

А. Н. Чемодуров, ст. преп.

Брянский государственный технический университет, Россия

Тел./Факс: (4832) 588220; E-mail: chem.andrey.bryn@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В статье рассматриваются достоинства и недостатки лазерной обработки (упрочнения и легирования) поверхностей деталей машин. Проведён обзор методов повышения эффективности лазерной обработки за счёт рациональной передачи энергии к мишени.

Ключевые слова: лазерная обработка, лазерное упрочнение, лазерное легирование, покрытие, коэффициент поглощения, коэффициент перекрытия лазерных пятен, компьютерная оптика.

A. N. Chemodurov

IMPROVING THE EFFICIENCY OF LASER LIGHT IN MATERIALS PROCESSING MACHINERY PARTS

The article discusses the advantages and disadvantages of laser treatment (hardening and alloying) of the surface of machine parts. The review of methods of improving the efficiency of laser processing due to efficient energy transfer to the target.

Key words: laser processing, laser hardening, laser alloying, coating, absorption coefficient, coefficient of overlapping laser spots, computer optics.

1. Введение

В настоящее время имеется целый ряд научных работ, обобщающих результаты исследований взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемой поверхностью и особенностей фазовых переходов при лазерном нагреве материалов. Достаточно широкой является и область прикладного применения лазерного упрочнения: от режущего инструмента и штампов до отдельных деталей автомобилей, тракторов и ракетно-космической техники.

Преимущество нагрева высокотемпературными источниками энергии – наличие градиента температур, возникающего при их воздействии на поверхность. Управление градиентом температур – путем регулирования параметров обработки предоставляет новые возможности для формирования структуры и свойств сплавов с упрочненной поверхностью.

К обобщенным особенностям воздействия лазерного излучения следует отнести изменение во времени и в пространстве тепловых источников, неизотермичность протекающих процессов, высокие скорости изменения температуры, лимитирующую роль массопереноса или процессов на границе раздела фаз.

При лазерном оплавлении покрытий наблюдается образование таких дефектов, как пористость, растрескивание, несплавление с основой, изменение фазового состава и др. Одним из основных факторов, оказывающих влияние на возникновение всех этих дефектов, является неблагоприятное распределение температурных полей в процессе лазерной обработки. Так, изменение фазового состава покрытия может произойти при нагреве покрытия выше определенной температуры; несплавление с основой – в случае оплавления покрытия не на всю толщину; растрескивание – при высоких скоростях охлаждения и т. д.

В настоящее время в мировой практике промышленного производства достаточно эффективным и перспективным методом упрочнения признано лазерное легирова-

ние, позволяющее существенно изменять физико-механические свойства обработанной поверхности, оставляя неизменными свойства основного материала.

Основная масса работ отражает частные случаи легирования поверхностей конкретных марок сплавов с целью повышения их эксплуатационных характеристик. Использование для этих целей различных типов лазерных установок, режимов обработки, материалов основы и легирующих компонентов существенно затрудняет систематизацию экспериментальных данных.

Оптимизация параметров лазерного излучения и условий лазерной обработки при лазерном легировании из предварительно нанесенных покрытий невозможна без детального изучения процессов массо- и теплопереноса, определяющих закономерности формирования модифицированных слоев.

Использование режимов, которые обеспечивают максимальную глубину легирования, приводит к искажению рельефа поверхности.

Вынужденная конвекция в ванне расплава представляет собой один из основных физических механизмов, обеспечивающих массоперенос по всей глубине ванны, и определяет поле концентраций легирующего компонента в зоне воздействия.

Первостепенной задачей является решение вопросов эффективности процессов лазерного упрочнения (закалки, легирования и нанесения покрытий) с целью повышения производительности и качества процесса лазерной обработки при минимальных экономических затратах.

2. Основное содержание и результаты работы

Энергетическая эффективность процессов лазерной обработки (упрочнения, легирования) может быть значительно повышена соответствующей обработкой поверхности. Эффект достигается изменением как топографии поверхности, так и химического состава. Однако изменение топографии поверхности не всегда представляется технологически оправданной операцией, тогда как использование различных поглощающих покрытий, существенно увеличивает эффективность лазерной обработки.

