

УДК 621.9.048.7;669.13.017:620.18;669.113.017:620.17

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ*

*С.Н. БАГАЕВ, доктор физ.-мат. наук,
академик РАН, директор
Г.Н. ГРАЧЁВ, канд. физ.-мат. наук,
заведующий лабораторией
А.Л. СМЕРНОВ, главный конструктор
М.Н. ХОМЯКОВ, инженер
(Институт лазерной физики СО РАН)
А.О. ТОКАРЕВ, доктор техн. наук, доцент
(ФБОУ ВПО НГАСУ, г. Новосибирск)
П.Ю. СМЕРНОВ, генеральный директор
(ООО «Оптогид Нанотех» Московская
область, Одинцовский район, д. Сколково)*

Поступила 19 декабря 2013
Рецензирование 30 января 2014
Принята к печати 5 февраля 2014

Грачёв Г.Н. – 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3,
Институт лазерной физики СО РАН,
e-mail: grachev@laser.nsc.ru

Приводятся результаты разработки лазерно-плазменного метода для упрочнения поверхности металлов в двух направлениях: высокопроизводительная модификация поверхности чугунов и синтез сверхтвёрдых (20...30 ГПа) нанокompозитных покрытий. Лазерно-плазменный метод основан на применении плазмы оптического пульсирующего разряда. Разряд зажигается повторяющимися с высокой частотой следования (десятки килогерц) лазерными импульсами в фокусе луча CO₂ лазера. Для образования плазмы в обрабатываемой головке создается высокоскоростной поток газа: аргона, азота, кислорода. Поток плазмообразующего газа в плазмохимической камере имеет скорость до 500 м/с и давление до 0,5 МПа. Для синтеза покрытий двухканальная конструкция плазмохимической камеры дополнительно обеспечивает подачу легирующего газа в зону фокусировки лазера.

Для повышения износостойкости серого чугуна в парах трения методом лазерной обработки создана структура с высокотвёрдым (12...20 ГПа) наноструктурированным поверхностным слоем толщиной до 1 мкм, который примыкает к слою толщиной порядка 100 мкм с локально закаленными вокруг графитовых включений участками. Полученная структура поверхности обеспечивает снижение коэффициента трения на 30 % и двадцатикратное увеличение износостойкости в условиях жидкостного трения. Это обусловлено созданием микрорельефа трущихся пар, включающего капиллярные каналы, аккумулирующие смазку по местам расположения графита, и твёрдые составляющие – ледебурит и мартенсит, окружающие эти микроканавки.

Ключевые слова: лазерная плазма, технология упрочнения поверхности серого чугуна, синтез сверхтвёрдых покрытий.

* Работа выполнена при поддержке Программы междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН № 33 (2009–2011 годы) и № 95 (2012–2014 годы) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 24, проект № 24.36.

Введение

Одним из наиболее перспективных путей решения проблемы увеличения полного и межремонтного ресурса двигателей внутреннего сгорания и повышения эффективности их эксплуатации является упрочнение поверхностей деталей, так как именно они определяют износостойкость пар трения. В связи с этим в машиностроении активно развиваются и эффективно внедряются различные технологии поверхностной обработки, связанные с воздействием на поверхностный слой источниками энергии высокой концентрации для повышения износостойкости. В этом направлении в Институте лазерной физики СО РАН в последние годы разработаны основы нового высокопроизводительного лазерно-плазменного метода (ЛПМ) упрочнения поверхности металлов [1–4].

Лазерно-плазменный метод основан на применении плазмы оптического пульсирующего разряда (ОПР), который зажигается повторяющимися с высокой частотой следования (десятки килогерц) лазерными импульсами в фокусе луча CO_2 -лазера в скоростных потоках газов с примесями реагирующих компонентов на поверхности обрабатываемого материала. Экспериментальными и теоретическими методами определено [1–6], что плазма ОПР для инициации химических реакций обладает уникальным сочетанием свойств, недоступных для существующих способов (индукционный сверхвысокочастотный нагрев СВЧ, тлеющий, дуговой и непрерывный оптический разряды, пиролиз, горение):

- рекордной (для плазмохимических методов) удельной мощностью энерговыделения в объеме газовой фазы до 5 ГВт/см^3 ;
- возможностью получения локально равновесной (время обмена $\sim 10 \text{ нс}$) плазмы при давлении 1 атм и более;
- высокой температурой (до $20 \dots 30^\circ \text{K}$) и концентрацией ($10^{18} \dots 10^{19} \text{ см}^{-3}$) частиц;
- высоким уровнем ультрафиолетового (УФ) радиационного обмена, благоприятного для диссоциации, ионизации, возбуждения частиц, а также активации осаждаемых нанокластеров и поверхности подложки, что приводит к интенсификации синтеза покрытия;
- быстрым (за микросекунды) охлаждением плазмы ОПР, что обеспечивает контролируемое гомогенное зародышеобразование без загрязнений, уменьшение размера образующихся ча-

стиц, подавление их роста за счет коалесценции, получение не только наночастиц, но и нанокластеров.

