

УДК 620.22

**ПОВЫШЕНИЕ ПОГЛОЩАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С ПОМОЩЬЮ ПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ**

**В.В. КОСТРИЦКИЙ**, канд. техн. наук, доц. **А.Л. ЛИСОВСКИЙ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассмотрены процессы взаимодействия лазерного излучения с поверхностным слоем металла при лазерном воздействии, а также основные факторы, влияющие на поглощательную способность металла при поверхностной обработке лазерным лучом. Приведены основные способы повышения поглощательной способности металла, в частности при помощи различных покрытий. Определены наиболее эффективные, удовлетворяющие всем требованиям вещества, используемые в качестве покрытий при лазерном воздействии на поверхностный слой металла. Выявлены способы оценки поглощающей способности, базирующиеся на измерении энергии поглощенного и отраженного излучения.*

**Введение.** Лазерное излучение, обладая уникальными свойствами, позволяет сконцентрировать на поверхности обрабатываемого материала энергию при плотностях мощности от предельно малых до  $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>. Эту энергию можно передавать материалу бесконтактно, быстро и строго дозированно. Локальность тепловых процессов, происходящих в поверхностном слое при таких условиях облучения, обеспечивает высокие (до  $10^{80}$ С/с) скорости нагрева и охлаждения, не достигаемые при использовании традиционных методов. Управляя интенсивностью лазерного облучения, можно реализовать различные процессы в поверхностном слое обрабатываемого материала: нагрев до температур, не превышающих температуру плавления, но достаточных для структурно-фазовых превращений, нагрев до температуры, превышающей температуру плавления, но ниже температуры испарения, интенсивное испарение поверхности [1].

В любом случае воздействие луча лазера на поверхностный слой можно условно разделить на несколько характерных стадий:

- поглощение светового потока и передача его энергии тепловым колебаниям решётки твёрдого тела;
- нагревание вещества без его разрушения;
- развитие испарения вещества в зоне воздействия луча лазера и разлёт продуктов разрушения;
- остывание вещества после окончания действия лазерного излучения.

Таким образом, для того чтобы применить любой из способов лазерной обработки, следует решить первоочередную задачу – передать необходимое количество энергии поверхностному слою металла. Однако один из недостатков лазерного нагрева поверхности металла – значительные потери электроэнергии вследствие отражений лазерного луча от поверхности. Металлы, имеющие гладкую, блестящую поверхность, отражают 80...96 % лазерного излучения [2]. Поэтому необходимо эффективное превращение энергии лазерного излучения в тепловую энергию.

**Основные факторы, влияющие на поглощательную способность.** Проблема лазерной обработки материалов заключается в перенесении максимального количества энергии лазерного излучения в материал. В любом случае лазерного теплового воздействия на материалы важна не просто мощность лазерного излучения, а мощность, поглощенная материалом и идущая на получение полезного результата. Поглощательная способность в той или иной форме фигурирует во всех лазерных технологических процессах.

На первой стадии теплового воздействия лазерного излучения на материал фазовое состояние твердого тела не успевает измениться. Основные явления в этом случае заключаются в отражении и поглощении излучения поверхностью, нагревании поверхности, распространении тепла вглубь среды за счет теплопроводности (рис. 1).

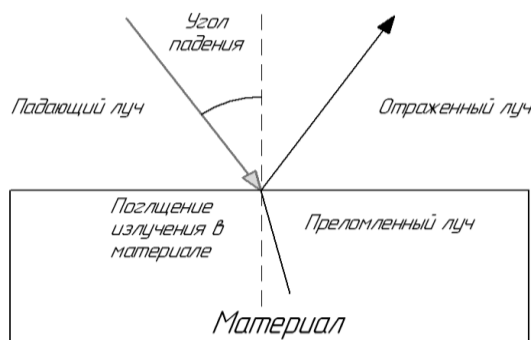


Рис. 1. Схематическое изображение падающего, отраженного и преломленного лучей

Процесс взаимодействия света с поверхностью твердого непрозрачного тела происходит следующим образом: световая волна, падающая на поверхность, взаимодействует с электронами, возбуждая их колебания. Вынужденные колебания электронов приводят к возникновению отраженной волны. Если электроны в твердом теле полностью свободны, излучение полностью отражается, а поглощение отсутствует. Если электроны частично связаны, то часть энергии падающей волны передается твердому телу, вызывая его нагревание. Весь процесс взаимодействия света с электронами обычно протекает в тонком поверхностном слое, и можно говорить о взаимодействии света с поверхностью твердого тела [3].

