

simosti ot izmenyayushchikhsya pokazatelei nesimmetrii v raspredelitel'nykh setyakh 0,38 kV s sosredotochennoi nagruzkoi // Vestnik KrasGAU. – 2014. – № 11. – S. 186-195.

4. Naumov I.V. Vybor mesta ustanovki simmetriruyushchego ustroystva v seti 0,38 kV // Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva. – 2002. – № 4.

5. Naumov I.V., Balishev O.K. Optimization of development of spatially distributed electric networks. 2005 IEEE St. Petersburg Power Tech Conference.

6. Naumov I.V. A method for estimation of additional power losses in spatially distributed electric networks. In: Influence of Distributed and Renevabe Generaion on Power Security. Proceedings of the GRIS Workshop 2006, Magdeburg 6-8 December 2006.

7. Naumov I.V i dr. Simmetriruyushchee ustroystvo dlya trekhfaznoi chetyrekhprovodnoi seti s reguliruemyimi parametrami // Patent na poleznuyu model' № 61063 – Opublikovano 10.02.2007. Byul. № 4.



УДК 621.373

**В.И. Шастин**  
V.I. Shastin

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

### THE WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF LASER THERMOHARDENING OF IRON-CARBON ALLOYS

**Ключевые слова:** лазерное модифицирование, селективное покрытие, износостойкость, термоупрочнение, скорость нагрева, лазерное излучение, поглощение, автотракторная техника.

Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработке унифицированных поглотителей лазерной энергии, повышающих эффективность лазерного модифицирования металлических поверхностей. Показано, что зона термического влияния от воздействия лазерного излучения существенно зависит от коэффициента отражения металлической поверхности. Приведены экспериментальные зависимости зоны термического влияния от использования различных поглотителей энергии лазера. Предложено селективное двухслойное покрытие на основе полимерного плёнообразователя. Установлено, что предлагаемое покрытие, по сравнению с традиционными, способно заметно увеличить глубину зоны термического влияния. Экспериментально выявлено оптимальное соотношение компонентов поглощающего покрытия.

**Keywords:** laser modification, selective coating, wear resistance, thermohardening, heating rate, laser emission, absorption, automobiles and tractors.

The results of theoretical and experimental studies on the development of uniform laser energy absorbers to improve the efficiency of laser modification of metal surfaces are discussed. It is shown that the zone affected by the heat of laser emission essentially depends on the reflection coefficient of the metal surface. The experimental dependences of the heat affected zone by using different laser energy absorbers are presented. A selective two-layer coating based on a polymer film former is proposed. It is found that the proposed coating can significantly increase the depth of the heat affected zone as compared to the conventional coatings. The optimum ratio of the absorbing coating components has been experimentally found.

**Шастин Владимир Иванович**, к.т.н., доцент, зав. каф. технологии деревообработки, Сибирская академия права, экономики и управления, г. Иркутск. E-mail: kafedra-td@mail.ru.

**Shastin Vladimir Ivanovich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Head, Chair of Woodworking Technologies, Siberian Academy of Law, Economics and Management, Irkutsk. E-mail: kafedra-td@mail.ru.

#### Введение

Высокоскоростной нагрев, присущий лазерному воздействию (ЛВ), в процессах термоупрочнения металлов и сплавов находит все более широкое применение, в том числе при производстве, эксплуатации и ремонте сельскохозяйственной техники. Стимулирующим фактором промышленного внедрения этой прогрессивной технологии является активно развивающееся современное лазерное

оборудование и самих технологий лазерного модифицирования в более широком их понимании (кроме упрочнения, к ним можно отнести, легирование, напыление, наплавку и различные виды термообработки).

Лазерная закалка эффективно применяется для большинства сталей, чугунов и других сплавов, используемых в автотракторной технике. При этом, как доказано многими исследованиями, износостойкость термоупроч-

ненных материалов может увеличиваться в 10 раз и более для чугунов, в 3-8 раз – для углеродистых и легированных сталей в зависимости от их состава [1, 2]. Примерно такого же уровня повышения износостойкости можно достичь и для ряда цветных сплавов.

Легкая управляемость излучением лазера в пространстве позволяет вести обработку труднодоступных зон поверхности обрабатываемых деталей, в том числе локальных участков, соизмеримых с диаметром сфокусированного пятна.