Наряду с физико-химическими преимуществами ЛПМ отметим общие преимущества для разработки промышленных нанотехнологий, которые состоят в следующем:

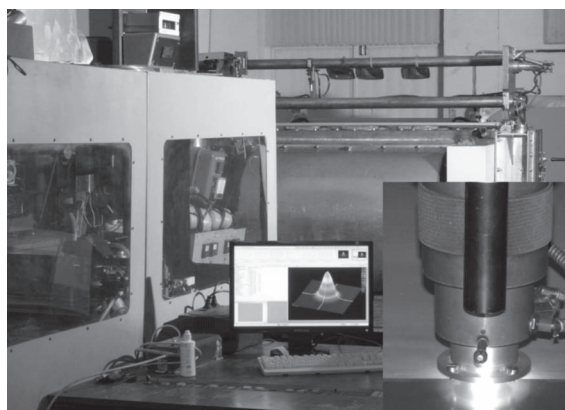
- процесс может проводиться при давлениях газа в зоне реакции больше атмосферного, что позволяет во многих случаях исключить из технологий дорогостоящие вакуумные системы, отказаться от рабочей камеры и проводить обработку крупногабаритных изделий сложной конфигурации автоматизированными манипуляторами по заданной программе;
- эффективный обмен энергией между лазерной плазмой и металлом обеспечивает (7–10)-кратное увеличение производительности ЛПМ по сравнению с традиционной лазерной закалкой и (3–4)-кратное – для технологий наплавки, легирования;
- высокие рабочие давления обеспечивают осаждение нанокompозитных покрытий со скоростями синтеза на 2–3 порядка большими, чем в известных PCVD методах (Plasma Chemical Vapor Deposition – плазмохимическое осаждение из газовой фазы);
- метод позволяет использовать широкий спектр исходных компонентов (газы, аэрозоли, пары) и выбирать из них наиболее подходящие для промышленной реализации технологии;
- широкие диапазоны управления характеристиками импульсно-периодического излучения, скоростью потока ($0 \dots 500 \text{ м/с}$), сортом и составом буферного или рабочего газа (Ar , He , Ne , H_2 , N_2 , O_2 , воздух, CO , CO_2 и др.) обеспечивают возможности широкого поиска и оптимизации по эффективности варианта технологии;
- возможность проведения направленного синтеза наноматериалов с использованием исходных компонентов в виде стехиометрической смеси аэрозолей (в том числе тугоплавких), что значительно упрощает (и удешевляет) задачу подбора исходных реагентов.

1. Методика и оборудование экспериментального исследования

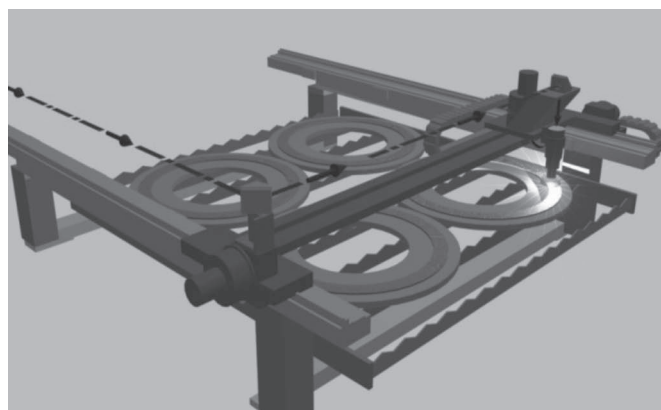
Основой лазерно-плазменной технологической установки, определяющей ее технологические возможности, является импульсно-периоди-

ческая CO_2 -лазерная система генератор-усилитель (СГУ) средней мощностью до 2 кВт и импульсной мощностью порядка сотни киловатт (рис. 1, слева на заднем плане) с возможностью управления частотой следования (до 120 кГц) и длительностью лазерных импульсов [6]. Оригинальная оптическая схема СГУ позволяет формировать луч с плоским фронтом,

плавным распределением интенсивности и качеством, близким к дифракционному пределу, устранить эффекты самовозбуждения системы «лазер – металл вблизи фокуса», которые приводят к искажению формы импульса (снижению импульсной мощности), а также распределению интенсивности и в результате к нестабильности лазерно-плазменной обработки.



а



б

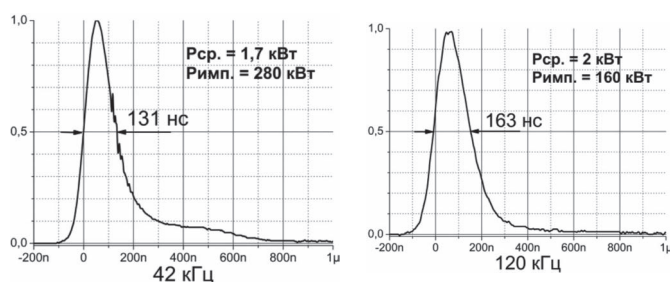
Рис. 1. Лазерно-плазменная технологическая установка: наружный вид (а) и схема обработки материалов (б)

На рис. 1 показан общий вид установки в процессе лазерно-плазменного синтеза нанокompозитных покрытий и схема обработки листовых или слабоизогнутых материалов. Лазерный луч поворотными зеркалами, расположенными на перемещающихся портале и каретке программно-управляемого двухкоординатного стола (рис. 1, б), направляется на линзу лазерно-плазменной обрабатывающей головки и фокусируется на поверхности металла для упрочнения или на оси газового потока с примесями реагирующих компонентов для синтеза покрытий. Такое техническое решение позволяет проводить лазерно-плазменную обработку непосредствен-

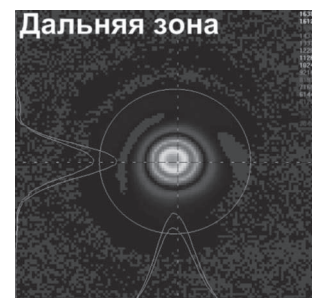
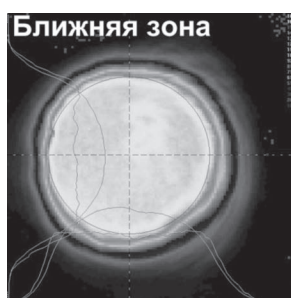
но в атмосфере и только необходимых заданных областей.

