

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ
ВНУТРЕННИХ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ТОРМОЗНЫХ МЕХАНИЗМОВ ТРАКТОРА «БЕЛАРУС»**

*Канд. техн. наук КОБЯКОВ О. С.,
доктора техн. наук, профессора СПИРИДОНОВ Н. В., ДЕВОЙНО О. Г.,
БАРКУН А. А., ПИЛЕЦКАЯ Л. И.*

*Белорусский национальный технический университет,
РУП ПО «Минский тракторный завод»*

Одной из проблем при разработке и реализации технологических методов и режимов лазерного термоупрочнения внутренних и труднодоступных поверхностей деталей машин является выбор оптимального компоновочного решения размещения фокусирующих и отклоняющих систем внутри или вне упрочняемой детали, а также способов перемещения детали и подачи лазерного излучения в зону термообработки.

Задачами исследований являются: изучение процессов лазерного термоупрочнения деталей из высокопрочного чугуна марки ВЧ-50, выбор оптимальных технологических и компоновочных схем лазерного термоупрочнения внутренних поверхностей применительно к вопросам термоупрочнения контактных поверхностей деталей тормозных механизмов трактора «Беларус», сравнительный анализ теплофизических режимов и свойств упрочненного металла для случаев нормального падения луча и при его падении под некоторым углом к упрочняемой поверхности.

Как показывает практика, динамика процессов взаимодействия тормозных механизмов зависит, прежде всего, от фрикционных и износостойких свойств материалов пар трения, нагрузочно-скоростных и температурно-силовых условий взаимодействия. Тормозная система модели 1221М, механизмы которой работают в масляной смазочной среде, отличается повышенной надежностью, долговечно-

стью и отвечает ряду современных требований и международных стандартов качества. Однако, с точки зрения равноресурсности, ряд деталей тормозных механизмов нуждается в повышении их ресурса по прочностным и износостойким характеристикам. Практика показывает, что использование традиционных методов термоупрочнения (объемная закалка, закалка ТВЧ и т. д.) не обеспечивает должного эффекта по прочностным и износостойким свойствам и создает дополнительные проблемы при последующей механической обработке упрочненных деталей. С учетом этих обстоятельств наиболее актуальным является использование технологии лазерного термоупрочнения. Лазерное термоупрочнение изделий из чугуна представляет большой практический интерес в связи с широким использованием данного металла в сельскохозяйственном машиностроении.

Проведенные нами исследования [1] показали, что при средней выходной мощности лазера 1,1 кВт непрерывного излучения «Комета-2» при пятне нагрева диаметром 3–3,5 мм формируется зона термоупрочнения глубиной 0,8–1,2 мм. При нормальном угле падения луча микротвердость приповерхностных участков составляла 9200–10000 МПа, зон термического влияния – до 5500–5800 МПа, а глубина зон – до 0,3–0,5 мм при исходной микротвердости чугуна ВЧ-50 2400–2450 МПа. Оптимальная скорость перемещения пятна нагрева составля-

ла 270–300 мм/мин. Микротвердость металла анализировалась с использованием микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 100 г и времени экспозиции 10 с, а также на приборе Micromet при нагрузке 200 г и времени 5 с по ГОСТ 9450–46. Размерные параметры зон упрочнения анализировались с помощью микроскопа МБС-9 с микрометрической шкалой с ценой деления 0,01 мм.

Как показано в [2], при термоупрочнении высокопрочного чугуна при выходной мощности лазера ЛГН-702 0,8 кВт температура металла на глубине 0,25–0,3 мм в процессе закалки достигает 815–820 °С, а на поверхности – до 1000–1150 °С. Известно, что температурный интервал закалки чугунов от твердой к жидкой фазе достаточно узок, поскольку аустенизация перлита заканчивается при температуре 1000 °С, а уже при температуре 1150 °С происходит закалка металла из жидкой фазы [3]. Анализ микроструктуры зон термоупрочнения, проведенный нами с использованием методов оптической микроскопии с помощью микроскопов Neophot и «Эпигност» при увеличении в 250–1000 раз, показал, что микроструктура металла формируется из очень мелких дендритов или ячеек аустенита, не превышающих нескольких микрометров, с включениями игольчатого мартенсита. В междендритных промежутках располагается двухфазная структура, состоящая из ледебурита и цементита. Наличие этой фазы и мартенситной структуры обеспечивает высокую твердость и износостойкость металла. Характерная микроструктура приповерхностной зоны упрочненного чугуна показана на рис. 1.



