеквадратичного отклонения результатов расчета от данных эксперимента.

Результаты исследований и обсуждение. Вид поверхности после ЛТО псевдосплава ЖГр1Д15 приведен на рис. 2. Рельеф поверхности существенно зависит от режимов проведения ЛТО. При малых скоростях перемещения (4 мм/с) пучка лазера и высокой используемой мощности (1 кВт) образуется глубокая зона расплавления, а на поверхности формируется наиболее выраженный рельеф. Характер рельефа говорит о периодическом образовании и лопании пузырей газа с образованием полукруглых гребней (образцы №№2, 6, 7, 10 и 11). При более высоких скоростях перемещения (8 мм/с) мотив полукруглых гребней также просматривается, но частота гребней значительно выше, а высота – ниже. На всех фотографиях движение пучка происходило справа налево. Можно видеть, что в случае низких значений параметров W, W/S и высоких v оплавление начинается не сразу, а на некотором расстоянии от начала дорожки. Особенно это выражено на образцах №4, 8, менее заметно на №10, 11. Мощности пучка лазера в этих случаях недостаточно для проплавления стенки в исходном состоянии, но после небольшого времени, в течении которого происходит нагрев стенки, оплавление становится возможным. Только один образец №12 не имеет никаких признаков оплавления. На нем виден исходный рельеф от токарной обработки.

N⁰	W,	(W/S),	D,	V,	Параметр
0П.	кВт	(кВт/см <sup>2</sup> )	MM	см/с	p/(d*v) <sup>0.4</sup>
1	0,9	16	2,68	1,2	11,8
2	0,9	8	3,79	1,0	6,8
3	0,8	16	2,52	1,0	8,0
4	0,8	8	3,57	1,2	10,5
5	0,7	16	2,36	1,2	12,4
6	0,7	8	3,34	1,0	7,1
7	0,6	16	2,19	1,0	8,4
8	0,6	8	3,09	1,2	11,1
9	1,0	12	3,2	1,2	9,4
10	1,0	12	3,2	0,8	7,6
11	1,0	8	3,99	1,2	13,0
12	1,0	8	3,99	0,8	6,0

Таблица 1. Условия проведения режимов лазерной обработки

Существенным отличительным признаком в рельефе, характерным для данного материла, является наличие мелкого рельефа по обе стороны от дорожки. Это следствие того, что после зоны оплавления следует зона частичного оплавления, в которой достигается температура плавления меди, медь плавится, а стальной каркас остается в твердом состоянии, за исключением, возможно, части, прилегающей к включениям меди. Наличие мелкого рельефа особенно хорошо выражено на образцах №1 и №3. Для них характерны высокие мощность, плотность мощности и сравнительно малый размер пятна лазера. На шлифах в сечениях, перпендикулярно движению пучка, наблюдаются типичные картины зон плавления и зон термического влияния. Особенностью является уже отмеченные зоны частичного оплавления. Так, на рис. За на нетравленом шлифе видно, что сразу после зоны оплавления идет зона, в которой снижено количество пор. На травленом шлифе образца №1 можно видеть еще более широкую зону, окрашенную почти также как зона оплавления.

В микроструктуре ниже зоны оплавления наблюдается зона частичного оплавления, рис. За. На нетравленом шлифе видно, что в зоне частичного оплавления мелкие поры исчезают, остаются только крупные, вид включений меди несколько изменяется. Образование такой структуры можно объяснить следующим образом. Эта зона разогревается выше температуры плавления меди, но ниже температуры плавления перлитных колоний. Далее происходят процессы типа жидкофазного спекания с коалесценцией пор, вот почему исчезают мелкие поры. Одновременно могут происходить и нежелательные явления, а именно: медь может проникать в межзеренные межчастичные промежутки.



Рис. 2. Вид поверхности после после различных режимов ЛТО

При этом будет снижаться прочность связей между частицами железоуглеродистого каркаса, то есть механические свойства будут ухудшаться, несмотря на видимое уплотнение. Подобное явление известно в процессах пайки стали медью.



Рис. 3. Микроструктура материала ЖГр1Д15 после ЛТО (образец №2) а – нетравлено, б – травлено

Проведен подбор экстраполирующих функций для ширины зоны оплавления, видимой с поверхности, по трем параметрам X1 – W (кВт), X2 – d (мм) и X3 - v (см/с). Наилучший результат со среднеквадратичным отклонением ±0,06 дает уравнение, полученное из данных табл. 2. Ширина зоны оплавления, видимой с поверхности, коррелирует с параметром  $p/(d*v)^{0,4}$ , рис. 4. В целом микротвердость образцов всей серии ЛТО невысокая (см. табл. 3).