Установка включает «Систему измерения характеристик излучения СГУ и контроля процесса лазерно-плазменной обработки», которая дает возможность регистрировать:

- форму и частоту следования лазерных импульсов (рис. 2, а);
- распределение интенсивности излучения СГУ в ближней и дальней зонах (рис. 2, б);
- излучение и стабильность поддержания лазерной плазмы (рис. 3);
- форму рассеянного мишенью лазерного импульса, прошедшего через плазму (рис. 3).



а



б

Рис. 2. Форма лазерных импульсов (а) и распределение интенсивности луча системы генератор-усилитель (б)

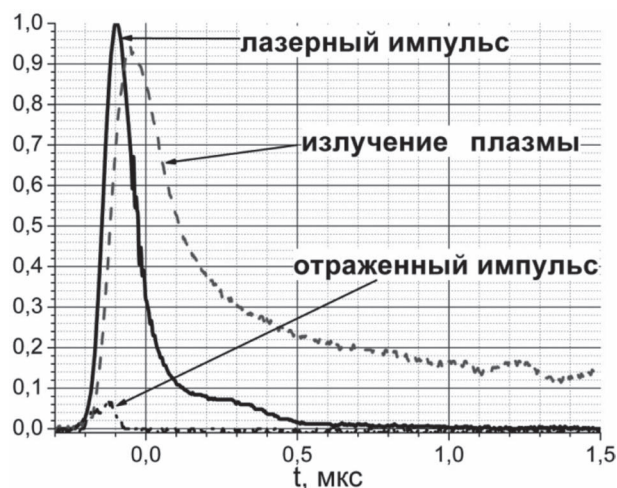


Рис. 3. Осциллограммы лазерного импульса, свечения плазмы, отраженного от металла лазерного импульса

Набор осциллограмм (см. рис. 3), получаемый при проведении ЛПМ-обработки, позволяет определить, когда и при какой мощности излучения наступает превышение интенсивности над порогом зажигания и возникает лазерная плазма, а также динамику и эффективность поглощения лазерного излучения образующейся плазмой.

Двухканальная система подготовки и дозирования реагирующих компонентов (рис. 4)

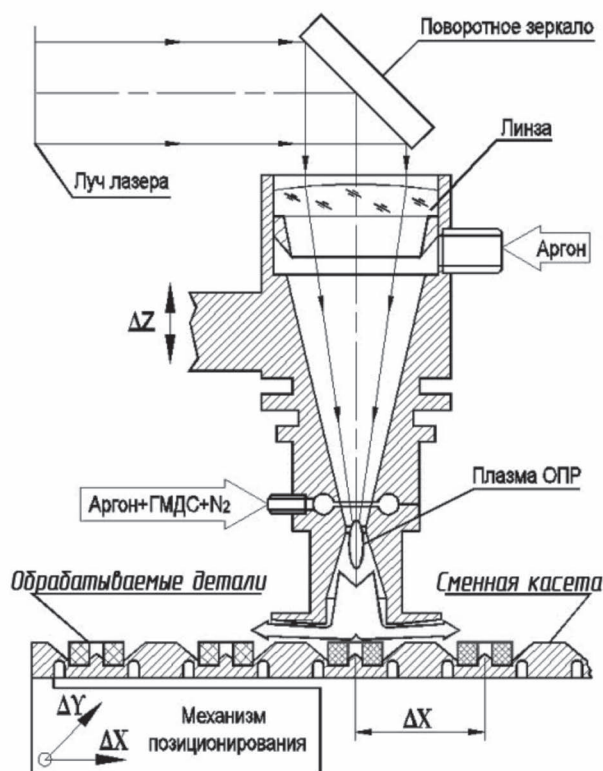


Рис. 4. Схема процесса лазерно-плазменного синтеза покрытия с применением двухканальной системы подачи реагентов плазмохимического синтеза

дополнительно к плазмообразующему газу (аргон, азот, кислород, ...) обеспечивает подачу двух исходных веществ (например, паров гексаметилдисилазана и ацетонитрила при лазерно-плазменном синтезе покрытий из карбонитрида кремния) с возможностью регулировки и контроля потока газоносителя с записью режимов расхода на персональный компьютер.

Таким образом, лазерно-плазменная технологическая установка обеспечивает широкие диапазоны условий лазерно-плазменной обработки по интенсивности луча (до $2...3 \text{ ГВт/см}^2$), скорости потока (до 500 м/с) и давлению газа в плазмохимической камере (до 0,5 МПа) с возможностью работы в вариантах – для синтеза наноструктурированных материалов и покрытий в скоростных потоках газа и для модификации поверхности металлов с приповерхностной плазмой. Измерительно-регистрирующий комплекс обеспечивает контроль и регистрацию параметров установки и лазерно-плазменных технологий.

