

УДК 621.785.54

Е.А. Морозов, В.Г. Гилев

E.A. Morozov, V.G. Gilev

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
ПОРОШКОВЫХ ПСЕВДОСПЛАВОВ СТАЛЬ – МЕДЬ
МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ
LASER HARDENING FRICTION SURFACES MADE
OF STEEL – COPPER PSEUDO ALLOY**

Приведены результаты исследований микроструктуры и микротвердости поверхностного слоя кольцевых выступов на дисках из порошкового псевдосплава сталь – медь после проведения лазерной термической обработки волоконным лазером мощностью 1 кВт. Максимальная микротвердость 1000 HV достигается в объеме мартенсита, образующегося в перлитных колониях исходного материала сталь – медь. Показано, что наряду с параметрами лазерной обработки на свойства поверхностного слоя оказывает влияние геометрия поверхности образцов.

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

Results of researches of a microstructure and microhardness of surface layer of ring ledges from a powder pseudoalloy steel-copper after carrying out laser heat treatment by the 1 kW fiber laser are given. The maximum microhardness to 1000 HV in volume of the martensite which is forming in perlitny colonies of an initial material steel – copper is reached. The geometry of samples has impact on results along with parameters of laser processing.

Keywords: laser heat treatment, laser hardening, powder metallurgy, pseudoalloy steel – copper, microstructure, microhardness.

Большие технологические возможности открывает лазерная поверхностная упрочняющая обработка сплавов, используемых в машиностроении. При такой обработке обеспечиваются локальный нагрев с отсутствием или минимальными деформациями и охлаждение за счет отвода тепла в объем материала, как правило, без применения охлаждающих сред. Высокие скорости нагрева и охлаждения, составляющие 10^4 – 10^6 °C/с, приводят к получению высоких физико-механических свойств поверхностных слоев.

Анализ литературы показывает, что наиболее значимыми параметрами, оказывающими влияние на процессы, протекающие при лазерной обработке, и свойства обработанных материалов, являются мощность и плотность лазерного излучения, скорость перемещения лазерного луча. Значение также имеют рас-

пределение мощности и форма лазерного пучка, длина волны и тип лазера, шероховатость поверхности, свойства и структура обрабатываемого материала.

Настоящая работа посвящена лазерной термической обработке (ЛТО) псевдосплавов сталь – медь с большим объемным содержанием стальной составляющей, поэтому в ходе исследований может быть привлечен опыт ЛТО сталей. В работе [1] закалку сталей У9 и У10 проводили при мощности СО₂ лазера 1,5 кВт и скорости 0,75 м/мин (12,5 мм/с) до твердости около 1000 и 1100 HV. Аналогичные результаты неоднократно достигались и другими исследователями. Так, согласно данным [2] углеродистые стали можно подвергать лазерной обработке как с оплавлением, так и без оплавления. При этом микротвердость в зоне оплавления увеличивается с повышением содержания углерода (до 0,8–1,0 %) и достигает для стали У8 значения 1000 HV, что на 100–150 HV выше, чем при обычной закалке.

По мнению авторов [3, 4], 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, так как влияние параметров на температуру нагрева, размеры зерен аустенита и фазовый состав после закалки неоднозначно.

Материалы типа псевдосплавов сталь – медь ранее не подвергали ЛТО, за исключением работы [5]. Наиболее близким исследованием скоростной термообработки подобного состава является работа [6], в которой исследовалась сталь 45 после внедрения меди в поверхность обработкой взрывом медной проволоки при пропускании по ней тока с последующей электронно-лучевой переплавкой поверхности. В слое материала с 15 об. % дисперсных выделений меди была получена микротвердость 1000 HV.

Методика исследования. Состав исследуемого материала следующий: С – 1 %, Си – 15 %, остальное – железо. Модельные образцы имели вид кольцевых выступов шириной 4,5 мм, внешним диаметром 49 мм и высотой ≈2,5 мм, выполненных на диске толщиной 2,5 мм из того же материала.