Высокие плотности мощности лазерного излучения (q) позволяют не только значительно повысить производительность обработки, но и получить качественно новые свойства поверхности, недоступные традиционным методам упрочняющей обработки. Регулируя параметры энергетического воздействия, толщину, состав и состояние нанесенного покрытия, можно добиться такого распределения температур по сечению, когда температура нагрева покрытия будет обеспечивать условия его плавления или спекания, а основа будет претерпевать кратковременный отпуск или неполную закалку.

Наличие на образцах покрытий изменяет ход температурной кривой в зависимости от соотношения температуропроводностей подложки и покрытия.

Лазерный нагрев системы покрытие – основа приводит к возникновению в пленке напряжений, связанных с различием коэффициентов термического расширения сопрягающихся материалов. Напряжения в покрытии в области, прилегающей к межфазной границе покрытие – основа, носят растягивающий характер, а в приповерхностном слое – сжимающий. В момент времени, когда растягивающие напряжения превышают величину адгезии, происходит нарушение сцепления покрытия с основой (для хрупких материалов релаксация растягивающих напряжений может происходить не за счет нарушения адгезии, а за счет растрескивания покрытия).

Эффективным технологическим приемом для снижения остаточных напряжений является предварительный подогрев или последующий нагрев лазерным излучением уже оплавленного покрытия.

Таким образом, экономическая эффективность процесса лазерной обработки в первую очередь определяется тем, насколько рационально организована передача энергии к мишени. В зависимости от q доля полезно расходуемой энергии определяется либо свойствами исходной мишени, либо поведением плазменного образования (ПО), возникающего у облучаемой поверхности [1, 2]. Механизм собственного поглощения материала мишени зависит от энергии кванта $h\nu$.

Глубина проплавления при лазерном легировании мишени определяется по формуле

$$h_x = 2\sqrt{\frac{xd}{v}} \ln \frac{\alpha d}{KT_{пл}} \sqrt{\frac{4xd}{v}}; q_0 = \frac{P\eta_{эф}}{(vd)},$$

где x – коэффициент температуропроводности; K , α – коэффициенты теплопроводности и поглощения вещества; d – диаметр пятна фокусировки; v – скорость легирования; q_0 – удельная погонная энергия; P – мощность лазерного излучения; $\eta_{эф}$ – эффективный КПД лазерной обработки.

При нанесении покрытий лазерным легированием необходимо решить ряд проблем. Одна из них связана с необходимостью получения покрытия, обладающего высокой адгезионной связью с металлической подложкой, и одновременно слабым химическим взаимодействием с металлом основы при эксплуатации детали [3]. Другая проблема состоит в том, что покрытие должно быть достаточно твердым, обладать высокой температурой плавления, быть не очень хрупким и достаточно трещиностойким под действием термических напряжений, вызванных нагревом металлической подложки с покрытием, обладающим различными коэффициентами теплового расширения.

Эффективность процессов лазерного упрочнения (закалки, легирования и нанесения покрытий) непрерывным лазерным излучением CO_2 –лазеров в значительной степени зависит от его поглощения обрабатываемой поверхностью. Исследованиями авторов [4] установлено (см. табл. 1), что степень поглощения излучения CO_2 –лазера стальными поверхностями зависит от шероховатости поверхности (с увеличением шероховатости R_a с 0,02 до 3,35 мкм поглощательная способность увеличивается с 5,15 до 12,65 %), а также от вида предварительной обработки.

Кроме того, поглощательная способность поверхности зависит от ее температуры (для полированных металлических поверхностей при изменении температуры от 20 до 800 °С поглощательная способность изменяется соответственно от 5,2 до 10,5%, для фрезерованных поверхностей – от 12,3 до 21,6 %) и от угла падения лазерного луча на обрабатываемую поверхность (максимальное поглощение 50 % для фрезерной поверхности при комнатной температуре соответствует углу падения луча, близкому к 90°).

Знание коэффициента поглощения системы покрытие – металл необходимо для аналитического расчета режимов упрочнения, а также для решения ряда задач, связанных с оптимизацией процесса обработки.

