

**Ключевые слова:**

лазерная обработка, волоконный лазер, зона закалки, износостойкость, задиростойкость, абразивное изнашивание, лазерная наплавка

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ И НАПЛАВКИ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОВ И МАШИН

Владимир БИРЮКОВ, Денис ТАТАРКИН, Евгений ХРИПТОВИЧ, Алексей ФИШКОВ

Рассмотрены основные преимущества лазерной наплавки и упрочнения деталей машин и оборудования. Описаны разработанные технологии лазерного упрочнения на основе использования волоконных лазеров и 2D-сканеров, повышающая износостойкость и задиростойкость упрочненных зон, а также технология лазерной наплавки порошковых материалов на основе никеля.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения доли технологий лазерного упрочнения и наплавки деталей станков, машин и агрегатов в общем объеме внедрения новых технологий. Производительность лазерной обработки определяется глубиной и площадью упрочненной поверхности. Для повышения износостойкости втулки дизеля в два раза достаточно упрочнить 25% площади рабочей поверхности зеркала цилиндра, задиростойкость цилиндропоршневой группы при этом повышается в 1,8 раза [1].

Экспериментально было установлено, что при упрочнении 50% поверхности трения образцов из стали 45 и 40X при испытании на машине трения возвратно-поступательного движения МТВ-1 в паре с контробразцом из чугуна СЧ20 износостойкость повышается в 3 раза, а при упрочнении 100% поверхности – в 3,3 раза по сравнению с неупрочненными образцами [2]. По задиростойкости закаленные лазером образцы не уступают азотированным сталям 40X и 12ХН3А и значительно (в 1,7 раза) превосходят цементованную сталь 18ХГТ.

Для маложестких и длинномерных деталей дополнительным критерием оптимизации режимов лазерного упрочнения являются минимальные остаточные

деформации [3]. Как показал наш опыт внедрения технологии лазерной закалки на ОАО «Красный пролетарий», при лазерном упрочнении накладных направляющих специальных станков для уменьшения деформаций необходимо закалить 20–25% технологической поверхности и 60% рабочей поверхности. При этом остаточные деформации составляют 0,05–0,1 мм на 1 м длины. Для сравнения, при закалке токами высокой частоты (ТВЧ) остаточные деформации составляют 1,5–2,0 мм на 1 м длины. Эта же технология была использована для лазерной закалки деталей суппортной группы специальных станков. При лазерной закалке станины специального станка длиной 2 м из чугуна СЧ20 остаточные деформации не превысили 0,1 мм. Деформации станин, закаленных с помощью ТВЧ, при серийном производстве станков составляют 1–1,5 мм и для обеспечения точности станка требуется длительная обработка шлифованием.

При закалке 100% поверхностей деталей с наложением дорожек, в местах их перекрытия на упрочняемой поверхности образуются зоны отпуска шириной: 0,5–3,0 мм – при закалке расфокусированным лучом и 0,1–0,2 мм – при закалке колеблющимся лучом с высокой частотой, в зависимости от режимов обработки. Уменьшение размера и количества зон отпуска или их исключение способствует

повышению износостойкости и задиристости закаленных сканирующим лазерным лучом поверхностей трения деталей машин, работающих в условиях смазывания жидким или пластичным смазочным материалом. При отсутствии смазки в парах трения отклонение твердости поверхностных слоев не должно превышать 6–8 HRC.

В современном промышленном производстве применяются различные методы наплавки: электродуговая, плазменная, лазерная, наплавка ТВЧ и др. Существующие методы имеют свои преимущества и недостатки. При электродуговой наплавке в условиях гидроабразивного изнашивания восстанавливают детали, имеющие значительный износ рабочих поверхностей [4]. Однако после электродуговой наплавки припуск на последующую механическую обработку может достигать 2 мм, что увеличивает трудоемкость изготовления изделий. Применение более современных плазменных и газодинамических методов позволяет снизить пористость до 1...10% [5]. При лазерной наплавке происходит формирование наплавленного слоя с заданными свойствами за счет минимального коэффициента перемешивания наплавляемого материала с основой. Припуск на механическую обработку после лазерной наплавки не должен превышать 0,5–0,7 мм. Наплавленный слой не должен содержать дефектов (пор, раковин, трещин) и иметь хорошую прочность сцепления наплавленного слоя с основой. Возможные способы подачи присадочных материалов в зону лазерной наплавки можно разделить на две основные группы [6]. Это может быть предварительное расположение присадочных материалов на обрабатываемой поверхности и подача непосредственно в зону обработки одновременно с воздействием лазерного излучения. Но наиболее распространенный способ предварительного нанесения покрытий – с помощью шликерных обзак – отличается большим КПД благодаря высокой поглощательной способности, обусловленной наличием связующего вещества, и высоким коэффициентом использования присадочного материала.