Рис. 1. Микроструктура высокопрочного чугуна марки ВЧ-50, полученная лазерным термоупрочнением с плавлением металла ($\times 1000$)

Применительно к чугунам с шаровидными включениями графита (в том числе и к чугуну ВЧ-50), основными структурными составляющими которых являются мартенсит и аустенит, присутствие аустенитной фазы обеспечивает высокую твердость (до 62–65 HRC) и эксплуатационную стойкость термоупрочненного металла вследствие превращения метастабильного аустенита в мартенсит [4]. Сравнительный анализ параметров термоупрочнения металла при падении луча под углом 90° и 35° выявил некоторое уменьшение глубины закаленного слоя и значений микротвердости. По нашему мнению [1], это связано с изменением теплофизических режимов нагрева и уменьшением плотности мощности луча в пятне. В случае полого падающего луча под углом q_2 (рис. 2) происходит трансформация проекции луча на поверхность из круга площадью $S_1 = \pi r_n^2$ в эллипс площадью $S_2 = \pi ab$, где a и b – полуоси эллипса. Тогда вследствие увеличения площади пятна нагрева (заштрихованный участок) уменьшение плотности мощности составит

$$\Delta q_n = A_{\text{эф}} \frac{P}{\pi ab} - A_{\text{эф}} \frac{P}{\pi r_n^2},$$

где $A_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент поглощения излучения; P – мощность излучения в пятне.

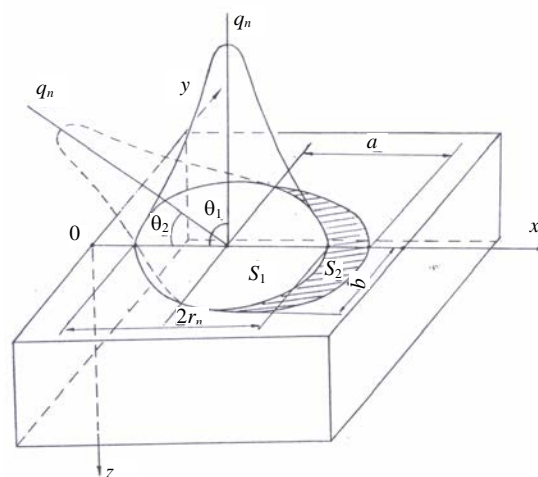


Рис. 2. Теплофизическая модель формирования пятна нагрева на поверхности металла в случае нормального и полого падающего лазерных лучей в зону обработки

В отличие от модельного представления, пятно нагрева в реальных условиях будет представлять изотерму плавления металла в виде

вытянутого эллипса несимметричной формы. Сравнительный анализ плотности мощности при различных углах падения лазерного луча осуществлялся с использованием измерителя мощности лазерного излучения РСИ-60-56ПП. Следовательно, угол падения луча является одним из существенных технологических факторов, влияющим на ряд свойств и параметров процесса термоупрочнения.

Как показал анализ размеров и конфигурации упрочняемой корпусной детали тормоза (рис. 3), входное отверстие детали позволяет осуществлять термоупрочнение в пределах углов падения луча от 35° до 65° . Естественно, что с увеличением угла падения луча потери плотности мощности будут уменьшаться. Следует отметить, что значительные потери мощности за счет зеркального отражения от поверхности расплавленной зоны наблюдались при угле падения менее 30° [5]. Другим фактором, возможно влияющим на величину потерь мощности, является экранирование зоны нагрева вследствие возникновения облака лазерной плазмы [4], сформировавшейся на приповерхностных участках упрочняемого металла.

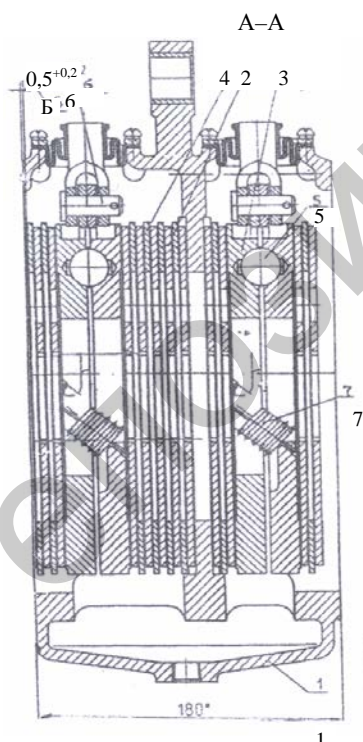


Рис. 3. Сборочный чертеж 180° озных механизмов модели 1221М трактора «Беларус». Проекция А-А: 1 – корпус тормозных механизмов; 2 – нажимные диски; 3 – то же разжимные; 4 – то же промежуточные; 5 – шаровые опоры разжимных дисков; 6 – шарнирный механизм; 7 – возвратные пружины