Известно, что коэффициент поглощения изменяется в процессе лазерного воздействия. Это изменение носит сложный характер и обусловлено непостоянством теплофизических, оптических свойств материалов под действием лазерного излучения. В некоторых работах о коэффициенте поглощения системы покрытие – металл судят по

размерам упрочненной зоны, что в ряде случаев затрудняет изучение процесса взаимодействия излучения с веществом.

Таблица 1
Влияние шероховатости поверхности стали 35NCD16 (аналог – сталь 35) на поглощаемость энергии CO₂-лазера

Вид обработки поверхности	Шероховатость поверхности Ra , мкм	Поглощаемость энергии CO ₂ -лазера ($\lambda = 10,6$ мкм), %
Полирование	0,02	5,15...5,25
Шлифование	0,21	7,45...7,55
	0,28	7,7...7,8
Фрезерование	0,87	5,95...6,05
	1,1	6,35...6,45
	2,05	8,1...8,25
	2,93	11,6...12,1
	3,35	12,55...12,65
Пескоструйная обработка	1,65	33,85...34
Графитовое покрытие	-	74...76

Коэффициент поглощения системы покрытие-металл α находится из следующего соотношения:

$$\alpha = 1 - \frac{W_o}{W_L} = \frac{W_p}{W_L},$$

где W_L – энергия падающего излучения, Вт, W_o – энергия отраженного потока, Вт; W_p – поглощенная энергия излучения, Вт.

Качественный анализ зависимости $\alpha=f(q)$ позволяет сделать вывод, что существует некоторый интервал значений q , для которого α постоянна и имеет максимальное значение. С увеличением q выше некоторого критического значения происходит резкое уменьшение значений α .

С целью разработки рекомендаций по определению α для различных условий обработки можно ввести параметр, учитывающий технологические режимы обработки β – количество энергии, падающей в процессе упрочнения на единицу площади поверхности. Из определения выводится формула для нахождения β

$$\beta = \frac{N_L}{v \cdot d},$$

где N_L – мощность лазерной системы, Вт; v – скорость обработки, м/с.

Пример построения графиков изменения $\alpha=f(q)$ и $\alpha=f(\beta)$ представлен на рис. 1 и рис. 2.

Построение и анализ зависимостей $\alpha=f(q)$ и $\alpha=f(\beta)$ дает возможность выбрать наиболее эффективное покрытие для изменяющихся условий обработки.

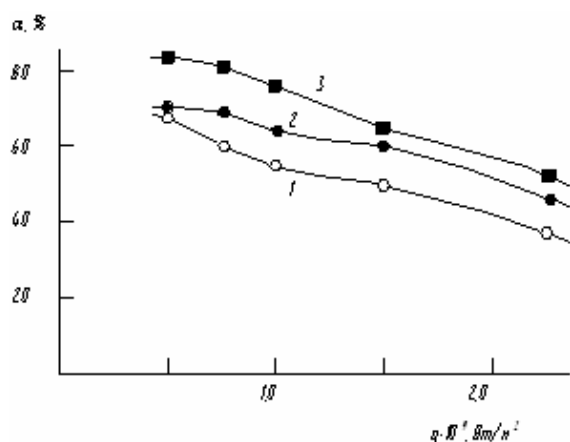


Рис. 1

Рис. 1 Зависимость коэффициента поглощения от плотности мощности излучения: 1 – ZnO; 2 – Fe_2O_3 ; 3 – Pb_3O_4 ;

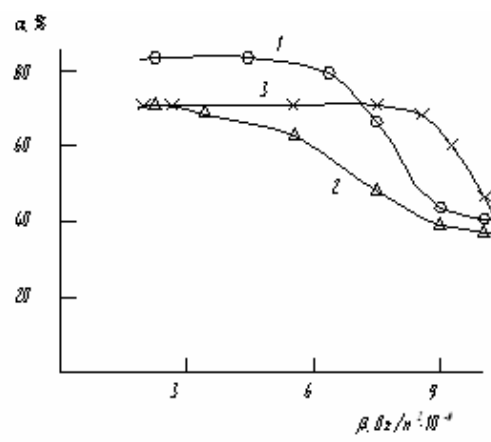


Рис. 2

Рис. 2 Зависимость коэффициента поглощения от количества энергии, приходящейся на единицу площади: 1 – Pb_3O_4 ; 2- $Mn_3O(PO_4)_2$; 3 – сажа.