 $\begin{aligned} \mathbf{y} &= 0,843687 + 3,84887 \text{ x1} - 13,5106 \text{ x1}^2 - \\ &- 0,173065 \text{ x2} + 4,47615 \text{ x1}\text{x2} - 0,244463 \text{ x2}^2 + \\ &+ 0,833869 \text{ x3} + 7,00816 \text{ x1}\text{x3} - 2,98483 \text{ x2}\text{x3} + \\ &+ 0,5987 \text{ x3}^2 \end{aligned}$ 

Средняя величина замеров микротвердости при 50, 100, 150 и 200 мкм от поверхности не превышает для всех образцов величины 445 HV. Наилучший результат получен в опытах 2, 7, 8, рис. 5. Параметр  $p/(d^*v)^{0,4}$  в этих опытах варьируется в пределах 7-11 кВт/см<sup>2</sup>/(мм\*см/с). Относительно невысокая твердость, по-видимому, объясняется неудачно выбранными достаточно низкими скоростями перемещения пучка лазера 4-8 мм/с, а также низким теплотводом в тонкой стенке обрабатываемого материала. Это предположение подтверждается результатами проведенных дополнительных опытов на более толстых образцах при более высоких скоростях v=8-12 мм/с, когда микротвердость достигала величин 700=1000 HV на глубине до 0,5-1,2 мм. Можно отметить относительно низкую корреляцию между глубиной зоны оплавления и глубиной ЗТВ, рис. 6. Это объясняется достаточно сложным влиянием параметров на размеры зон оплавления и ЗТВ и широким варьированием параметров в эксперименте.

N⁰	W/1000,	(W/S)/10	d,	V,	Ширина зоны оплав-	
	Вт	(кВт/см²)	MM	см/с	ления У, мм	
					экспери-	уравнение
					мент	(1)
	X1		X2	X3	У	
1	0,9	1,6	2,68	0,8	1,7	1,64
2	1,0	0,8	3,79	0,4	2,7	2,69
3	0,8	1,6	2,52	0,4	1,9	1,97
4	0,8	0,8	3,57	0,8	1,26	1,34
5	0,7	1,6	2,36	0,8	1,81	1,88
6	0,7	0,8	3,34	0,4	2,52	2,48
7	0,6	1,6	2,19	0,4	2,2	2,12
8	0,6	0,8	3,09	0,8	0,86	0,75
9	0,5	1,2	2,3	0,8	1,21	1,21
10	0,5	0,8	2,82	0,4	1,67	1,73
11	0,4	1,2	2,06	0,4	1,61	1,61
12	0,4	0,8	2,52	0,8	0	0,02

Таблица 2. Экстраполяция данных по ширине зоны оплавления с поверхности стенки

№ оп.	Мощ- ность,	Плотность мощности, исви/см <sup>2</sup> (d	Скорость перемеще-	Микро- твер-	Параметр p/(d*v) <sup>0,4</sup>
	KDI	пятна мм)	пия, см/с	HV	
1	0,9	16 (2,68)	0,8	406	11,8
2	1,0	8 (3,79)	0,4	445	6,8
3	0,8	16 (2,52)	0,4	322	8,0
4	0,8	8 (3,57)	0,8	357	10,5
5	0,7	16 (2,36)	0,8	383	12,4
6	0,7	8 (3,34)	0,4	380	7,1
7	0,6	16 (2,19)	0,4	439	8,4
8	0,6	8 (3,09)	0,8	442	11,1
9	0,5	12 (2,3)	0,8	439	9,4
10	0,5	8 (2,82)	0,4	442	7,6
11	0,4	12 (2,06)	0,4	343	13,0
12	0,4	8 (2,52)	0,8	180	6,0

Таблица 3. Условия проведения и результаты режимов ЛТО псевдосплава ЖГр1Д15

Примечание: \* - среднее замеров при 50, 100, 150 и 200 мкм от поверхности



**Рис. 4.** Зависимость ширины зоны оплавления от параметра  $p/(d^*v)^{0,4}$ .



**Рис. 5.** Распределение микротвердости по глубине в исследованных образцах псевдосплава ЖГр1Д15

Выводы: поведение порошковой стали (псевдосплава) ЖГр1Д15 при лазерной термической обработке отличается наличием наряду с зоной плавления зоны частичного оплавления структуры в объеме более низкоплавкой составляющей меди.