Поэтому поглощательная способность  $A$ , по сути, представляет КПД процесса:

$$A = 1 - R,$$

где  $R$  – коэффициент отражения.

На поглощательную способность оказывает влияние большое число факторов, среди которых и свойства облучаемого материала, и свойства лазерного излучения. Особое влияние эти факторы оказывают на эффективность поглощения излучения при лазерной поверхностной обработке без оплавления поверхности. При этом поглощательная способность может изменяться в пределах 25...90 %. Это равноценно тому, если бы мощность лазерной установки колебалась в таких пределах [4].

Представим полный процесс поглощения лазерного излучения обрабатываемым материалом.

Баланс энергии включает как существенные потери энергии (на отражение), так и не существенные (тепловое излучение, энергия структурно-фазовых превращений). Анализ этой схемы показывает возможные пути управления процессом, но для этого надо знать закономерности изменения поглощательной способности.

Поглощательная способность уменьшается с увеличением длины волны лазерного излучения. Для излучения коротковолновой области спектра (ультрафиолетовая область  $\lambda < 0,4$  мкм, эксимерные лазеры  $\lambda = 0,2$  мкм) характерна высокая поглощательная способность практически для всех материалов, как диэлектриков, так и проводников. Для видимого диапазона и ближней инфракрасной области  $0,4 < \lambda < 5$  мкм (Ag, на парах меди, алюмоитриевый гранат YAG:Nd, рубин, He-Ne, YAG) характерна низкая поглощательная способность на уровне 20...25 % как для металлов, так и неметаллов – необходимы специальные меры повышения поглощательной способности. Для излучения с  $\lambda > 5$  мкм (CO, CO<sub>2</sub>) диэлектрики имеют практически 100 % поглощение, металлы – плохую поглощательную способность, составляющую 20...25 %.

С увеличением температуры поглощательная способность существенно растет, что обусловлено температурой поверхности, зависящей от следующих факторов:

- теплофизические свойства: чем больше теплопроводность материала, тем поглощательная способность будет меньше. Например, закаленная сталь имеет поглощательную способность выше, чем сырая;
- режим облучения: с увеличением диаметра пятна фокусирования увеличивается поглощательная способность. Поэтому увеличение поглощательной способности наблюдается из-за преобладающего влияния увеличения площади нагретого материала, поглощающего излучение.

Поглощательная способность уменьшается с уменьшением шероховатости поверхности. Макроскопически шероховатая поверхность представляет собой большое число микроскопических участков, ориентированных под разными углами к направлению падения световой волны, а поэтому характеризуемых различным значением коэффициента отражения, в этом случае наблюдается рассеяние света поверхностью. Зависимость коэффициента отражения от угла падения и его величина различны для хорошо отполированной и шероховатой поверхностей [1; 5].

**Поглощающие покрытия.** Известно несколько способов повышения поглощательной способности металлов: изменение шероховатости поверхности, образование оксидных пленок при обработке в окислительной среде, нанесение специальных поглощающих покрытий и др. Наиболее простым является способ нанесения поглощающих покрытий. Для повышения поглощательной способности целесообразно придавать поверхности свойства, характерные для абсолютно черного тела, т.е. обеспечить многократное переотражение падающего излучения на элементах поверхности. При этом вещества, используемые в качестве поглощающих покрытий, должны отвечать предъявляемым к ним основным требованиям: экономичность, высокая адгезия с металлом, легкость снятия с поверхности, хорошая теплопроводность и термическая стойкость, высокая адгезия с металлом, легкость снятия с поверхности, хорошая теплопроводность и термическая стойкость, противопожарность, неядовитость, растворимость в простых растворителях) и т.д.

На основании предъявляемых требований можно выделить следующие виды покрытий. Одними из самых распространенных покрытий, применяемых при лазерной обработке, являются покрытия, получаемые химическим оксидированием – пленка Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> толщиной 5 мкм, время нанесения порядка 10 мин. При этом такое покрытие наносится на сложные криволинейные поверхности достаточно быстро и равномерно. Достоинством этого способа является то, что не усложняется технологический процесс изготовления детали. Поскольку такое покрытие применяется для защиты от коррозии, а также придания изделиям товарного вида, оксидирование целесообразно применять для углеродистых и низколегированных сталей.

Второй вид покрытий получают химическим фосфатированием. Химическое фосфатирование – это процесс, при котором на облучаемые поверхности наносятся соли ортофосфорной кислоты  $Mn_3(PO_4)$  или  $Zn_3(PO_4)$ . Покрытия достаточно просто наносятся вручную окрашиванием специальным составом или обработкой в химических ваннах. Фосфатированию целесообразно подвергать чугуны и углеродистые стали, если они работают в узлах трения, поскольку пористое строение за счет аккумуляции масла снижает коэффициент трения [6].