Однако всем типам поглощающих покрытий в большей или в меньшей степени присущ следующий недостаток: при лазерном воздействии они выгорают, и на поверхности следа лазерной обработки образуется “нагар”, представляющий собой слой сухого остатка покрытия, приваренного к поверхности металла. Поэтому в большинстве случаев при применении на практике такого метода лазерного термоупрочнения требуется доводка поверхности с целью снятия приваренного сухого остатка и доведения ее до требуемой шероховатости, кроме того, практически для всех покрытий точно не определен коэффициент поглощения, что не позволяет прогнозировать результаты лазерной обработки и тем самым осложняет выбор оптимальных режимов облучения, которые определяют экспериментально с большими затратами времени.

Таким образом, применение поглощающих покрытий при лазерном термоупрочнении вызывает: дополнительные трудности, связанные с нанесением, сушкой и снятием покрытия после лазерной обработки; ухудшение геометрических параметров качества поверхности; повышение стоимости лазерной обработки; сложность, а в ряде случаев и невозможность лазерной обработки локальных поверхностей крупногабаритных деталей; удлинение цикла освоения процесса лазерного термоупрочнения для обработки деталей массового производства; выделение вредных испарений из зоны лазерного воздействия.

Многие исследователи предпринимали попытки и разработали специальные конструкторско-технологические схемы лазерного термоупрочнения металлических поверхностей деталей без использования поглощающих покрытий, которые в большинстве своем сложны по устройству, в изготовлении и настройке, имеют ограниченную область применения и требуют больших эксплуатационных затрат при их использовании для обработки деталей массового производства.

Новые решения и подходы используются в конструкторско-технологических схемах лазерного термоупрочнения поверхностей деталей без поглощающих покрытий [5]. В работах приводится конструкторско-технологическая схема лазерного термоупрочнения, в которой используют искусственно созданные “ловушки” лазерного пучка в виде сужающей щели, образованной обрабатываемой поверхностью и отражающей поверхностью зеркала. В данной схеме лазерный пучок в процессе многократных отраже-

ний поглощается на 70...80 % обрабатываемой поверхностью, а остальную часть составляют потери на отражающем зеркале и рассеивание лазерного излучения в щелевом зазоре между обрабатываемой поверхностью и отражающей поверхностью зеркала.

Для наружных цилиндрических деталей аналогичная схема имеет вид, представленный на рис. 3, а соответствующие основные конструкторско-технологические параметры приведены на рис. 4.

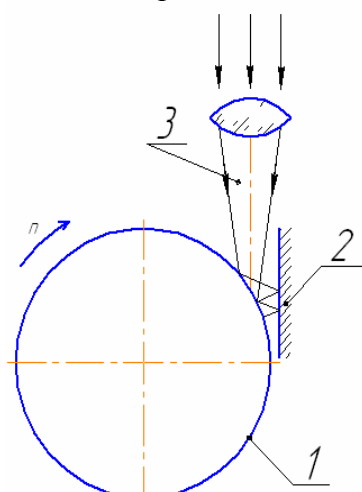


Рис. 3

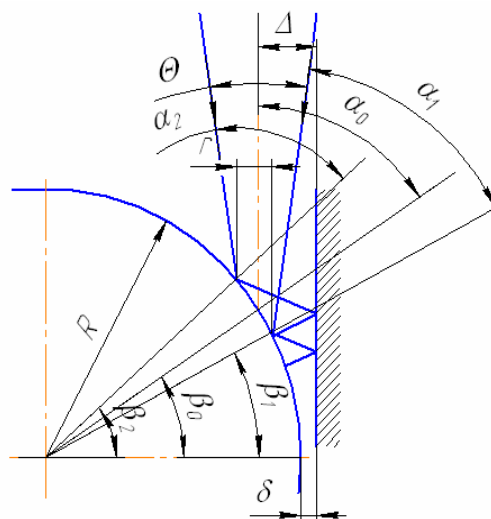


Рис. 4

Рис. 3. Конструкторско-технологическая схема лазерного термоупрочнения наружных цилиндрических поверхностей деталей (1 - деталь; 2 - зеркало; 3 - лазерный пучок);