Важным критерием эффективности данного метода термообработки является параметр отношения площади (объема) обрабатываемых участков к общей поверхности (объему) детали. Так, при нанесении упрочняющих полос по винтовой линии гильзы цилиндра ДВС их износостойкость увеличивается в 3,5 раза без заметного снижения износа сопрягаемых деталей – поршневого кольца и самого поршня. Лазерная закалка шатунных и опорных шеек коленчатого вала ДВС, как показали испытания, позволила увеличить их ресурс в два раза. Более значительное увеличение ресурса (в 3-4 раза) достигнуто при испытании тормозных барабанов, выжимного диска сцепления и других деталей автотракторной техники. При этом обрабатываемая площадь объекта может составлять 10-15% от общей его поверхности. Использование одной лазерной технологической установки (ЛТУ) на машиностроительном предприятии способно обеспечить термообработку нескольких тысяч деталей в год.

В отличие от традиционных методов термоупрочнения нагрев при лазерной закалке является не объемным, а поверхностным, поэтому, учитывая высокую концентрацию лучистой энергии лазера, скорости нагрева и охлаждения весьма высоки (скорость охлаждения может достигать  $10^6$  К/с, скорость нагрева на один-два порядка выше). Вследствие этого формирование структуры имеет свои специфические особенности, она становится мелкодисперсной, а при сверхвысоких скоростях охлаждения может принимать аморфную форму. Наряду с этим существенно меняются физико-механические свойства поверхностного слоя, увеличивается его микротвердость (до 2000 Мпа и выше) повышается коррозионная стойкость, а также трибомеханические характеристики [3, 4]. При этом практически отсутствуют вероятность образования объемных деформаций обрабатываемых деталей и необходимость последующей дополнительной термической обработки.

#### Объект исследования

Излучение, падая на поверхность материала, проникает в него и поглощается посредством электронной проводимости. Таким об-

разом, тепловые процессы при лазерном нагреве имеют ту же физическую природу, что и традиционные способы теплового воздействия на металлы. Это дает основание рассматривать распространение теплоты в металлах при лазерной обработке с классических позиций теплопроводности [4].

Проникновение излучения в материал описывается уравнением:

$$E(z) = E(1-R)e^{-\alpha z}, \quad (1)$$

где  $E(z)$  – энергия излучения, проникшая в материал на глубину  $z$ ;

$\alpha$  – коэффициент поглощения;

$R$  – коэффициент отражения.

Количество энергии, поглощенной в слое толщиной  $\Delta z$ , равно

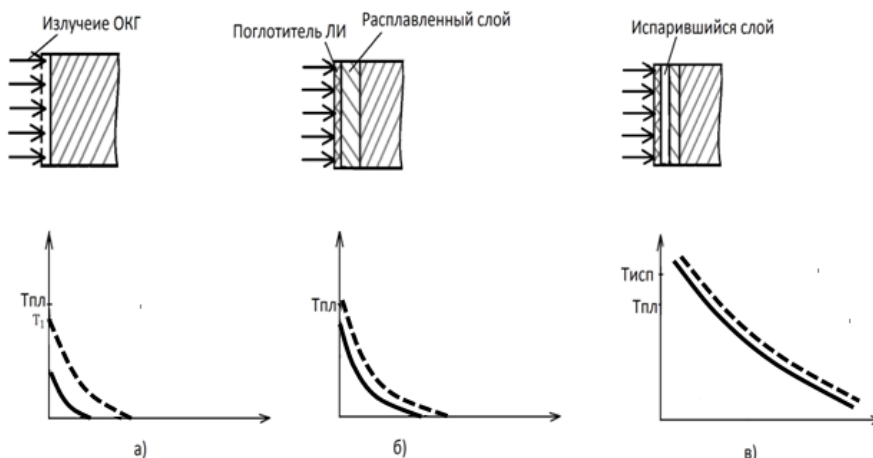
$$|\Delta E(z)| = E(1-R)\alpha e^{-\alpha z} \Delta z. \quad (2)$$

Наибольшее количество энергии излучения поглощается на поверхности, снижаясь при этом по мере углубления в материал. Уравнение (2) справедливо для различных материалов, хотя для конкретных материалов могут меняться не только значения  $\alpha$  и  $R$ , но и механизм теплопередачи.

