

Рис. 2. Фрагмент варианта имитационного моделирования колесной машины по круговой траектории: 1 – модуль скорости движения колесной машины, м/с; 2, 3 – скорости перемещения центра масс колесной машины по осям  $OX$  и  $OY$ , м/с; 4, 5 – уменьшенные в 20 раз перемещения центра масс колесной машины по осям  $OX$  и  $OY$ , м; 6, 7 – увеличенные в 55 раз углы поворота управляемых колес: передней и средней осей, рад; 8, 9, 10 – увеличенные в 40 раз углы увода шин колес: передней, средней и задней осей, рад; 11 – курсовой угол, рад

#### Литература

1. Антонов, А. А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей / А. А. Антонов. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с. : ил.

УДК 621.785.048.7

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ИЗ ЧУГУНОВ

О.Г. Девойно, Н.В. Спиридонов

*Белорусский национальный технический университет, Минск:*

С.Ф. Кукин, А.А. Баркун, Б.Ю. Яровой, А.С. Кукин

*РУП «Минский тракторный завод»*

**Введение.** Чугуны перлитного класса, высокопрочный (ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70) и серый (СЧ15, СЧ20, СЧ25) широко используются в тракторостроении для изготовления корпусных деталей. Выбор конкретной марки чугуна высокопрочного или серого зависит от типа детали, ее функционального назначения, контактно-силовых нагрузок испытываемых рабочими поверхностями в процессе эксплуатации, а также характера и типа из-

носа испытываемых контактными, трущимися поверхностями деталей. В ряде случаев, из-за тяжелых локальных нагрузок и значительного износа (абразивный, адгезионный, усталостный и другие виды износа) испытываемых контактируемыми поверхностями, возникает необходимость в поверхностном упрочнении проблемных зон. С позиций экономичности, эффективности и качества в настоящее время наиболее предпочтительным методом поверхностного упрочнения является лазерное термоупрочнение [1].

До настоящего времени в промышленности для процесса лазерного термоупрочнения в основном использовалась технологическая схема закалки с помощью расфокусированного пятна лазерного луча, находящегося в поступательном движении. При использовании данной схемы достигается баланс между мощностью излучения, площадью расфокусированного луча и скоростью перемещения, при которой достигается закалка поверхности металла. Поперечное сечение зоны закалки в данном случае по форме отражает распределение интенсивности излучения по сечению луча. Преимуществом этого метода является простота. Для увеличения ширины обрабатываемой зоны обработку ведут несколькими проходами с чередующимися полосами. В зонах перекрытия могут образовываться отпущенные зоны с пониженной твердостью и это не позволяет получить однородную глубину закалки, а исходная шероховатость и микрорельеф обработанной поверхности изменяется, для чего требуется вводить дополнительную финишную операцию после лазерной обработки [2].

Практика работы с излучением  $\text{CO}_2$ -лазеров показала, что лазерное термоупрочнение поверхности металлов практически невозможно без использования специальных методов подготовки поверхностей с целью повышения их поглощательной способности [3]. Это требует дополнительных трудовых, материальных и энергетических ресурсов, связанных с нанесением, сушкой специальных светопоглощающих покрытий, а также их снятием после лазерной обработки, что в конечном счете снижает эффективность и качество лазерной обработки.

Лазерным термоупрочнением из жидкого состояния (проплавление поверхности на требуемую глубину) получают упрочненные слои большей глубины, чем закалкой из твердого состояния (обработка без оплавления поверхности). В данном случае формируется упрочненный слой состоящий из трех различных зон: а) зоны закалки из твердого состояния, состоящей из мартенсита, остаточного аустенита, нерастворенного цементита и графита; б) переднего фронта зоны затвердевания, состоящей из мартенсита и остаточного аустенита; в) центральной зоны оплавления с дендритной структурой, образованной дендритами аустенита в ледебуритной матрице

[4]. Характер распределения твердости металла по глубине упрочненного слоя имеет вид, представленный на рис. 1 [4].