Рис. 4. Основные регулируемые параметры схемы лазерного термоупрочнения наружных цилиндрических поверхностей деталей (R - радиус кривизны детали; Θ - угол сходимости (расходимости) лазерного пучка; r - радиус пятна лазерного пучка; δ - минимальное расстояние между обрабатываемой поверхностью и отражающей поверхностью зеркала; Δ - расстояние между рабочей поверхностью зеркала и осью падающего лазерного пучка; α_0 - первоначальный угол падения оси лазерного пучка; α_1, α_2 - первоначальные углы падения крайних лучей лазерного пучка; $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ - углы секторов, определяющих места падения осевого и крайних элементарных лучей).

В работе [6] автором разработана прикладная программа для оптимизации и расчета конструкторско-технологических параметров схем лазерного термоупрочнения наружных цилиндрических поверхностей деталей, что позволяет по результатам оптимизации практически реализовать схему качественной обработки конкретной детали с максимальной производительностью.

Выходными параметрами данной программы являются: расстояние от оси лазерного пучка до зеркала; расстояние от фокусирующей линзы до поверхности детали; диаметр пятна лазерного пучка на обрабатываемой поверхности; число отражений первого крайнего луча лазерного пучка; число отражений второго крайнего луча лазерного пучка; число отражений центрального луча лазерного пучка.

Как отдельным видом проблемы связанной с коэффициентом перекрытия лазерных пятен, за счет которого обеспечивается равномерная глубина упрочненного слоя при наименьшей суммарной площади неупрочненных и разупрочненных участков, является образование на поверхности валиков (при оплавлении поверхности) [7]. Образование их связано с перекрытием лазерных пятен, когда образуется небольшое оплавление

ние поверхности в виде бугорка. На поверхности валиков – самый твердый слой (наиболее пролегированный и термоулучшенный). В качестве конечной обработки используются различные виды механических обработок.

При реализации лазерной обработки без оплавления (термоупрочнение) как правило, сохраняются микрогеометрические параметры поверхности, сформированные на предшествующих операциях механической обработки. Кроме того, как показывают ряд исследований, шероховатость упрочненной поверхности в этих случаях даже несколько уменьшается, что связано с локальным оплавлением лазерным лучом вершин микровыступов.

Однако актуальным являются вопросы о необходимости введения дополнительной механической обработки лазерных покрытий (шлифование и притирка), формирование которых сопровождается оплавлением обрабатываемой поверхности (легирование). Изменение геометрических размеров изделия в этом случае связано с образованием лазерных валиков (см. рис. 5), величина которых h_b определяет припуск Z под окончательную обработку. Высота h_b зависит преимущественно от двух взаимосвязанных факторов: толщины предварительно нанесенного покрытия и режимов лазерной обработки.

На процесс образования лазерных валиков достаточно большое влияние оказывает дисперсность предварительно нанесенного покрытия и равномерность, с которой оно было нанесено.

На рис. 6 представлена профилограмма легированной поверхности, снятая в направлении перпендикулярном большей стороне лазерного пятна ($k_{II} \approx 1$).

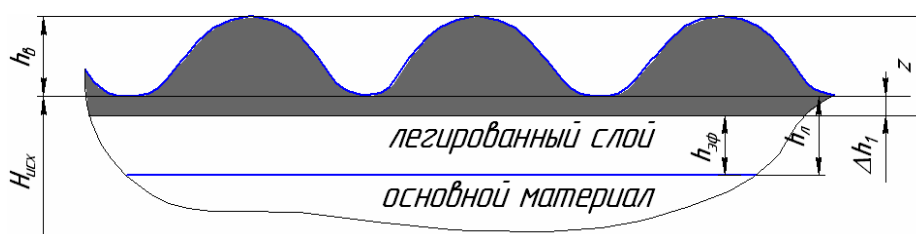


Рис. 5. Схема формирования эффективной глубины упрочнения $h_{эф}$ при полном удалении лазерных валиков (h_l – глубина легирования; $h_{эф}$ – эффективная глубина упрочнения; Δh_1 – толщина дополнительно снимаемого поверхностного слоя; z – припуск под последующую механическую обработку).