В металлах кванты световой энергии поглощаются в основном свободными электронами. Энергия электронов на поверхности имеет максимальное значение, затем снижается за счет рассеивания в процессе столкновения с атомами и ионами кристаллической решетки. Эти процессы имеют место в тонком скин-слое толщиной  $1/\alpha$ .

Интенсивность отражения энергии лазерного излучения (ЛИ) во многом определяется значением коэффициента отражения, который зависит от рода материала и длины волны излучения  $\lambda$ . Для излучения  $\text{CO}_2$  – лазера  $\lambda = 10,6$  мкм, рассматриваемого в настоящее время как наиболее перспективный среди других технологических ОКГ коэффициент отражения, для большинства металлов близок к единице. Поэтому энергетическая эффективность процессов лазерной обработки в чистом виде достаточно низка. Для ее повышения обрабатываемую поверхность подвергают разнообразным видам обработки. Наиболее эффективными средствами являются изменение топографии поверхности и нанесение поглощающих покрытий (далее поглотителей). Последние с практической точки зрения наиболее востребованы, т.к. не требуют дополнительной обработки, сохраняя при этом исходное состояние поверхности.

Основные из них представлены схематично на рисунке 1. Верхняя часть показывает воздействие ЛИ на материал, нижняя – на распределение температуры в поверхностном слое с поглотителем и без него.



**Рис. 1. Схема физических процессов и распределения температур в поверхностном слое. Кривая с поглотителем энергии лазера показана пунктиром: а –  $T < T_{пл}$ ; б –  $T_{пл} < T < T_{исп}$ ; в –  $T \geq T_{исп}$**

При воздействии ЛИ сравнительно невысокой плотности мощности обрабатываемый материал нагревается до некоторой температуры  $T$ . При этом температура поверхностного слоя распределяется, как это показано на рисунке 1 а. С увеличением плотности мощности или времени воздействия теплового источника температура поверхности металла может достичь температуры плавления  $T_{пл}$ . При этом на поверхности образуется расплав, фронт которого проникает вглубь материала (рис. 1 б). Последующее увеличение световой энергии лазера может достичь и/или превысить температуру испарения  $T_{исп}$ . В результате испарения поверхность оголяется, высокотемпературный фронт с еще большей скоростью перемещается все более к глубоким слоям обрабатываемого материала (рис. 1 в). В случае обработки с поглотителем процессы начала плавления и испарения могут наступить ранее, чем при обработке без поглотителя.

Эти три режима лазерного нагрева и сопровождающие их физические явления в материале лежат в основе методов поверхностного термоупрочнения (модифицирования).

Стадия нагревания (рис. 1а) может быть как основной, так и предварительной, этот вид термообработки является одним из основных, не вызывающий изменения рельефа поверхности. Последний (рис. 1в) имеет место, когда используются режимы облучения, вызывающие разрушение материала. Средний из них промежуточный, иногда его характеризуют режимом глазурирования или выравнивания рельефа поверхности.

Основной характеристикой, определяющей тепловое состояние поверхностного слоя, является градиент температурного поля, знание которого дает возможность оценить температуру в разных точках зоны термиче-

ского влияния (ЗТВ). Скорости нагрева и охлаждения зависят прежде всего от параметров ЛИ, которые в конечном счете определяют характер структурных и фазовых превращений в поверхностном слое материала. При этом аномально высокая скорость охлаждения приводит к термодинамически неравновесному состоянию в ЗТВ, что идентифицирует различные процессы, в том числе и процессы формирования закалочных структур [5].

Особенно высокие значения коэффициентов отражения металлических поверхностей характерны для излучения  $CO_2$ -лазеров, рассматриваемых в настоящее время в качестве наиболее перспективных технологических лазеров.

Как показывает практика, применение поглотителей в виде покрытий, становится в большинстве случаев обязательным условием.