2. Результаты и обсуждение

При лазерно-плазменной модификации поверхности металлов повторяющиеся с высокой частотой следования лазерные импульсы, сфокусированные на перемещающейся поверхности металла, зажигают плазму оптического пульсирующего разряда (ОПР) в потоке рабочего легирующего газа (например, азота при нитридации) (рис. 5).

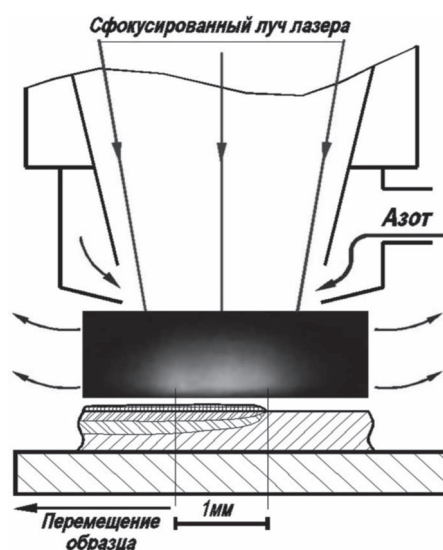


Рис. 5. Схема лазерно-плазменной обработки металла с фотографией приповерхностной плазмы оптического пульсирующего разряда

В зависимости от частоты следования лазерных импульсов, размера пятна облучения и относительной скорости перемещения луча и детали цикл обработки может включать десятки-сотни воздействий лазерной плазмы на каждый участок поверхности. Как правило, длительность цикла обработки в условиях интенсивного воздействия луча и лазерной плазмы (десятки МВт/см²) ограничена расплавлением поверхностного слоя, превышающим допуски на шероховатость обработанной поверхности. Вместе с тем для достижения большей равномерности и улучшения технологических характеристик изделия (например, твердости и глубины зоны лазерно-плазменной модификации, рис. 6) вместо одного цикла обработки возможно проведение нескольких повторяющихся циклов с большей скоростью и с меньшим вкладом энергии.

Отметим, что периодическое (20...100 кГц) действие лазерной плазмы на поверхность ме-

талла в легирующей атмосфере одновременно формирует:

- высокотвердое наноструктурированное твердофазное покрытие (нитриды, карбиды и др.);
- волну диффузии, образование легированного слоя или твердого раствора (например, твердый раствор азота в титане);
- тепловую волну и структурно-фазовые (например, мартенситные) превращения;
- гиперинтенсивный (амплитуда до 10...15 МПа) ультразвук, способствующий уплотнению микроструктуры в горячей зоне.

Наиболее детальное исследование возможностей метода проведено для лазерно-плазменной модификации поверхности антифрикционного чугуна на перлитной основе (с целью определения перспектив применения ЛПМ для упрочнения гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания) на образцах, вырезанных из цилиндрических втулок двигателей внутреннего сгорания