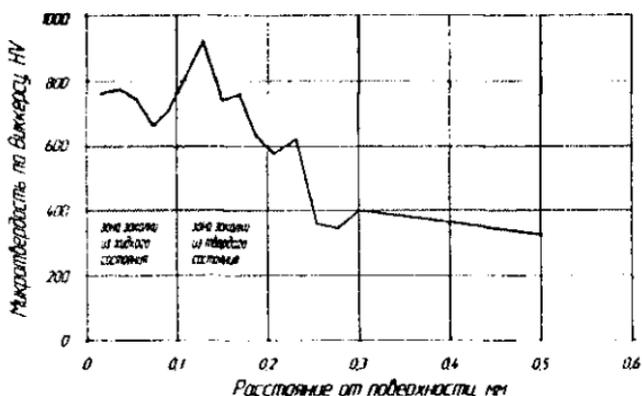


Рис. 1. Распределение твердости металла по глубине упрочненного слоя [4]

Лазерная обработка с оплавлением поверхности в ряде случаев диктуется необходимостью получения ледебуритных упрочненных слоев, обладающих утонченной структурой с метастабильными фазами, а также для устранения поверхностных дефектов, измельчения и перераспределения различных включений, присущих данному типу чугунов [1]. Однако лазерная обработка с проплавлением поверхности на определенную глубину требует лазерных установок большой удельной мощности и более длительного времени воздействия на обрабатываемую поверхность, необходимого для полного растворения графита в расплаве [5]. Кроме того, при лазерном проплавлении чугунов возможно образование следующих дефектов в поверхностном слое: поры (из-за возникающих газов при испарении или выгорании некоторых компонентов сплава), поверхностных кратеров (из-за извержения газа на поверхности), трещины, которые зарождаются в зоне пор, кратеров и частиц нерастворенного графита. Плотность пор увеличивается с увеличением размеров графита, плотности мощности лазерного излучения, уменьшением скорости перемещения лазерного луча и увеличением степени перекрытия следов лазерной обработки. Причиной зарождения трещин является сверхвысокие скорости охлаждения и затвердевания раствора в зоне оплавления, которые, однако, не устраняются заранее установленным подогревом, и требуется тщательный подбор пара-

метров обработки и исходной микроструктуры подлежащего обработке чугуна [4].

Как видно из вышеизложенного, получение качественных упрочненных слоев при лазерной обработке чугуна с прошиванием представляет сложную техническую задачу. Требуется не только наличие высококвалифицированного персонала, соответствующего технического оснащения и опыта работы в данной области, но и значительное время и затраты на обработку удовлетворяющих производств режимов обработки.

В этой связи большой интерес представляет лазерная закалка чугуна из твердого состояния, которая в большей мере лишена недостатков, присущих лазерной закалке чугуна из жидкого состояния. Однако данный процесс упрочнения необходимо осуществлять в узком температурном диапазоне между температурой закалки (900 °С) и температурой плавления (1140 °С). Реализация лазерной закалки поверхностей чугунных деталей без оплавления поверхности представляет сложную техническую задачу, однако реально реализуемую в современных условиях с использованием соответствующих технологических методов.

**Постановка задачи.** Основными параметрами, характеризующими эффективность и качество процесса лазерного термоупрочнения, являются:

- равномерность по глубине получаемого упрочненного слоя;
- неизменность исходной шероховатости и микрорельефа обрабатываемой поверхности;
- максимальная производительность процесса при минимальных эксплуатационных затратах.

К технологическим факторам, оказывающим свое влияние на вышеуказанные параметры процесса лазерного термоупрочнения поверхностей деталей, изготавливаемых из чугунов, следует отнести следующие:

- геометрическую форму пятна лазерного луча на обрабатываемой поверхности и закон распределения плотности энергии в нем [6];
- способ механической обработки поверхности перед лазерной обработкой, микрогеометрия и шероховатость ее поверхности [7];
- совокупную стоимость эксплуатации лазерной установки и соответствующую ей технологическую схему лазерной обработки [2, 7, 8].

**Влияние геометрической формы пятна лазерного луча и закона распределения плотности энергии в нем на эффективность процесса и качество получаемых термоупрочненных слоев.** В процессе лазерного термоупрочнения температура разогрева поверхности зависит от времени взаимодействия движущегося пятна лазерного луча. Для получения одинаковой температуры нагрева по всей ширине следа лазерной обработки не-

обходимо равномерное распределение плотности энергии лазерного луча по пятну и одинаковое время его воздействия.