Основные требования, предъявляемые к покрытиям:

- должны быть простыми в изготовлении и экономичны;
- должны иметь достаточную адгезионную и когезионную прочность;
- должны быть экологически чистыми и стабильными при хранении;
- обладать высокой температурой плавления и горения;
- иметь высокую теплопроводность, для обеспечения эффективного подвода энергии к обрабатываемой поверхности;
- не должны оказывать негативного влияния на трибомеханические показатели сопрягаемых пар трения и др.

Между тем универсального покрытия, в достаточной степени удовлетворяющего этим требованиям, пока не найдено.

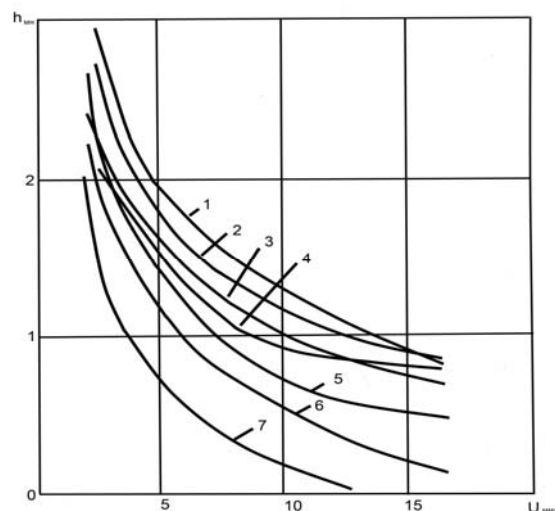
**Целью** исследований является разработка унифицированного поглотителя ЛИ, максимально отвечающего вышеуказанным требованиям. В соответствии с этой целью решается **задача** получения экспериментального подтверждения его эффективного использования в практике лазерного модифицирования металлических поверхностей.

### Экспериментальная часть

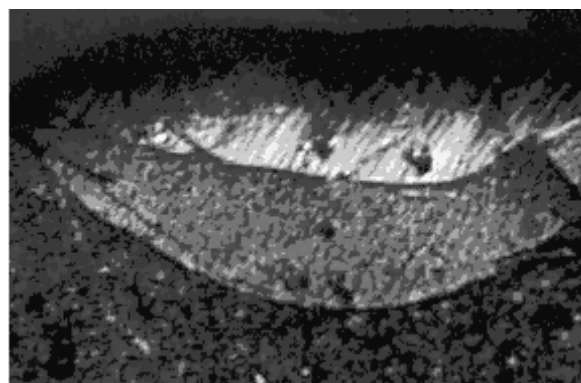
Основываясь на исследования оптических и теплофизических свойств полимерных, лакокрасочных покрытий [6, 7] было предложено использовать в качестве пленкообразователя полиакриловый лак АС-82. Такой выбор был обусловлен минимальным экранирующим действием парогазового факела по отношению к падающему потоку излучения  $\text{CO}_2$ -лазера, с одной стороны, и максимальной толщиной оптически прозрачного слоя среди других пленкообразователей, – с другой. В качестве поглотителя лучистой энергии лазера в состав лака вводилась мелкодисперсная сажа, полученная от сжигания резины в различных объемных соотношениях. Это позволило снизить коэффициент отражения до 6% [6], учитывая, что для стальных поверхностей без покрытия он может превышать 85% [4]. Кроме того, высокая термостойкость и теплопроводность сажи, а также надежный контакт с обрабатываемой поверхностью способствуют эффективной теплопередаче в поверхностный слой подложки. На рисунке 2 показаны кривые зависимости изменения глубины ЗТВ от скорости перемещения образца относительно луча лазера для различных поглотителей. Наряду с предлагаемым покрытием испытаниям были подвергнуты наиболее эффективные поглотители, используемые в практике термоупрочнения.

Анализ полученных зависимостей показал, что наибольшая глубина ЗТВ достигается при использовании 2-слойного селективного покрытия. В работе [3] отмечается, что покрытие в виде аэрозоля сажи, а также оксиды алюминия, цинка и железа имеют в этом смысле наилучшие результаты.

Глубина ЗТВ определялась с помощью анализа микрошлифов на металлографическом микроскопе МИМ-8, используя при этом объект-микрометр для градуировки шкалы окуляра микроскопа. На рисунке 3 показана микроструктура ЗТВ образца с 2-слойным селективным покрытием. Для фокусировки ЛИ использовалась солевая КС-линза с фокусным расстоянием 200 мм. Обработка велась на технологическом  $\text{CO}_2$ -лазере «Хебр-1» мощностью 800 Вт.