Целями данной работы являлись уменьшение или исключение зон отпуска при лазерном упрочнении, повышение коэффициента использования порошкового материала при наплавке и ресурса работы деталей машин.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для экспериментов использовали универсальное оборудование ООО НТО «ИРЭ-Полюс», содержащее лазерные установки ЛС-6, ЛС-4 и ЛС-1, робот KUKA, сканер IPG 2D, оптическую головку фирмы PRECITEC и технологический стол, а также автоматизированный лазерный комплекс ИМАШ РАН [2]. Лазерное упрочнение производилось на образцах из стали 40X и 40XH2MA размерами 12 × 16 × 70 и 10 × 60 × 180 мм

соответственно, а также деталях машин. В эксперименте на волоконных лазерах ЛС-1, ЛС-4 при обработке стали 40XH2MA с использованием сканирующих устройств были выбраны следующие условия: расстояние от фокальной плоскости 50–200 мм, шаг сканирования 50–1500 мкм, ширина зон обработки 15–25 и 50 мм, мощность излучения 1000 и 2000–4000 Вт соответственно. Для увеличения поглощательной способности на поверхность образцов наносили покрытие СГ504. В качестве наплавочных материалов были выбраны порошки на никелевой основе фирмы Höganäs (Швеция) и ОАО «ПОЛЕМА». Размер частиц порошка составлял 40–150 мкм. Мощность излучения варьировалась в пределах 1800–4800 Вт. Скорость перемещения оптической головки составляла 0,5–2 м/с в поперечном направлении и 1–15 мм/с – в продольном направлении.

Лазерную наплавку предварительно насыпанного порошка с толщиной слоя 3–10 мм производили на стальные плиты с размерами 140 × 140 × 20 мм. Образцы вырезали электроискровым методом размерами 15 × 50 × 20 мм. Исследования проводили с использованием микротвердомеров ПМТ-3, DURASCAN-70 при нагрузке 0,98 Н, цифрового микроскопа АМ413МL, металлографического микроскопа Альтами МЕТ 1С.

Для определения задиристости упрочненных образцов была применена универсальная машина трения МТУ-01. Испытания проводили по схеме плоскость (образец с лазерной закалкой или азотированный из стали 40X) – кольцо (контроль – сталь 40X с объемной закалкой HRC 52–54). В качестве смазочного материала использовалось масло индустриальное И-20. Удельное давление изменяли в пределах 1–4 МПа, скорость скольжения 0,5–4 м/с. Испытание на абразивное изнашивание проводили на машине трения БХ-4 по модернизированной в ИМАШ РАН схеме Бриелля – Хаворта [7]. Потерю массы образцов определяли на электронных весах VIBRA НТ / НТR 220TE с точностью измерения 0,0001 г.

Испытания образцов на прочность сцепления покрытия с основой проводились на машине Instron 1115 в соответствии с РМ250-87 «Определение прочности сцепления газотермического покрытия с основным металлом. Методические рекомендации», доработанными нами с учетом специфики лазерной наплавки [8]. Образцы для определения прочности сцепления покрытия с основой изготавливали из исследуемого основного металла в виде пластины толщиной 10 мм, шириной и длиной – 25 мм. Толщина наплавленного слоя составляла 4–5 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам измерений параметров упрочненных зон в первой серии экспериментов построены графики зависимостей глубины и ширины зон

закалки от изменения расстояния до фокальной плоскости или плотности мощности излучения (рис. 1а, б). Обработка результатов экспериментов показала, что высокочастотное сканирование лазерного луча по нормали к вектору его продольного перемещения позволяет повысить площадь поперечного сечения зон закалки в 1,6–2,5 раза по сравнению с упрочнением расфокусированным лучом.