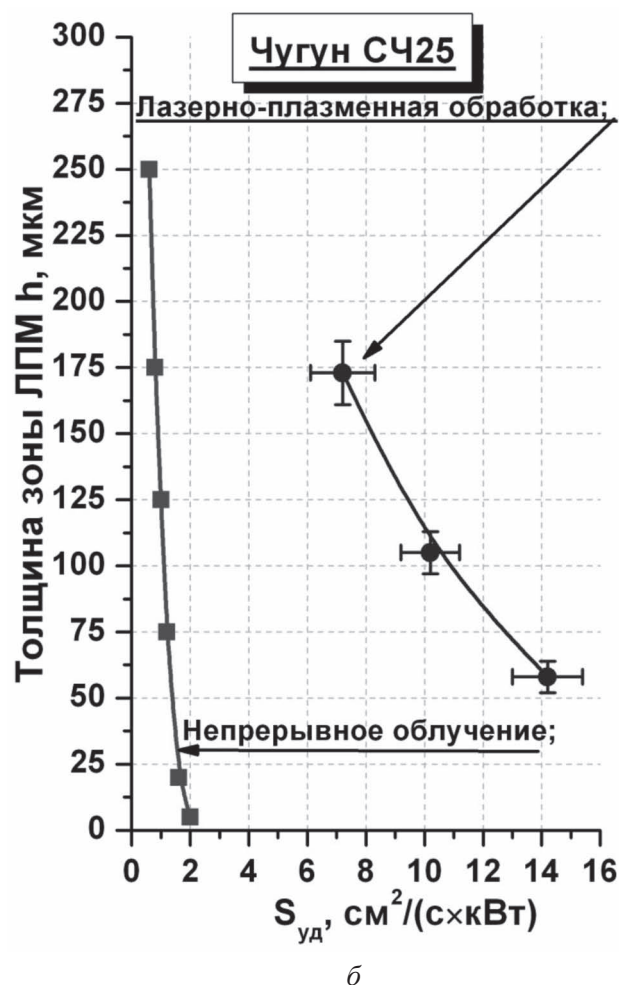
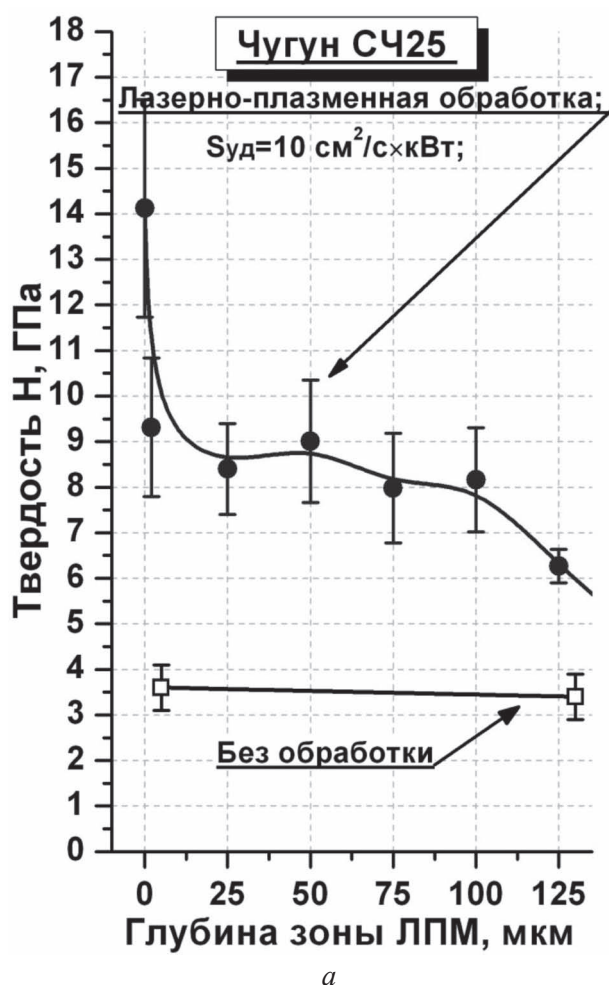
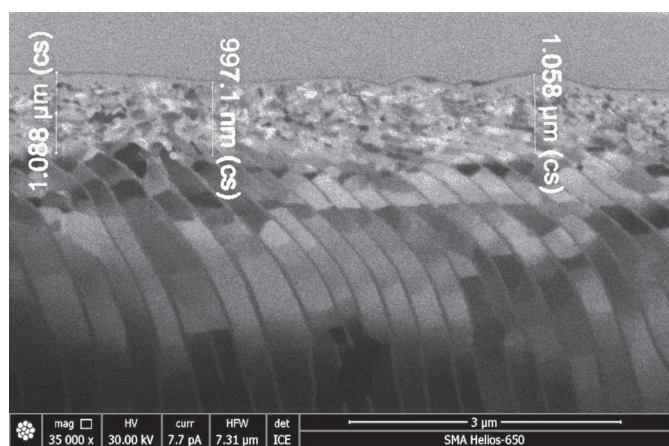
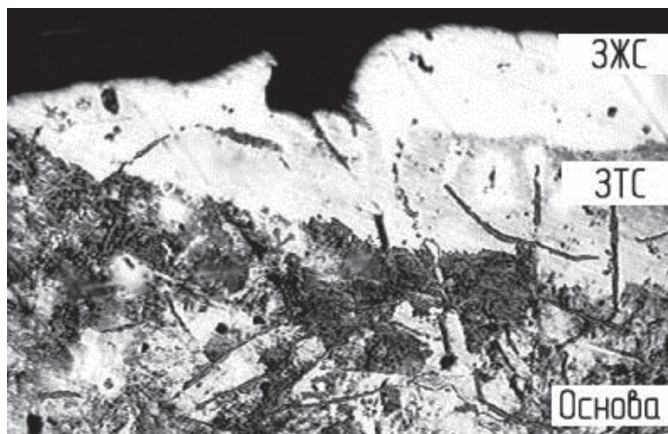


Рис. 6. Микротвердость (а) и глубина зоны (б) лазерно-плазменной модификации поверхности чугуна СЧ25 в зависимости от удельной (на 1 кВт мощности лазера) скорости обработки

[7–10]. Для всех исследованных образцов наблюдалась модификация поверхности с образованием двух слоев. Верхний наноструктурированный слой толщиной сотни нанометров приобретает микротвердость в диапазоне 12...15 ГПа (рис. 6) за счет насыщения азотом и благодаря образованию тонкой микроструктуры (рис. 7, *а*). К верхнему наноструктурированному слою примыкает слой (рис. 7, *б*), имеющий участки со структурой ледобурита (закалка из жидкого состояния) и мартенсита (закалка из твердого состояния). Причем фазовые превращения с плавлением металла начинаются вследствие концентрационной неоднородности распределения углерода по фазам сплава закономерно вокруг графитовых включений. В этом слое (между поверхностным нанослоем и основой металла) происходят



а



б

Рис. 7. Микроструктура чугуна СЧ25 после ЛПМ обработки:

а – поперечное сечение поверхностного слоя (измерения на HELIOS NanoLab 650); *б* – поперечное сечение упрочненного слоя (оптическая микрофотография)

структурные превращения, характерные для лазерной закалки, которые приводят к увеличению микротвердости до уровня 8...10 ГПа (в 3–4 раза тверже основы) на толщине в десятки-сотни микрометров (рис. 6, *а* и 7, *б*).

Сравнение удельной производительности лазерно-плазменной обработки чугуна СЧ25 с традиционной лазерной закалкой непрерывным излучением показало, что производительность лазерно-плазменной обработки в 7–10 раз выше, чем у традиционной лазерной закалки [3, 4] (рис. 6, *б*). Это объясняется 4–5-кратным превышением эффективности энергообмена между лазерной плазмой и металлом над прямым поглощением лазерного излучения и действием гиперинтенсивного ультразвука.