К следующему виду покрытий относятся две группы покрытий, наносимые распылением или окрашиванием. Первая группа содержит сажистые пигменты (черная гуашь, полиграфическая краска, черная паста). Вторая группа покрытий (цветные гуаши:  $ZnO$  – белая гуашь,  $Pb_2O_5$  – желтая гуашь) представляет собой пастообразные суспензии неорганических пигментов и наполнителей в водноклеевом связующем на основе декстрина с добавками пластификаторов, антисептиков и других компонентов. Композиции первой и второй групп изготавливаются серийно отечественными предприятиями. Покрытия можно наносить с помощью пульверизатора. Для увеличения сцепления покрытий с основой в водный раствор гуаши целесообразно добавлять поверхностно активные вещества (ПАВ).

Кроме названных разработан ряд специальных покрытий МСЦ-510, СТ504, ФС-1М (таблица).

Специальные покрытия

Покрытие	Основа	Цвет	Материал	A, %
МСЦ-510	Силикат натрия, метилцеллюлоза	Белый	Чугуны	80
СТ504	Силикат натрия	Темно-коричневый	Стали	90
ФС-1М	Алюмохромфосфат	Темно-зеленый	Алюминиевые сплавы	90

Приведенные в таблице покрытия МСЦ-510, СТ504 применяются для сталей и чугунов, наносятся распылением. Покрытие СТ504 является более эффективным, но сложнее удаляется после обработки; МСЦ-510 удаляется легко – смыванием водой. Покрытие ФС-1М разработано специально для алюминиевых сплавов, используется при обработке с оплавлением поверхности, способствует образованию практически зеркальной поверхности [7].

Облучаемые поверхности можно обработать хлорным железом, азотной кислотой и др. (химическим травлением поверхности), что также повышает поглощательную способность. Кроме этого можно применять и уникальный способ нанесения в вакууме вольфрамового порошка и порошков других металлов. Эти частицы на поверхности образуют структуры типа щетки, что также повышает эффективность обработки. Однако эти способы ухудшают качество поверхности, поэтому требуется последующая обработка.

В последнее время при лазерной обработке металла стали часто применять покрытие, представляющее собой коллоидный спиртовой раствор газовой сажи. При испарении спирта между частицами образуются поры, куда проникает и где поглощается лазерное излучение. Для того чтобы эти частицы удерживались и создавали каркас покрытия, в раствор добавляется клей.

В результате оксидирования на поверхности образуется тонкая пленка темно-синего цвета толщиной 5 мкм, которая обеспечивает поглощательную способность до  $A = 85$  %. Покрытие после химического фосфатирования представляет собой пленку темно-серого цвета толщиной 3...5 мкм, имеющую пористую структуру. Такие покрытия обеспечивают поглощательную способность поверхности металла 75...80 %. Покрытия, содержащие сажистые пигменты, обеспечивают поглощательную способность в пределах 70 %. Поглощательная способность покрытий на основе цветных гуашей с различными добавками составляет 75 %. Покрытия с содержанием сажистых пигментов и на основе гуашей наносятся на поверхность металла толщиной от 20 до 30 мкм. Специальные покрытия типа СТ504, МСЦ-510, ФС-1М имеют довольно высокие показатели поглощательной способности  $A = 80...90$  %, однако из-за высокой химической активности применяются для узкой группы металлов и сплавов. Толщина таких покрытий не должна превышать 20 мкм. Поверхности, обработанные химическим травлением или нанесением металлических порошков, имеют поглощательную способность 75 %. Применение покрытий из коллоидных спиртовых растворов повышает поглощательную способность до 93 %.

Таким образом, наиболее эффективные покрытия – это покрытия, полученные химическим оксидированием, и покрытия, представляющие собой коллоидные спиртовые растворы газовой сажи (рис. 2). Также немалую роль при выборе поглощающих покрытий играют такие параметры, как экономическая эффективность и простота нанесения покрытия. Покрытия, которые получают оксидированием, химическим травлением и нанесением металлических порошков, требуют специального оборудования и создания специальных условий, что значительно усложняет процесс нанесения покрытий и увеличивает их стоимость. Их применение целесообразно в условиях крупносерийного и массового производства. Что касается процесса нанесения покрытий распылением или окрашиванием, то он не требует специального оборудования и особых условий и зачастую обеспечивается вручную или при помощи недорогостоящих