Для многих деталей ширина закаленных зон не превышает 6 мм. К ним относятся: штампы и пресс-формы с зонами упрочнения по кромке, поверхности трения шпоночных, шлицевых и резьбовых соединений, канавок поршней и поршневых колец, втулок цилиндров двигателей машин, зубчатых передач с модулем 0,8–2,2 мм, направляющие и суппорты, шпиндели, клинья металлорежущих станков при закалке 50–60% рабочих поверхностей и др.

Для замены операции цементации деталей с толщиной слоя 1 мм в ИМАШ РАН разработана технология упрочнения с глубиной слоя до 1,2 мм, шириной 6,6 мм [9]. При обработке образцов из стали 40Х с мощностью излучения лазера 1 кВт, диаметром лазерного пятна 5 мм, скоростью перемещения 10 мм/с, частотой сканирования луча 220 Гц микротвердость зон закалки составила 7180–8300 МПа. Лазерная закалка резьбы ходовых винтов станков, ниппельных концов насосно-компрессорных труб позволяет повысить ресурс работы резьбовых соединений в 3–5 раз [10, 11].

Для деталей, работающих в условиях ограниченной смазки или без смазочного материала, разработана технология упрочнения с использованием волоконных лазеров и 2D-сканеров с шириной закаленных слоев 15–50 мм при глубине зоны 0,2–2,0 мм [12]. На рис. 2 (а и б) представлены шлифы зон закалки образцов из стали 40ХН2МА с микротвердостью 6200–7600 МПа. При наложении полос закалки с перекрытием при оптимальных режимах уменьшение микротвердости составило 1000–1500 МПа, что не превышает семи единиц HRC.

Лазерное упрочнение образцов из стали 40ХН2МА на установке ЛС-4 проводилось с целью дальнейшего увеличения ширины и глубины зоны закалки. При мощности излучения 2000 Вт получены дорожки закалки с шириной 50 мм и глубиной 0,2–2,0 мм. Увеличение мощности до 4000 Вт позволило получить слои с глубиной закалки до 2,5 мм при той же ширине обработанной зоны. На рис. 3 представлен микрошлиф дорожки закалки образца из стали 40ХН2МА.

Проведенные испытания образцов показали повышение износостойкости и задиростойкости в 1,5–2 раза по сравнению с азотированными образцами из стали 40Х2НМА.

Разработанная технология широкополосной лазерной закалки лучом волоконного лазера при использовании сканеров IPG 2D позволит расширить номенклатуру деталей. Ширина зоны упрочнения 15–50 мм за один проход позволяет обрабатывать