Оценка триботехнических свойств производилась при испытании образцов на машине трения МИ-1 после предварительной взаимной притирки поверхностей диска (закаленная сталь 40) и колодки (образец, вырезанный из цилиндровой втулки двигателя). Удельная нагрузка в условиях жидкостного трения при смазке маслом М-14В2 ГОСТ 12337–84 составляла 1250 МПа. Результаты испытаний представлены на рис. 8.

Обработанные лазером образцы изнашивались в принятых условиях испытаний со скоростью, в 20 раз меньшей по сравнению со скоростью изнашивания исходных (без ЛПМ-модификации) образцов. При этом на треть уменьшился коэффициент трения.

Структура подповерхностных слоев, выявленная травлением в нитале, представлена на рис. 8. Графитовые пластины окружены слоями металла со структурой, полученной закалкой из жидкого (ледобурит) и твердого (двойниковый мартенсит) состояния. Эти твердые участки воспринимают усилие, возникающее в паре трения, обеспечивая износостойкость чугуна. Кроме того, они препятствуют затиранию графитовых частиц, сохраняя маслоудерживающий рельеф поверхности и обеспечивая тем самым низкий коэффициент трения.

При оценке влияния образования жидкой фазы при термической обработке на свойства сплавов авторами работы [11] был сделан вывод о том, что структура, полученная закалкой из жидкого состояния, в деталях машин нежелательна, поскольку усадочные напряжения в сочетании со структурными напряжениями, полученными при закалке,

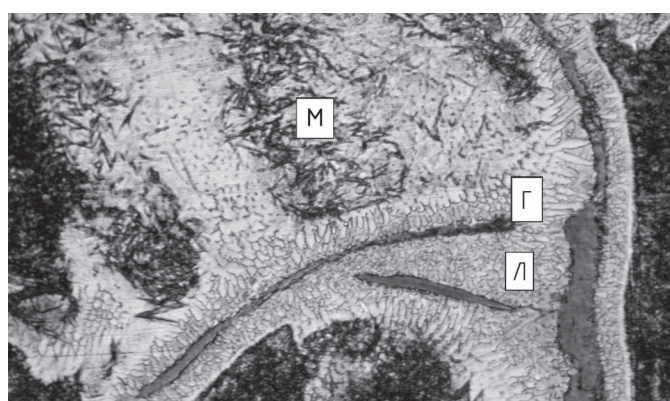
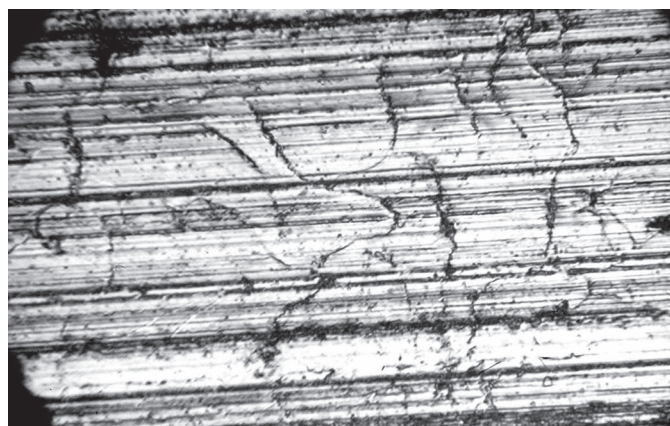
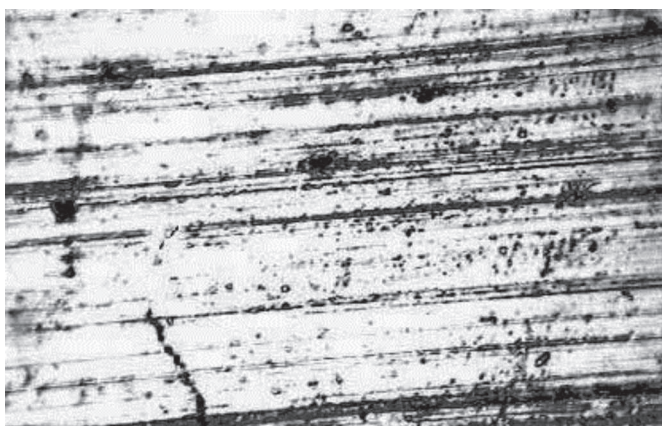
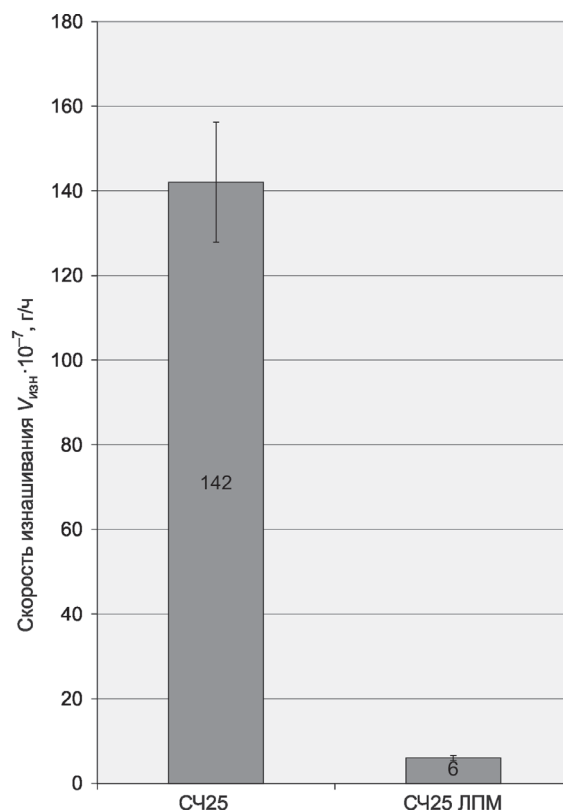
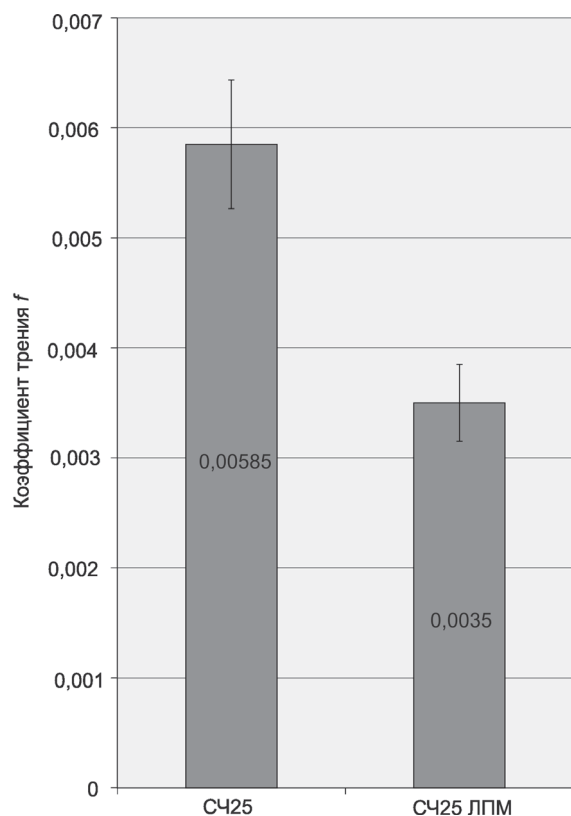