Заготовки образцов были получены традиционными методами порошковой металлургии: прессованием смеси порошков железа и графита и спеканием в атмосфере диссоциированного аммиака с одновременной пропиткой медью. Их структура состоит в основном из пластинчатого перлита различной дисперсности, включений меди, небольшого количества феррита. Твердость материала после спекания составляет 70–100 HRB, микротвердость обычно в пределах 250–300 HV. Кольцевые выступы на образцах для ЛТО получены токарной обработкой предварительно спеченных заготовок.

Исходная шероховатость поверхности образцов Ra после токарной обработки была измерена на приборе профилограф-профилометр «Абрис-ПМ7» и при измерении вдоль направления резания составила <0,14 мкм, поперек – <1 мкм.

Для лазерной термической обработки применяли систему OPTOMEC LENS 850-R с волоконным лазером YLR-1000 IPG Photonics с пятном круглого сечения и гауссовым распределением мощности. Обработка проводилась в среде высокочистого аргона с содержанием кислорода до 0,001 % по объему.

Выбор параметров лазерной обработки проводили с учетом данных [5, 7] в качестве ориентира. При планировании эксперимента задавали параметры: мощность лазера W , плотность мощности I ($I = \frac{W}{S}$, $S = \pi d^2$, где d – диаметр пятна лазерного пучка в месте падения на обрабатываемую поверхность) и скорость перемещения лазерного пучка по поверхности v .

Размер пятна регулировали изменением расстояния Z от фокальной плоскости лазера до обрабатываемой поверхности.

Для расчета Z использовали формулу [8] для зависимости текущего радиуса $\omega(Z)$ от положения поверхности образца по отношению к фокальной плоскости:

$$\omega(Z) = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{M^2 \cdot \lambda \cdot Z}{\pi \cdot \omega_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где $\omega(Z) = d/2$; Z – расстояние от фокальной плоскости; ω_0 – минимальный радиус луча (радиус в фокальной плоскости); M^2 – фактор качества луча; λ – длина волны лазера.

Фактор качества луча определялся следующим образом [9]:

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

где параметр BPP (Beam Parameter Product) взят из технической характеристики лазера: BPP = 2,5–2,7 мм · мрад.

Более детальное обсуждение формы пучка волоконного лазера дается в [10].

Обработку проводили одиночными проходами в среде высокочистого аргона. Условия проведения режимов лазерной обработки приведены в таблице. Микротвердость измеряли на автоматическом микротвердомере Durascan 70 при нагрузке 50 г с шагом 50 мкм по линии, перпендикулярной поверхности образца в середине лазерной дорожки. В случае попадания планируемого отпечатка на включения меди или видимый с поверхности дефект точку индентации смещали в сторону.

Глубину зоны термического влияния (ЗТВ) определяли как расстояние до пересечения прямой на уровне 700 HV с графиком распределения микротвердости ($L_{\text{ЗТВ}_1}$), а также как расстояние от поверхности до границы перехода к неизменной исходной структуре материала ($L_{\text{ЗТВ}_2}$).

Режимы лазерной термической обработки. Режимы и результаты ЛТО приведены в таблице. Средняя микротвердость поверхностного слоя на глубине до 350 мкм колеблется в пределах 765–934 HV, глубина слоя с высокой микротвердостью $L_{зТВ_1}$ – в пределах 0,34–1,25 мм.

Условия проведения и результаты лазерной обработки
на кольцевых выступах

№ опыта	W , кВт	W/S , кВт/см ²	d , мм	V , см/с	$L_{пл}$, мкм	$L_{зТВ_1}$, мм	$L_{зТВ_2}$, мм	HV*
1	0,9	16	2,68	1,2	–	0,94	–	764
2	0,9	8	3,79	1,0	–	1,1	–	760
3	0,8	16	2,52	1,0	–	0,64	0,83	894
4	0,8	8	3,57	1,2	–	0,91	–	811
5	0,7	16	2,36	1,2	–	0,62	–	928
6	0,7	8	3,34	1,0	–	0,69	–	934
7	0,6	16	2,19	1,0	–	0,34	–	854
8	0,6	8	3,09	1,2	–	0,77	–	883
9	1,0	12	3,2	1,2	139	0,92	0,98	807
10	1,0	12	3,2	0,8	287	1,21	1,36	765
11	1,0	8	3,99	1,2	90	1,02	0,96	810
12	1,0	8	3,99	0,8	170	1,25	1,35	800