Рис. 6. Соотношение между размерами глубины оплавления и глубины 3TB

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Шацов, А.А. Оптимизация состава и режимов термообработки композиционного материала стальмедь // Известия вузов. Цветная металлургия. 1998. № 5. С. 52-56.
- 2. Лопухов, Ю.И. Термическое упрочнение поверхностей железоуглеродистых сплавов лазерным излучением / Ю.И. Лопухов, Ш.С. Шакаримов // Вестник ВКГТУ. Науки о земле. 2011. №3. С. 10-17.
- 3. *Kannatey-Asibu Jr., E.* Principles of laser materials processing // Wiley, 2009. 838 p.
- Постников, В.С. Лазерное упрочнение порошковой стали ЖГр0,5Д3Л0,3 / В.С. Постников, В.С. Томсинский, Ю.В. Палкина // МиТОМ. 1991. №11. С. 32-34.
- Анциферов, В.Н. Закономерности формирования структуры и свойств порошковых углеродистых сталей при лазерном термическом модифицировании. Сообщение І. Структура модифицированных сталей / В.Н. Анциферов, А.М. Шмаков, С.В. Штенников // Порошковая металлургия. 1992. №7. С. 76-79.
- Анциферов, В.Н. Закономерности формирования структуры и свойств порошковых углеродистых сталей при лазерном термическом модифицировании. Сообщение II. Свойства модифицированных сталей / В.Н. Анциферов, А.М. Шмаков, С.В. Штенников // Порошковая металлургия. 1992. №9. С. 91-95.

- 7. Толочко, Н.К. Применение лазеров в порошковой металлургии // Физика и химия обработки материалов. 1995. №1. С. 94- 98.
- 8. Витязь, П.А. Лазерная термообработка порошковых железографитных материалов / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, С.А. Черноусова и др. // Порошковая металлургия. 1992. №8. С. 54-56.
- 9. *Крапошин, В.С.* Лазерное расплавление поверхности луча со сканированием луча / *В.С. Крапошин, К.В. Шахлевич, В.П. Бирюков* // МИТОМ. 1988. №11. С. 57-59.
- Крапошин, В.С. Влияние лазерного нагрева на количество остаточного аустенита в сталях и чугунах / В.С. Крапошин, К.В. Шахлевич, Т.М. Вязьмина // МИТОМ. 1989. №10. С. 21-29.
- 11. Иванов, Ю.Ф. Легирование поверхности углеродистой стали медью путем электрического взрыва

проводника и последующей электронно пучковой обработки / Ю.Ф. Иванов, С.Ю. Филимонов, А.Д. Тересов и др. // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318, № 2. С. 101-105.

- Qui, F. Transformation hardening of medium-carbon steel with a fiber laser: the influence of laser power and laser power density / F. Qiu, V. Kujanpää // Mechanika (Mechanics). 2011. Vol. 17, No.3. P. 318-323.
- 13. *Goia, F.* Surface Hardening of an AISI D6 Cold Work Steel Using a Fiber Laser / *F. Goia, M. de Lima //* Journal of ASTM International. 2011. Vol. 8, No.2. P. 315-318.
- ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008 Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков.

# RESEARCH OF MICROSTRUCTURE AND SURFACE RELIEF AT LASER THERMAL PROCESSING OF THE THIN-WALLED CYLINDER MADE FROM POWDER PSEUDO-ALLOY STEEL-COPPER

© 2012 V.G. Gilev<sup>1</sup>, E.A. Morozov<sup>2</sup>, A.S. Denisova<sup>1</sup>, A.M. Khanov<sup>2</sup>

## <sup>1</sup>JSC "Novomet-Perm" <sup>2</sup>Perm National Research Polytechnical University

Results of researches of microstructure and microhardness of surface layer of powder pseudo-alloy steelcopper after laser thermal processing by the fiber laser in capacity of 1 kW are given.

Key words: laser heat treatment, powder metallurgy, pseudo-alloy steel-copper, microstructure, microhardness

Viktor Gilev, Candidate of Technical Sciences, Engineer-Researcher of the Engineer and Technical Center at the Innovation Developments Department. E-mail: Gilev@novomet.ru

Evgeniy Morozov, Assistant at the Department "Machines Design and Technology of Materials Processing". E-mail: morozov.laser@gmail.com Anna Denisova, Mathematician of the Engineer and Technical Center at the Innovation Developments Department. E-mail: a.denisova@novomet.ru Almaz Khanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Mechanical and Technological Faculty. E-mail: mtf-dekanat@pstu.ru