Рис. 8. Влияние лазерной обработки на коэффициент трения и скорость изнашивания образцов из серого чугуна в паре трения «стальной диск – чугунная колодка»:
 верхний ряд фотографий – вид поверхности трения после испытаний, нижний – микроструктура металла в зоне трения; Г – графит; Л – ледебурит; М – мартенсит; П – перлит

способствуют возникновению микротрещин. Для проверки влияния твердых фаз, полученных при лазерно-плазменной обработке чугуна, на прочностные свойства проведены испытания на ста-

тический изгиб $\sigma_{\text{и}}$ и ударную вязкость $a_{\text{н}}$. Полученные результаты (см. таблицу) не показывают заметного снижения прочности на изгиб и ударной вязкости серого чугуна после ЛПМ.

Влияние лазерно-плазменной обработки (ЛПМ) на механические свойства серого антифрикционного чугуна на перлитной основе

Состояние материала	Удельная скорость изнашивания $V_{\text{изн}}$, г/ч $\cdot 10^{-7}$	Коэффициент трения f	$\sigma_{\text{и}}$, МПа	$a_{\text{н}}$, КДж/м ²
СЧ25 без обработки	142	0,0059	400...420	85...90
СЧ25 после ЛПМ	6	0,0035	420...430	80...85

Выводы

Таким образом, с применением уникальной лазерно-плазменной установки, созданной в Институте лазерной физики СО РАН, выполнена высокопроизводительная модификация поверхности серого чугуна, на которой сформирована уникальная композитная структура, состоящая из высокотвердого (12...20 ГПа) поверхностного слоя и закаленного подслоя с микротвердостью 8...10 ГПа и толщиной в десятки-сотни микрон. Испытаниями на образцах из серого чугуна на перлитной основе марки СЧ25 показано, что такая композитная структура может многократно увеличить износостойкость ответственных деталей, определяющих ресурс техники.

Список литературы

1. Багаев С.Н., Грачёв Г.Н., Пономаренко А.Г., Смирнов А.Л., Демин В.Н., Окотруб А.В., Бакланов А.М., Онищук А.А. Лазерный плазмохимический синтез наноматериалов в скоростных потоках газов, первые результаты и перспективы развития метода // Наука и нанотехнологии. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – С. 123–135.
2. Багаев С.Н., Грачёв Г.Н., Демин В.Н., Смирнов А.Л., Смирнов П.Ю., Смирнова Т.П., Хомяков М.Н. О возможности использования технологии упрочнения поверхности металлов с применением лазерно-плазменной установки для наномодификации поверхностей металлов и синтеза сверхтвердых покрытий // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД». – 2012. – № 6. – С. 42–52.
3. Bagayev S.N., Grachev G.N., Ponomarenko A.G., Smirnov A.L., Demin V.N., Okotrub A.V., Baklanov A.M., Onischuk A.A. A new method of laser-plasma synthesis of nanomaterials. First results and prospects // Proceedings of SPIE. – Volume 6732. International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007: Laser-assisted Micro- and Nanotechnologies. Editors: V. Panchenko, O.Louchev, S. Malyshev, 673201 (Jul. 25, 2007). – P. 62–71.