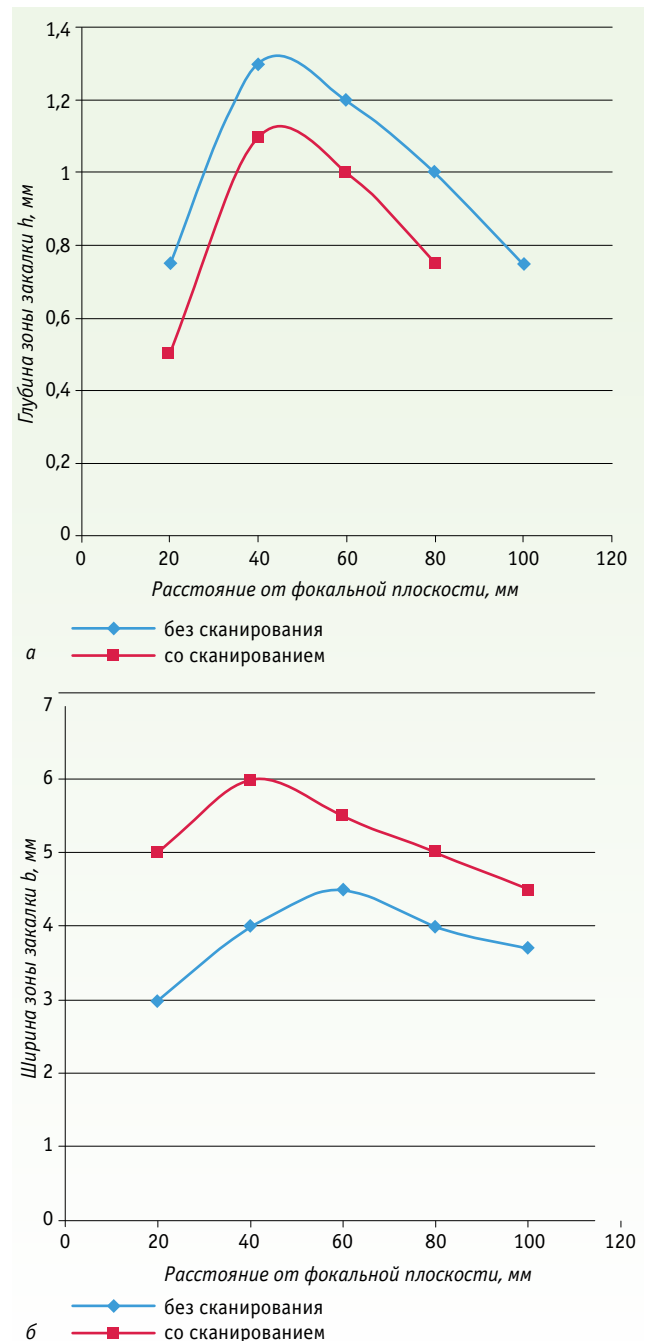


Рис. 1. Зависимость глубины (а) и ширины (б) зоны закалки от изменения расстояния до фокальной плоскости

посадочные места шеек валов различных механизмов и машин под подшипники качения и скольжения. Кроме того, эта технология может быть использована для упрочнения гибочных и других штампов при глубине упрочненного слоя 2,5 мм.

При лазерной наплавке лучом волоконного лазера получены наплавленные слои толщиной 3–9 мм и шириной 20–80 мм за один проход руки робота.

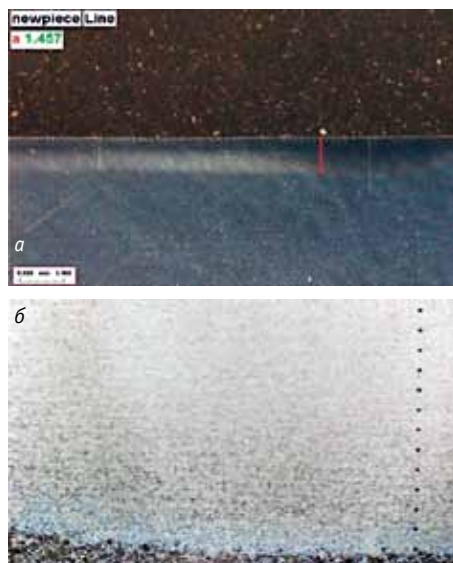


Рис. 2.
Лазерное упрочнение образцов из стали 40XН2МА:
а – общий вид поперечного шлифа;
б – измерение микротвердости по глубине закаленного слоя с шагом 100 мкм, $\times 200$

На рис. 4 представлен микрошлиф единичной наплавленной дорожки. При изменении режимов наплавки микротвердость в наплавленном слое изменяется в широких пределах 6120–12000 МПа.

При высокой плотности энергии лазерного луча часть легирующих элементов и углерода выгорает, и микротвердость в наплавленном слое понижается, появляются дефекты в виде пор. При низких значениях плотности энергии лазерного излучения

Таблица 1. Результаты испытаний на износ по схеме Бринелля – Хаворта

№ п/п	Марка порошка	Микротвердость, МПа	Потеря массы, г
1	1360	7180–8300	0,0071
2	1360	7180–10800	0,0035
3	1360	6120–9180	0,0052
4	1360	7040–9540	0,0048
5	1360	7180–8340	0,0062

происходит неполное сплавление порошкового материала и снижается микротвердость.