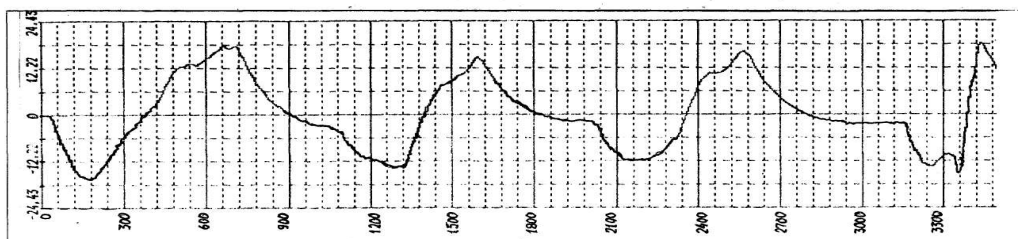


Рис. 6. Профилограммы борхромированной (с оплавлением лазером) поверхности.

Полученные с оплавлением покрытия можно подвергать шлифованию и притирке с частичным или полным удалением валиков. Способ частичного удаления валиков имеет достоинства для поверхностей, работающих в условиях трения-скольжения, так,

как остающиеся впадины между обрабатываемыми поверхностями валиков могут играть роль масляных “карманов”.

Однако в любом случае при дополнительной механической обработке удаляются самые твердые слои и соответственно это ведет к снижению глубины упрочнения.

Таким образом, изучение закономерностей формирования валиков на поверхности является актуальным вопросом в сфере эффективности процессов лазерной обработки с оплавлением.

Для успешного проведения технологических процессов лазерной обработки материалов используются элементы компьютерной оптики (фокусаторы излучения) [8], которые позволяют создавать требуемое пространственное распределение плотности мощности энергетических потоков.

В настоящее время в научных публикациях все чаще появляются работы, посвященные созданию универсальных оптических устройств состоящих из узлов фиксации, охлаждения, юстировки и вращения элемента компьютерной оптики. Данные устройства устанавливаются в практически любой технологический модуль выпускаемых СО₂-лазерных комплексов для обработки материалов, тем самым достигается значительное расширение функциональных возможностей оборудования.

3. Заключение

В заключение хотелось бы отметить, что те вопросы, которые затрагиваются в данной статье, показывают пути развития лазерных технологий применительно к машиностроению. Зачастую данные технологии являются неприемлемыми вследствие дороговизны и неэффективности, однако бурное развитие компьютерной техники дает возможность на любой стадии разработки повысить эффективность процесса и сделать использование лазера доступным на любом предприятии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов. – М.: Мир, 1986. – 504 с.
2. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В. и др. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
3. Патент №2345174 РФ. Состав для поверхностного лазерного упрочнения деталей из конструкционных сталей / И. В. Говоров, А. М. Семенцев, А. Н. Чемодуров.
4. Dausinger F. Lasers with different wave lengths – implication for various applications // 3rd European Conference on Laser Treatment of Materials Coburg (Germany): Spechsal Publ Group. 1990. – P. 1–13.
5. Stem G. Absorptivity of cw CO₂, CO and YAG-lasers beams by different metallic alloys // 3rd European Conference on Laser Treatment of Materials Coburg (Germany): Spechsal Publ Group. 1990. – P. 25–35.
6. Кукин С. Ф. Оптимизация схем лазерного термоупрочнения наружных цилиндрических поверхностей // Ремонт, восстановление, модернизация, 2004. – №2. – С. 21–24.
7. Чемодуров А. Н. Формирование поверхностных слоев деталей машин лазерным излучением // материалы Междунар. науч.- практ. конф., – Брянск: БГТУ, 2009. – Ч.2. – 367 с.
8. Методы компьютерной оптики // Под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2000. – 688 с.

Поступила в редколлегию 19.01.2016 г.