Создание данных условий при лазерной обработке возможно только квадратным, прямоугольным или линейным пятном с равномерной плотностью лазерной энергии по всему сечению. Это повышает эффективность использования лазерной энергии в процессах упрочнения, а также обеспечивает получение равномерного по глубине упрочненного слоя [6].

На рис. 2 представлено влияние геометрической формы пятна лазерного луча и закона распределения плотности энергии в нем на глубину, профиль зоны упрочнения и удельную энергию процесса упрочнения [6].

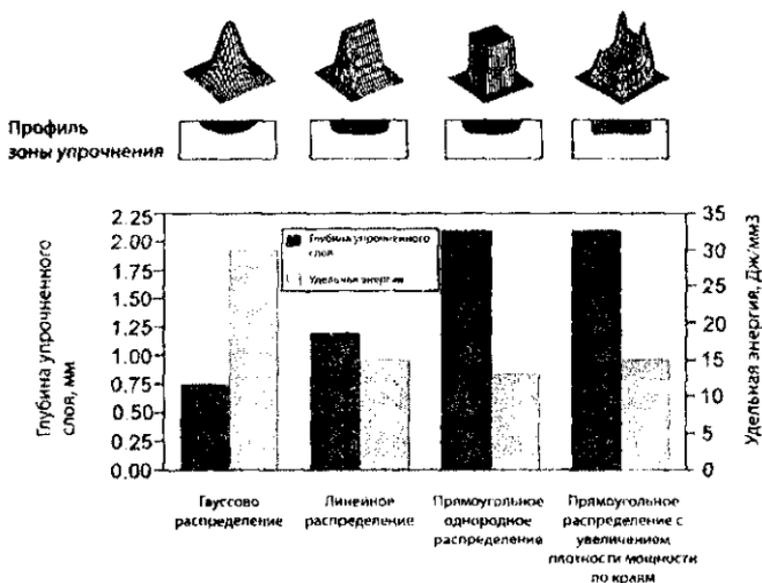


Рис. 2. Влияние геометрической формы пятна лазерного луча и закона распределения плотности энергии в нем на глубину, профиль зоны упрочнения и удельную энергию процесса [6]

Очевидно, что квадратное пятно с равномерным распределением плотности энергии в нем наиболее экономично для использования в лазерном термоупрочнении и дает равномерный по глубине слой упрочнения при минимальной удельной энергии. Круглое пятно с гауссовым распределением плотности энергии имеет наиболее худшие показатели по энергозатратам и качеству получаемого термоупрочненного слоя.

В этой связи использование квадратного, прямоугольного или линейного пятна с равномерным распределением обеспечивает одинаково

время взаимодействия участков поверхности с лазерным излучением и формирование упрочненного слоя равномерного по глубине, механическими свойствам и шероховатостью поверхности по всей ширине следа лазерной обработки.

**Влияние способа механической обработки поверхности перед лазерной обработкой, микрогеометрии и шероховатости ее поверхности.** Шероховатость поверхности – один из основных технологических параметров изделий, величина которого определяется технологическими требованиями и техническими условиями работы деталей.

В соответствии с динамикой процесса приработки контактируемых поверхностей деталей [9] пластические деформации поверхностей в зонах контактов микронеровностей трансформируются в упругие и в этом случае неравновесная шероховатость поверхностей переходит в равновесную. Известно, что при равновесной шероховатости поверхностей в подвижных сопряжениях наблюдаются минимально возможные силы трения, а также минимальный износ контактирующих поверхностей за счет увеличения опорной поверхности сопряженной пары трения, что является одним из факторов повышения эксплуатационных свойств узла в целом. В реальных условиях взаимодействия контактирующих пар шероховатость поверхности оценивается высотой микронеровностей профиля поверхности  $Rz$ , средним шагом микронеровностей  $Sa$ , максимальной  $H_{max}$  и минимальной  $H_{min}$  высотой микронеровностей и средним радиусом скругления вершин микронеровностей  $\rho$  [10].