механизмов. Поэтому эти способы применяются в условиях массового, серийного и единичного производства. Но на поглощательную способность оказывает влияние толщина покрытия, которая для каждого способа нанесения имеет свою оптимальную величину. Оптимальная толщина покрытий обеспечивает полное поглощение лазерного излучения при двукратном прохождении прямого и отраженного от материала основы излучения. Ее значение для покрытий, получаемых химическим оксидированием, фосфатированием, составляет 4...5 мкм, а для покрытий, наносимых окрашиванием, напылением – 20...30 мкм, что повышает затраты на эти покрытия, приближая их стоимость к стоимости покрытий, наносимых первым способом. При толщине меньше оптимальной часть излучения отражается. При толщине больше оптимальной покрытие начинает интенсивно поглощать излучение и разрушаться (сгорать), в результате чего увеличиваются потери за счет отражения.

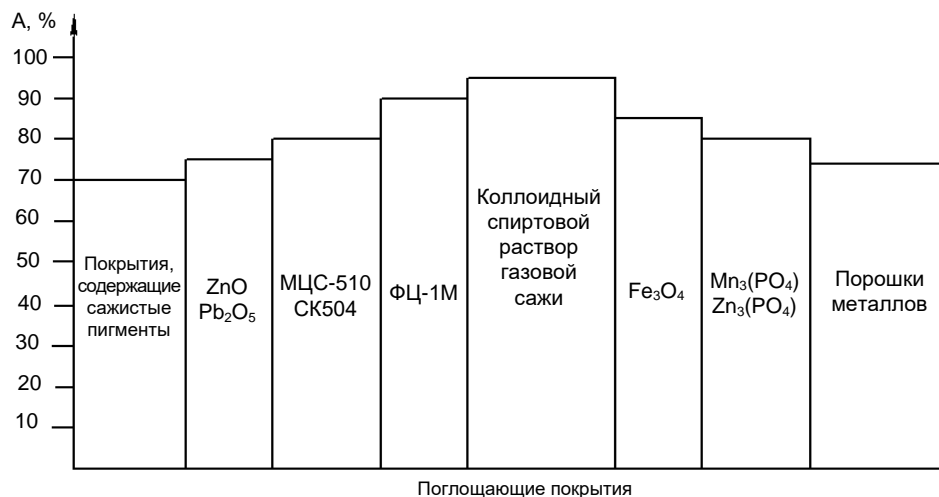


Рис. 2. Поглощательные способности покрытий, наиболее часто используемых при обработке лазерным излучением

Все сказанное выше касается условий обработки без оплавления поверхности. При наличии оплавления поверхности, связанного с образованием кратера (сварка, наплавка, микролегирование), проблема повышения поглощательной способности отпадает, поскольку кратер является «ловушкой» лазерного излучения в результате многократного переотражения. При относительном движении к этому эффекту (появление кратера) добавляется эффект от впереди бегущей тепловой волны [5 – 7].

**Способы измерения поглощательной способности материалов.** Для оценки поглощающей способности применяются способы, базирующиеся на измерении энергии поглощенного излучения, а также способы, базирующиеся на измерении отраженного лазерного излучения. Самым простым способом измерения поглощенной энергии является калориметрический. Образец нагревается лазерным излучением

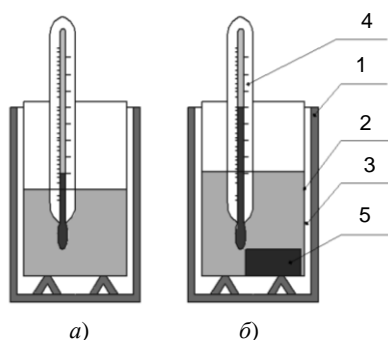


Рис. 3. Калориметр: а – без образца; б – с образцом: 1 – внешний пластмассовый стакан; 2 – внутренний алюминиевый стакан; 3 – воздушный промежуток; 4 – термометр; 5 – образец

определенной мощностью в течение определенного промежутка времени. Измеряя температуру жидкости, в которую помещается образец после облучения, ее теплоемкость и ее массу, можно определить количество энергии, поглощенной образцом. Ее отношение к энергии падающего излучения является поглощающей способностью. Если требуется точное определение, то для этого надо знать теплоемкость калориметра, массу и температуру сосуда. Несмотря на простоту, способ достаточно точен и его можно применять для калибровки приборов с относительной схемой измерения (рис. 3) [8].

Способы измерения отраженного излучения с помощью системы термопар или переотражением отраженного излучения с помощью зеркальной пластины являются простыми способами, но имеют недостаточную точность ввиду того, что поверхности изменяют свои оптические свойства, поэтому применяются крайне редко [9].