Механизм формирования лазерной плазмы достаточно хорошо изучен, однако до конца не сложилось однозначного и четкого представления о первопричинах и физике процессов ее формирования на первоначальных этапах. По-видимому, наиболее вероятным следует считать механизм формирования плазмы за счет ионизации паров металла и парогазовых компонентов [6], присутствующих над поверхностью расплава и обладающих низким потенциалом ионизации. В этом случае одной из составляющих процесса может являться шероховатость и структура упрочняемой поверхности, сформировавшиеся в результате предварительной механической обработки металла. Есть мнение [4], что микрорельеф поверхности, а именно микровыступы металла, за очень короткий промежуток времени успевают нагреться до температуры кипения, что на несколько порядков быстрее, чем остальная масса металла в зоне термообработки. Существенное влияние на процессы ионизации примесей могут оказывать испарившиеся покрытия, наносимые на поверхность деталей для увеличения поглощения лазерного излучения. В ряде работ отмечалось существенное влияние исходной шероховатости обработанной поверхности на глубину зон термоупрочнения в процессе лазерного легирования металлов [7]. Замерами шероховатости с помощью профилографа-профилометра модели 252-А образцов из чугуна ВЧ-50, обработанных методом чистового фрезерования, были получены значения $Ra = 5,35$ мкм. Образцы обрабатывались на режимах, аналогичных обработке деталей. В результате лазерной закалки металла из жидкой фазы происходят значительные изменения как профиля, так и шероховатости поверхности. Например, при замерах параметров поверхности вдоль упрочненных дорожек величина Ra уменьшалась до $Ra = 3,2$ мкм при средних значениях $H_{max} = 11,5$ мкм и $H_{min} = 6,2$ мкм. Следовательно, такие технологические параметры, как исходная шероховатость и профиль поверхности упрочняемого металла, оказывают существенное влияние на глубину закаленного слоя, а также, по-видимому, косвенно влияют на процессы формирования лазерной плазмы.

В результате проведенных исследований и анализа влияния угла падения излучения на свойства и параметры зон упрочнения нами

экспериментальными и расчетными методами [8] получены режимы термоупрочнения, близкие к оптимальным. Была разработана и предложена технологическая компоновочная схема осуществления процессов термоупрочнения. С этой целью используется технологическая оснастка, включающая многокоординатный манипулятор (рис. 4), управляемый по заданной программе от компьютера, в промышленном исполнении.

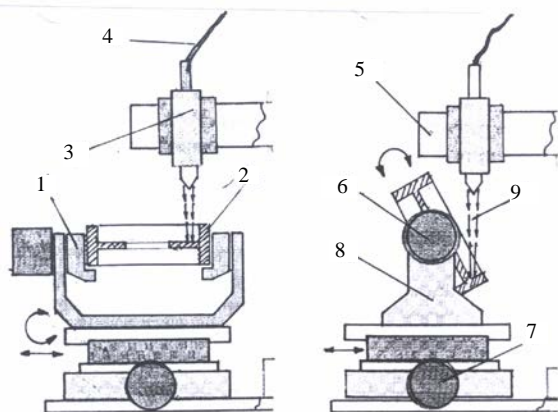


Рис. 4. Технологическая схема лазерного термоупрочнения внутренних поверхностей корпусных деталей тормозных механизмов трактора: 1 – рама крепления детали; 2 – упрочняемая деталь; 3 – лазерная фокусирующая головка; 4 – волоконно-оптический кабель; 5 – станция лазерной головки; 6 – шаговый двигатель поворота детали; 7 – двигатель продольного перемещения; 8 – станина; 9 – лазерный луч

Относительное перемещение детали осуществляется системой шаговых двигателей с редукторами, а также вентильными двигателями без редуктора, задающими скорость перемещения с точностью до 0,2 мм и угол поворота детали с точностью до 1 угл. мин.

В результате проведенных исследований и анализа лазерных термоупрочняющих комплексов нами была предложена компоновочная схема технологического лазерного промышленного участка на базе новых современных диодных лазеров с волоконно-оптической системой транспортировки лазерного излучения в зону обработки. При этом предполагается полная автоматизация процесса с использованием робота-манипулятора. Общая компоновочная схема аппаратного оснащения производственного участка приведена на рис. 5. На участке предполагается использовать совре-

менную лазерную аппаратуру [9] на базе диодного иттербиевого лазера. Лазер генерирует мощное излучение с длиной волны 1,07 мкм, что не требует нанесения специального поглощающего покрытия. Ресурс работы диодов составляет более $50 \cdot 10^3$ ч на максимальном токе.