Как известно [11], ультразвуковым поверхностно-пластическим деформированием получают поверхности с минимальной шероховатостью  $Ra$  0,13 – 0,2 для стали,  $Ra$  0,5 для чугуна, и наибольшей опорной поверхностью за счет формирования микрорельефа с большим средним радиусом скругления вершин микронеровностей  $\rho$ . Поэтому ультразвуковая поверхностно-пластическая обработка перед лазерной обработкой является наиболее предпочтительной, особенно при лазерном термоупрочнении деталей из чугунов [12], так как обеспечивает более эффективное проникновение углерода в металлическую матрицу по бездиффузионному механизму, снижая его содержание в свободном виде, а также более интенсивное измельчение, выкрашивание и удаление графита, выходящего на поверхность, с последующей ликвидацией пор и пустот на месте бывших графитовых включений за счет деформационного уплотнения. Это позволяет избежать микроплавлений поверхности в зонах выхода частиц углерода на поверхность, который выгорает с образованием кратеров с оплавленными кромками даже в режиме обработки без оплавления поверхности.

Влияние совокупной стоимости эксплуатации лазерной установки и соответствующей ей технологической схемы лазерной обработки на эффективность и качество процесса лазерного термоупрочнения. Данные по совокупной стоимости эксплуатации различных типов лазеров представлен на рис. 3 [8].

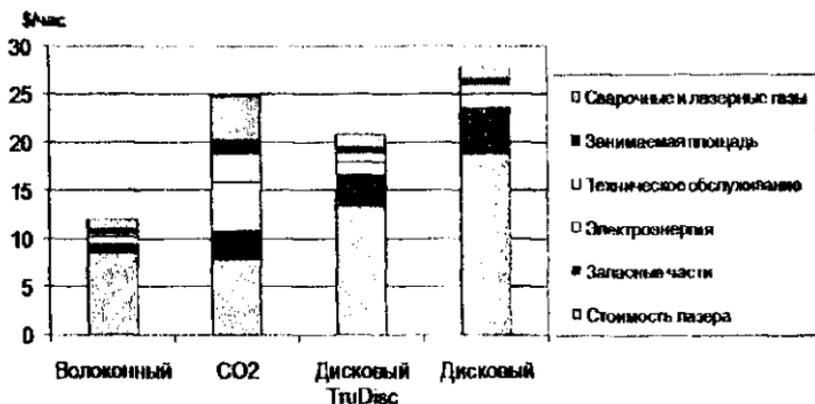


Рис. 3. Сравнительные данные по совокупной стоимости эксплуатации различных типов лазеров в США (срок эксплуатации 8 лет) [8]

Как видно из представленной диаграммы, наиболее экономичным в эксплуатации является волоконный лазер. Кроме того, технологическими схемами обработки с применением волоконного лазера возможно формирование квадратного, прямоугольного или линейного пятна с равномерным распределением плотности энергии в нем, используя кварцевую стеклянную оптику. Для CO<sub>2</sub>-лазеров сложные по своей реализации технологические схемы преобразования лазерного излучения в пятно с равномерным распределением возможны только на базе металлооптики [2, 13, 14].

Простая типовая оптическая схема преобразования излучения волоконного лазера в пятно в виде линии с равномерным распределением представлена на рис. 4.

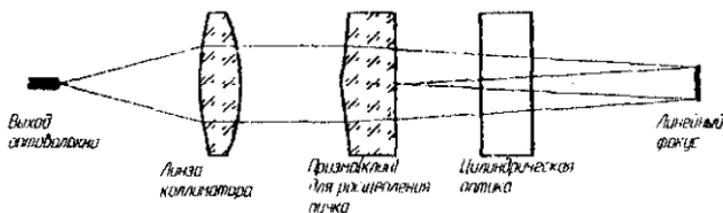


Рис. 4. Оптическая схема преобразования излучения волоконного лазера в пятно в виде линии с равномерным распределением

**Выводы.** Представленный анализ влияния различных технологических факторов на эффективность и качество лазерного термоупрочнения деталей, изготавливаемых из чугунов, показал, что:

- лазерное термоупрочнение деталей из чугуна с перлитной основой наиболее эффективно производить без оплавления поверхности;
- для реализации данного процесса необходимо использовать волоконные лазеры с системами преобразования лазерного излучения в квадратное, прямоугольное или линейное пятно с равномерной плотностью лазерной энергии;
- наиболее предпочтительным методом механической обработки перед лазерным упрочнением является ультразвуковое поверхностно-пластическое деформирование.