В табл. 1 представлены результаты испытаний на абразивное изнашивание по схеме Бринелля – Хаворта. К вращающемуся резиновому диску прижимался плоский образец с наплавленным покрытием. В зону трения подавался кварцевый песок с размером частиц 200–600 мкм. Продолжительность испытаний составляла 10 мин. По результатам испытаний трех образцов определялась средняя величина потери массы наплавленного покрытия на каждом режиме обработки.

В результате проведенных исследований на абразивное изнашивание первой партии образцов найдены оптимальные режимы лазерной наплавки порошковых покрытий. Вторая партия образцов наплавалась порошками различной твердости обеих фирм производителей порошковых материалов. На рис. 5

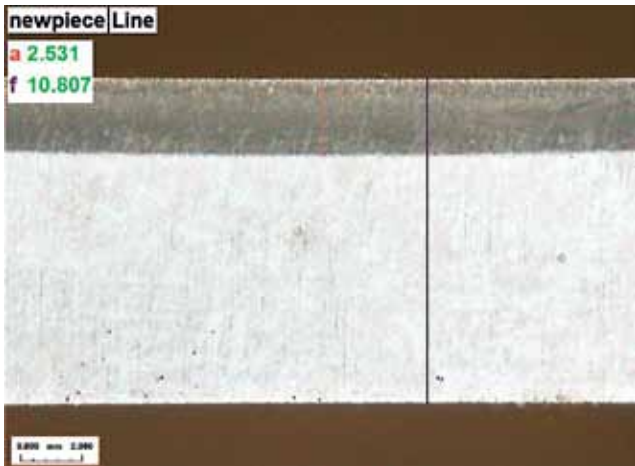


Рис. 3. Микрошлиф зоны закалки образца из стали 40X2HMA при мощности излучения 4 000 Вт

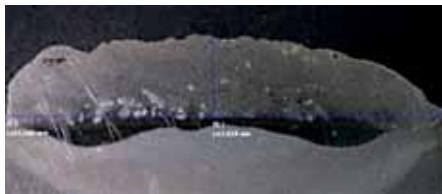


Рис. 4. Микрошлиф наплавленной единичной дорожки за один проход, $\times 7$

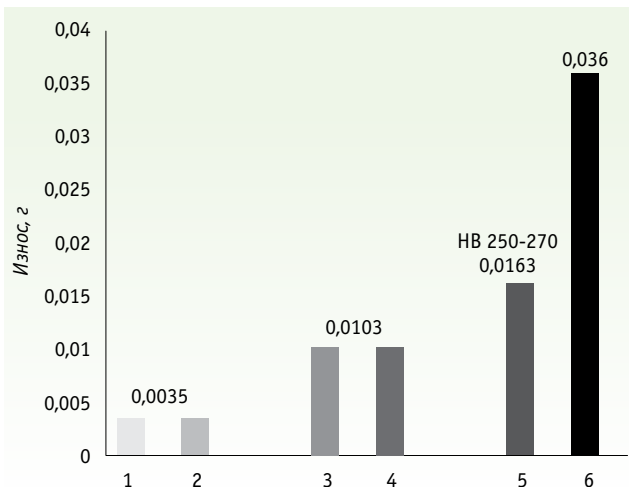


Рис. 5. Зависимость абразивного износа от твердости наплавленного порошковыми материалами слоя и образца стали 40X: 1 – Höganäs, HRC 59–61; 2 – АО «ПОЛЕМА», HRC 59–61; 3 – Höganäs, HRC 38–42; 4 – АО «ПОЛЕМА», HRC 38–42; 5 – сталь 40X, HB 250–270; 6 – сталь 40X, HB 180

представлена зависимость абразивного износа по схеме Бринелля – Хаворта от твердости наплавленного слоя и образца стали 40X. Из приведенных данных следует, что наплавленные слои с твердостью HRC 58–61 (порошки фирмы Höganäs – 1, АО «ПОЛЕМА» – 2) по износостойкости в 10 раз выше,



Рис. 6. Ковш экскаватора с восстановленными лазерной наплавкой зубьями

чем нормализованная сталь 40X (HB180), и в 4,6 раза выше, чем улучшенная сталь 40X (HB 250–270).