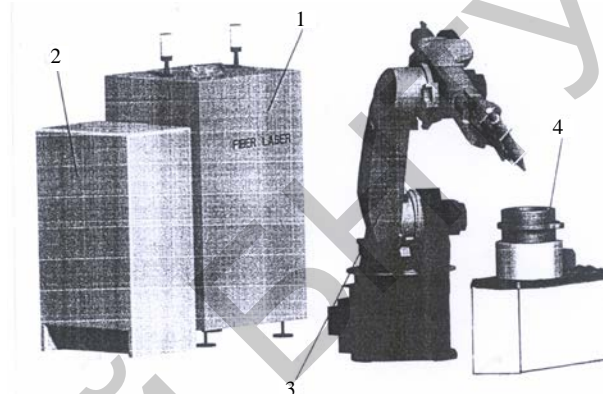


Рис. 5. Аппаратурное оформление производственного технологического участка лазерного термоупрочнения деталей: 1 – волоконный диодный лазер; 2 – стойка управления процессом; 3 – робот-манипулятор; 4 – транспортер подачи деталей

С помощью специальной цилиндрической оптики лазерная головка фокусирует полосковое излучение длиной 10 мм при ширине полосы 0,5–1,5 мм и равномерности плотности мощности в пятне не ниже 20 %. Фокусное расстояние оптической головки достигает 500 мм при длине волоконных оптических кабелей до 100–150 м и более. Волоконные диодные лазеры превосходят другие типы лазеров по всем существенным параметрам. Они не требуют расходных материалов и подстройки в процессе работы, обладают малыми габаритами, что позволяет реализовать их новое эффективное применение в промышленном производстве.

Предварительные стендовые испытания корпусных деталей тормозных механизмов трактора «Беларус» с использованием разрабатываемой нами технологии лазерного термоупрочнения показали, что при полном цикле испытаний, равном 2000, признаков износа упоров корпуса не наблюдалось.

Таким образом, многократное повышение износостойких свойств детали обеспечивает длительную работоспособность и долговеч-

ность тормозных механизмов, а следовательно, и надежность работы трактора в целом.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы технологические методы лазерного термоупрочнения внутренних контактных поверхностей корпусных деталей тормозных механизмов трактора.

2. Методом сравнительного анализа установлено некоторое уменьшение плотности мощности излучения в случае полого падающего луча за счет увеличения площади пятна нагрева, а также возможного экранирования пятна облаком лазерной плазмы.

3. Предложена технологическая схема термоупрочнения внутренних поверхностей и общая компоновочная схема производственного участка с использованием автоматизированной робототехнической системы и современных высокоэффективных диодных лазеров с волоконно-оптической транспортировкой излучения в зону термообработки.

4. С использованием разрабатываемой технологии упрочнена опытная партия корпусных деталей. Стендовыми испытаниями установлено многократное увеличение износостойких свойств упрочненных поверхностей, повышающих долговечность, надежность и ресурс работы тормозных механизмов трактора «Беларус».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кобяков, О. С.** Технологические особенности лазерного термоупрочнения внутренних плоских поверхностей деталей машин лучом лазера / О. С. Кобяков, Н. В. Спиридонов, А. М. Каленик // Теория и практика машиностроения. – Минск: УП «Технопринт», 2005. – № 2. – С. 10–13.
2. **Гадалов, В. Н.** Упрочнение лазерной обработкой деталей из высокопрочного чугуна / В. Н. Гадалов, И. В. Павлов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2006. – № 5. – С. 56.
3. **Майоров, В. С.** Расчет параметров лазерной закалки со сканированием / В. С. Майоров // Физика и химия обработки металлов. – 1989. – № 1. – С. 38–43.
4. **Веденов, А. А.** Физические процессы при лазерной обработке материалов / А. А. Веденов, Г. Г. Гладуш. – М.: Энергоиздат, 1985 – С. 207.
5. **Аронин, А. С.** Структура высокоуглеродистых сплавов железа после лазерной закалки из жидкого состояния и отпуска / А. С. Аронин, В. С. Крапошин // Металлофизика. – 1990. – Т. 12, № 4. – С. 96–101.
6. **Мелюков, В. В.** Лазерно-плазменные методы обработки поверхности сталей и сплавов / В. В. Мелюков, В. В. Чирков // Лучевая технология и лазерная обработка. – СПб.: Изд. дом SPbSPU, 2006. – С. 235–240.
7. **Девоино, О. Г.** Технологические аспекты процессов лазерного легирования порошковых и компактных материалов / О. Г. Девоино // Лучевая технология и лазерная обработка. – СПб.: Изд. дом SPbSPU, 2006. – С. 95–102.
8. **Оптимизация режимов лазерного термоупрочнения железоуглеродистых сплавов на примере закалки высокопрочного чугуна марки ВЧ-50 / Н. В. Спиридонов [и др.] // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 2. – С. 59–63.**
9. **Минаев, В. П.** Фирма и ее лидер: в 2 ч. – Ч. 2: Лазеринформ // Информационный бюллетень лазерной ассоциации. – М., 2006. – Вып. № 8 (333).

Поступила 12.02.2007