### Литература

1. Mordike, B.L. Improvement of wear properties by laser surface treatment / B.L. Mordike // Laser Treatment of Materials. ECLAT'90: proc. 3d European Conf. – 2 Vol. Eds. H.W. Bergmann, R. Kupfer. – Vol. 1. – P. 371 – 376.
2. Григорьянц, А.Г. Методы поверхностной лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов. – М.: Высш. шк., 1987. – 191 с.
3. Закалка ссырых чугунов излучением CO<sub>2</sub>-лазера / В.М. Андрияхин [и др.] // Автомобильная промышленность. – 1980. – № 7. – С. 25 – 26.
4. Vilar, R. Laser surface melting of cast iron / R. Vilar, Figueira J. Salgado, R. Sabino // Laser Treatment of Materials. ECLAT'90: proc. 3d European Conf. – 2 Vol. Eds. H.W. Bergmann, R. Kupfer. – Vol. 1. – P. 593 – 604.
5. Laser surface melting of cast iron / W. Pompe [et al] // Laser Treatment of Materials. ECLAT'90: proc. 3d European Conf. – 2 Vol. Eds. H.W. Bergmann, R. Kupfer. – Vol. 1. – P. 399 – 410.
6. Hoffmann, P. Recent Developments of System Technology for Surface Treatment / P. Hoffmann, R. Dierken // Surface Treatment and Ablation. LANE 2007: proc. 5d European Conf. – 2 Vol. Eds. M. Geiger, A. Otto, M. Schmidt. – Vol. 2. – P. 715 – 721.
7. Оптимизация технологии лазерного термоупрочнения / С.Ф. Кукин // Вест. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки, промышленность. – 2008. – № 8. – С. 51 – 57.
8. Industrial Laser Solutions. Feb. 2005 & IPI Photonics.
9. Демкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
10. Справочник по триботехнике / под ред. М. Хебды, А.В. Чычиндзе. – Т. 1: Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.: ил.
11. Муханов, И.И. Импульсная упрочняющее-чистящая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом / И.И. Муханов. – М.: Машиностроение, 1978. – 45 с.
12. Способ лазерной химико-термической обработки чугунных изделий: а.с. 1662121 СССР МКИ С23С8/00 / В.Н. Чачин, Л.А. Солодкин, О.Г. Девочкин, С.Ф. Кукин, М.А. Кардаполова (СССР). – № 4728232; заяв. 08.08.89 (не публикуется).

13. Способ обработки поверхности стальных изделий: а.с. 1400089 СССР МКИ С21D1/09 / С.Ф. Кукин, Н.Н. Дорожкин, Е.В. Пасах (СССР). – № 4102337; заяв. 19.05.86 (не публикуется).

14. Способ поверхностного термического упрочнения стальных изделий: а.с. 1587922 СССР МКИ С21D1/09, 1/06 /С.Ф. Кукин, Е.В. Пасах, А.С. Фомченко, В.П. Дубняков (СССР). – № 4491357; заяв. 10.10.88 (не публикуется).

УДК 621:681.5

## РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Л.М. Акулович

*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск;*

*Е.З. Зевелева, М.Л. Хейфец*

*УО «Полоцкий государственный университет»*

**Введение.** Современными тенденциями развития производства являются внедрение технологических комплексов (ТК), являющихся сложными электромеханическими системами, реализующими процессы комбинированной обработки, их оснащение инструментами, установками, устройствами автоматизации. Интеграция электромеханики и микроэлектроники при компоновке машин привела к появлению комплексных интегрированных мехатронных модулей движения рабочих органов и узлов машин, а также создаваемого на их основе оборудования. Такая интеграция требует использования систем компьютерного управления движениями, деталями, инструментами, источниками энергии, транспортными и другими механизмами [1]. В результате составляющие части мехатронных комплексов не просто дополняют друг друга, но и объединяются таким образом, чтобы образованная система обладала качественно новыми свойствами [2].

В настоящее время получили развитие мехатронные конструкции, отличающиеся высокой точностью, компактностью и многофункциональностью. Соединение технологических и транспортных составляющих комплекса в пространстве и совмещение их воздействий во времени обеспечивает производству компактность. Соединение узлов точной механики с электротехническими, электронными и компьютерными компонентами для проектирования и производства качественно новых комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциями обеспечивают на современ-