**Заключение.** Все металлы и их сплавы могут обрабатываться лазерным излучением. Однако один из недостатков лазерной обработки поверхности металла – значительные потери энергии вследствие отражений лазерного луча от поверхности. На поглощательную способность оказывает влияние большое

число факторов, таких как свойства облучаемого материала и свойства лазерного излучения. При этом поглощательная способность может изменяться в пределах от 25 до 90 %, что равноценно тому, если бы мощность лазерной установки колебалась в таких пределах.

Один из наиболее действенных способов повышения поглощательной способности металла при воздействии лазерного излучения – нанесение различных покрытий, которые увеличивают поглощательную способность в несколько раз, тем самым увеличивая эффективность поверхностной лазерной обработки. По способу нанесения покрытия можно разделить на те, которые получают оксидированием, химическим травлением и нанесением металлических порошков, и на покрытия, нанесенные распылением или окрашиванием. И те и другие имеют как преимущества, так и недостатки и используются в зависимости от серийности производства и требований, предъявляемых к качеству поверхности после обработки лазерным излучением. Однако по основной характеристике поглощающих покрытий – поглощательной способности – из первой группы можно выделить покрытия, получаемые химическим оксидированием (пленка  $Fe_3O_4$ ). Это покрытие обеспечивает поглощательную способность до 85 %. Из второй группы выделяется покрытие, представляющее собой коллоидный спиртовой раствор газовой сажи. Применение таких покрытий повышает поглощательную способность до 93 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лахтин, Ю.Н. *Металловедение и термическая обработка металлов* / Ю.Н. Лахтин. – М.: Металлургия, 1977.
2. Васильев, С.В. Влияние неразрушающего воздействия лазерного излучения на состав и физико-химические свойства приповерхностного слоя металла / С.В. Васильев, А.Ю. Иванов, В.И. Недолгов // *Вестн. Гродн. гос. ун-та им. Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление.* – Гродно, 2001. – С. 78 – 80.
3. Лосев, В.Ф. *Физические основы лазерной обработки материалов: учеб. пособие* / В.Ф. Лосев, Е.Ю. Морозова, В.П. Ципилев. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2011.
4. Барвинок, В.А. *Высокоэффективные лазерно-плазменные технологии в машиностроении* / В.А. Барвинок, В.И. Мордасов, В.П. Шорин. – М.: МЦНТИ, 1997.
5. Скобло, Т.С. *Термическое упрочнение и восстановление деталей лазером* / Т.С. Скобло, А.А. Науменко, А.В. Сайчук // *Международный информационно-технический журнал. Оборудование и инструмент.* – 2004. – № 2. – С. 14 – 17.
6. Бессарабов, А.В. Изменение отражательной способности металлических зеркал под воздействием лазерного излучения / А.В. Бессарабов, Н.В. Жидков, С.Б. Корнер // *Квантовая электроника.* – Варшава, 1978. – Т. 5, № 2 – С. 325 – 330.
7. Матвеев, Ю.И. Особенности лазерной обработки поршневых колец судовых среднеоборотных дизелей / Ю.В. Матвеев, С.С. Казаков // *Вестн. Астраханск. Гос. техн. ун-та. Серия: Морская техника и технология.* – Астрахань, 2010. – № 2. – С. 34.
8. Корнеев, В.В. Способ определения температурных полей и эффективного коэффициента поглощения при обработке поверхности металла движущимся лазерным лучом / В.В. Корнеев, А.И. Явохин // *Физика и химия обрабатываемых материалов.* – Львов, 2008. – С. 157 – 165.
9. Говоров, И.В. Повышение поверхностной прочности углеродистой стали при лазерном нанесении хромсодержащих покрытий / И.В. Говоров, Ю.В. Колесников, Л.И. Миркин // *Физика и химия обработки металлов.* – 1988. – № 5. – С. 68 – 71.

Поступила 18.01.2013

#### INCREASE OF ABSORPTION ABILITY OF METAL LAYER UNDER LASER TREATMENT BY ABSORBING COATING

V. KOSTRITSKI, A. LISOVSKI

*The processes of interaction of laser radiation with the surface layer of metal under laser treatment, and the main factors affecting absorption ability of the metal at a surface treatment with a laser beam are studied. The main ways to increase the absorption capacity of the metal in particular with different coatings are presented. The most effective, satisfying all the requirements materials used as coatings for laser treatment of the surface layer of the metal are defined. Ways to evaluate the absorption capacity, based on the measurement of the energy absorbed and reflected radiation are identified.*