**Рис. 2. График зависимости глубины ЗТВ образцов из стали 45 от скорости перемещения луча лазера при использовании различных поглотителей, при плотности мощности излучения  $E = 10^8 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ :**  
 1 – 2-слойный селективный поглотитель (1-й слой с 30%-ным содержанием сажи; 2-й верхний слой – лак АС-82 толщиной 3-5 мкм); 2 – однослойный (30% сажи); 3 – 50% сажи; 4 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с полимерным связующим; 5 – 10% сажи; 6 – сульфидирование поверхности; 7 – аэрозольная сажа



**Рис. 3. Микроструктура ЗТВ образца с 2-слойным селективным покрытием.  $\times 60$**

### Выводы

Таким образом, данный тип поглощающего покрытия может оказаться близким к универсальному, по крайней мере для железоуглеродистых сплавов. Наряду с высокой поглощательной способностью и низким экранирующим действием по отношению к падающему потоку излучения оно обеспечивает получение стабильной толщины, достаточную адгезию к подложке, высокую теплопроводность, надежные условия хранения и технологичность. Технология их нанесения достаточно проста, легко встраивается в автоматизированный технологический цикл, поглощающие

свойства этого покрытия не зависят от химического состава обрабатываемого материал, в отличие от покрытий, получаемых при оксидировании, фосфатировании и др. В отличие от последних, данный состав покрытий не может отрицательно сказаться на показателе износостойкости, при возможном высокотемпературном внедрении его в поверхностные слои оксидов и карбидов высокой твердости. Их присутствие может негативно влиять на показатель износостойкости, сопрягаемых пар трения, вызывая ускоренный износ.

#### Библиографический список

1. Рэди Дж. Промышленные применения лазеров: пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 638 с.
2. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
3. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
4. Коваленко В.С., Верхотуров А.Д., Головкин Л.Ф., Подчерняева И.А. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. – М.: Наука, 1986. – 276 с.
5. Руденко М.Г. Кавитация и фазовые превращения в условиях термодинамической неравновесности жидкости: дис. ... докт. техн. наук / ГОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный технологический университет». – Улан-Удэ, 2012. – 361 с.
6. Шастин В.И. Отражение и поглощение лакокрасочными покрытиями излучения СО<sub>2</sub>-лазера // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1980. – № 5. – С. 20-21.
7. Шастин В.И. Удаление лакокрасочных покрытий излучением лазера // Лазерные технологические установки и перспективы их применения на предприятиях отрасли: материалы совещания. – М.: НИАТ, 1986. – Вып. 2. – С. 60-66.

#### References

1. Redi Dzh. Promyshlennyye primeneniya lazerov: per. s angl. – M.: Mir, 1981. – 638 s.
2. Rykalin N.N., Uglov A.A., Kokora A.N. Lazernaya obrabotka materialov. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 296 s.
3. Grigor'yants A.G. Osnovy lazernoi obrabotki materialov. – M.: Mashinostroyeniye, 1989. – 304 s.
4. Kovalenko V.S., Verkhoturorov A.D., Golovko L.F., Podchernyaeva I.A. Lazernoe i elektroerozionnoye uprochneniye materialov. – M.: Nauka, 1986. – 276 s.
5. Rudenko M.G. Kavitatsiya i fazovyye prevrashcheniya v usloviyakh termodinamicheskoi neravnovesnosti zhidkosti: diss. ... dokt. tekhn. nauk / GOUVPO «Vostochno-Sibirskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet». – Ulan-Ude, 2012. – 361 s.
6. Shastin V.I. Otrazheniye i pogloshcheniye lakokrasochnymi pokrytiyami izlucheniya SO<sub>2</sub>-lazera // Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye. – 1980. – № 5. – S. 20-21.
7. Shastin V.I. Udalenie lakokrasochnykh pokrytii izlucheniem lazera // Lazernyye tekhnologicheskyye ustanovki i perspektivy ikh primeneniya na predpriyatiyakh otrasli: materialy soveshchaniya. – M.: NIAT, 1986. – Vyp. 2. – S. 60-66.