По разработанной технологии лазерной наплавки порошковых материалов на основе никеля произведена наплавка опытной партии зубьев ковшей экскаватора. На рис. 6 представлен ковш экскаватора с восстановленными зубьями.

В настоящее время восстановленные зубья ковша проходят испытания с целью определения ресурса их работы и возможного совершенствования технологии лазерной наплавки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для деталей, работающих в условиях ограниченной смазки или без использования смазочного материала, разработана технология лазерного упрочнения на основе использования волоконных лазеров и 2D-сканеров с шириной закаленных слоев 15–50 мм при глубине зоны 0,2–2,5 мм.

Для образцов стали 40X2HMA износостойкость и задиростойкость зон, упрочненных волоконным лазером, оказалась в 1,5–2,0 раза выше, чем для образцов, прошедших азотирование.

Разработана технология лазерной наплавки порошковых материалов на основе никеля с шириной наплавленного слоя 20–80 мм и высотой валика 3–9 мм за один проход руки робота.

Проведенные испытания на абразивное изнашивание по схеме Бринелля – Хаворта показали повышение износостойкости наплавленных покрытий в 10 раз по сравнению с нормализованной сталью 40X. Прочность сцепления покрытия порошком на основе никеля с твердостью HRC 38–42, используемого в качестве подслоя, составила 400–480 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев Ю.И. Лазерные технологии в судовом машиностроении. – Н. Новгород: Изд-во ГОУ ВПО ВГАВТ. 2003. 98 с.

2. **Бирюков В.П., Дозоров А.В.** Лазерные системы для упрочнения, наплавки деталей и точного раскроя листового материала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 1. С. 60–66.
3. **Бирюков В.П., Дроздов Ю.Н., Гудушаури Э.Г., Михайлин Б.Н., Фишков А.А.** Патент RU2449028. Способ закалки поверхностных слоев плоских длинномерных стальных изделий 27.04.2012.
4. **Погодаев Л.И., Ежов Ю.Е.** Повышение долговечности рабочих устройств судов технического флота износостойкими наплавками // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 6. С. 82–87.
5. **Забелин А.М., Шиганов И.Н., Чирков А.М. и др.** Гибридные технологии лазерной наплавки. — М.: Изд-во МГОУ, 2007. 126 с.
6. **Григорьянц А.Г., Мисюров А.И.** Возможности и перспективы применения лазерной наплавки // Технология машиностроения. 2005. № 10. С. 32–56.
7. **Хрущов М.М., Бабичев М.А.** Абразивное изнашивание. — М.: Наука, 1970.
8. **Бирюков В.П., Татаркин Д.Ю., Хриптович Е.В., Фишков А.А.** Определение влияния режимов лазерной наплавки и состава порошковых материалов на износостойкость покрытий // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 1. С. 63–66.
9. **Бирюков В.П.** Расчетно-экспериментальное определение параметров упрочненных зон при лазерной закалке чугунов и сталей // ФОТОНИКА. 2017. № 2. С. 22–32.
10. **Бирюков В.П., Дроздов Ю.Н., Гудушаури Э.Г.** Патент RU № 2545473. Способ упрочнения резьбы. 27.03.2015.
11. **Бирюков В.П., Дроздов Ю.Н., Гудушаури Э.Г.** Патент RU 2554244. Способ упрочнения резьбы. 27.06.2015.
12. **Бирюков В.П., Фишков А.А., Татаркин Д.Ю., Хриптович Е.В.** Влияние лазерного упрочнения круглым, профилированным и колеблющимся лучом на повышение ресурса работы деталей машин // ФОТОНИКА. 2017. № 3. С. 28–34.

БИРЮКОВ Владимир Павлович –
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник ИМАШ РАН

ФИШКОВ Алексей Анатольевич –
научный сотрудник ИМАШ РАН

ТАТАРКИН Денис Юрьевич –
начальник сектора наплавки ООО НТО «ИРЭ-Полюс»

ХРИПТОВИЧ Евгений Владимирович –
инженер сектора наплавки ООО НТО «ИРЭ-Полюс»