Примечания: $L_{пл}$ – зона полного оплавления; $L_{зТВ_1}$ – глубина слоя с микротвердостью выше, чем 700 HV; $L_{зТВ_2}$ – глубина до границы с перлитной структурой; * – средняя величина микротвердости по замерам в диапазоне 0–350 мкм.

Выводы. При лазерной термической обработке псевдосплава сталь – медь ЖГр1Д15, кроме зоны полного плавления, образуется обширная зона частичного оплавления, в которой оплавление происходит в объемах вблизи низкоплавкой составляющей (меди) в исходной структуре.

Усредненная микротвердость в поверхностном слое толщиной 350 мкм (зоны оплавления и частичного оплавления) составляет 750–900 HV и растет при уменьшении глубины упрочненной зоны.

Максимальная микротвердость 1000 HV достигается в зоне закалки из твердого состояния в объеме мартенсита, образующегося в перлитных колониях исходного материала сталь – медь.

Геометрия обрабатываемой поверхности детали наряду с параметрами ЛТО оказывает существенное влияние на результат.

Список литературы

1. Safonov A.N. Structure and microhardness of the surface layers of iron – carbon alloys after laser heat treatment // *Metal Science and Heat Treatment*. – 1996. – Т. 38. – № 1-2. – С. 68–74.
2. Астапчик С.А., Бабушкин В.Б., Ивашко В.С. Структурные и фазовые превращения в сталях и сплавах при лазерной термической обработке // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1991. – № 2. – С. 2–5.
3. Крапошин В.С. Влияние остаточного аустенита на свойства сталей и чугунов после поверхностного оплавления // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1994. – № 2. – С. 2–5.
4. Крапошин В.С., Крапошина И.Ф. Влияние параметров лазерного облучения на размеры облученных зон для стали 45 // *Физика и химия обработки материалов*. – 1989. – № 6. – С. 19–24.
5. Исследование микроструктуры и рельефа поверхности при лазерной термической обработке тонкостенного цилиндра из порошкового псевдосплава сталь – медь / В.Г. Гилев, Е.А. Морозов, А.С. Денисова, А.М. Ханов // *Известия Самар. науч. центра*. – 2012. – Т. 14, № 4 (5). – С. 1212–1217.
6. 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 Том. политехн. ун-та*. – 2011. – Т. 318, № 2. – С. 101–105.
7. Qui F., Kujanpää V. Transformation hardening of medium-carbon steel with a fiber laser: the influence of laser power and laser power density // *Mechanika (Mechanics)*. – 2011. – Vol. 17, № 3. – P. 318–323.
8. 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. – № 2. – P. 315–318.
9. GOST R ISO 11146-1–2008. Lasers and laser-related equipment. Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios. Part 1. Stigmatic and simple astigmatic beams. – URL: http://standartgost.ru/g/ГОСТ_Р_ИСО_11146-1-2008#page-1 (дата обращения: 5.09.2015).
10. Григорьянц А.Г., Васильцов В.В. Пространственная структура излучения мощных волноводных и волоконных лазеров для технологий // *Вестник Москов. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. – 2012. – № 6. – С. 5–33.

Получено 08.12.2015

Морозов Евгений Александрович – аспирант, старший преподаватель кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: Morozov.laser@gmail.com.

Гилев Виктор Григорьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научного центра порошкового материаловедения, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: Xray@pm.pstu.ac.ru.

Научный руководитель – **Ханов Алмаз Муллаянович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы, технологии и конструирование машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: detali@pstu.ru.