4. Стаценко П.А., Грачёв Г.Н., Смирнов А.Л., Мякушина А.А. Исследование пространственных характеристик излучения мощной CO₂-лазерной системы генератор-усилитель // Сб. докл. 22-й межд. конф. «Лазеры. Измерения. Информация – 2012». – Санкт-Петербург. – 2012. – Т. 2. – С. 168–176.
5. Багаев С.Н., Грачёв Г.Н., Демин В.Н., Смирнов А.Л., Смирнов П.Ю., Смирнова Т.П. Лазерно-плазменный способ синтеза высокотвердых микро- и наноструктурированных покрытий и устройство // Патент № RU 2 416 673 С2. Опубликовано: 20.04.2011. Бюл. № 11.
6. Багаев С.Н., Грачёв Г.Н., Смирнов А.Л., Смирнов П.Ю. Способ модификации металлических поверхностей и устройство // Патент № RU 2 425 907 С2. Опубликовано: 10.08.2011. Бюл. № 22.
7. Макагон Л.Д., Токарев А.О., Грачев Г.Н., Смирнов А.Л. Исследование формирования структуры рабочей поверхности цилиндрических втулок судовых дизелей при лазерной обработке // Научные проблемы транспорта Сибири и дальнего Востока. – 2006. – №1. – С. 194–198.
8. Токарев А.О., Макагон Л.Д. Повышение антифрикционных свойств серого чугуна лазерной обработкой // Сибирский научный вестник / Новосибирский научный центр «Ноосферные знания и технологии» РАЕН. – Вып. X. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2007. – С. 50–55.
9. Токарев А.О. Улучшение триботехнических характеристик серого чугуна лазерной обработкой // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – №1 (54). – С. 69–73.
10. Токарев А.О., Иванчик И.С., Иванчик С.Н., Макагон Л.Д., Гурин А.М. Улучшение триботехнических характеристик серого чугуна лазерной обработкой // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. – 2012. – № 1. – С. 287–291.
11. Тюрин А.Г., Плотникова Н.В., Буров В.Г., Веселов С.В., Головин Е.Д. Влияние поверхностного упрочнения на показатели циклической трещиностойкости // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2008. – №1 (38). – С. 25–27.

ОБРАБОТКА METALLOV

(METAL WORKING • MATERIAL SCIENCE)

N 1(62), January – March 2014, Pages 14–23

Application of the method of laser-plasma surface modification of metals to improve tribological characteristics of combustion engines

Bagayev S.N.¹, D.Sc. (Physics and Mathematics), Academician, Russian Academy of Sciences, Director

Grachev G.N.¹, Ph.D. (Physics and Mathematics), Head of Laboratory, e-mail: grachev@laser.nsc.ru

Smirnov A.L.¹, Chief Designer

Khomyakov M.N.¹, Engineer

Tokarev A.O.², D.Sc. (Engineering), Associate Professor

Smirnov P.Yu.³, General Director

¹Institute of Laser Physics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 13/3 Ac. Lavrentyev's pr., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

²Novosibirsk State Academy of Water Transport, 33 Shhetinkina st., Novosibirsk, 630099, Russian Federation

³Optogard Nanotech Limited, 100 Novaja st., Moscow region, Odintsovo, Skolkovo, 143025, Russian Federation

Received 19 December 2013

Revised 30 January 2014

Accepted 5 February 2014

Abstract

The results of the development of laser-plasma method for surface hardening of metals in two areas: high-performance surface modification of iron and synthesis of superhard (20 - 30 GPa) nanocomposite coatings are presented. Laser- plasma method is based on pulsed optical plasma discharge. Repetitive discharge is ignited with a high repetition frequency (tens of kHz) by laser pulses at the focus of the CO₂ laser beam. For the formation of the plasma in the processing head, high flow of gas: argon , nitrogen and oxygen is generated. Plasma gas flow in the plasma-chemical chamber has a speed of 500 m / s and pressure up to 0.5 MPa. For the synthesis of coatings a two-channel plasma chemical chamber additionally provides delivery of thealloying gas in the focus area of the laser.

To improve the wear resistance of gray cast iron in friction couples by laser processing, a structure with high-hardness (12-20 GPa) nanostructured surface layer and having thickness of 1 micron, which is adjacent to a layer with a thickness of about 100 microns with a locally hardened regions surrounding the graphite areas . The resulting structure of the surface reduces the coefficient of friction by 30% and twentyfold increase in wear resistance under conditions of hydrodynamic friction. This is due to the creation of micro-relief wear pairs , including capillary channels accumulating grease by location of graphite and solid constituents - ledeburite and martensite surrounding these microgroves.

Keywords: laser plasma, technologies of gray cast iron-surface hardening, synthesis of superhard coatings.

References

1. Bagaev S.N. , Grachev G.N. , Ponomarenko A.G. , Smirnov A.L. , Demin V.N. , Okotrub A.V., Baklanov A.M., Onishhuk A.A. *Lazernyj plazmohimicheskij sintez nanomaterialov v skorostnyh potokah gazov, pervye rezul'taty i perspektivy razvitiya metoda* [Laser plasma chemical synthesis of nanomaterials in high-speed gas flows, the first results and prospects of development of the method]. *Nauka i nanotehnologii: materialy nauchnoj sessii Prezidiuma Sibirskogo otdelenija RAN* [Science and nanotechnology: materials science session of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, December 22, 2006], Novosibirsk, SB RAS Publ., 2007, pp. 123–135.

2. Bagaev S.N., Grachev G.N., Demin V.N., Smirnov A.L., Smirnov P.Ju., Smirnova T.P., Homjakov M.N. *O vozmozhnosti ispol'zovaniya tehnologii uprochnenija poverhnosti metallov s primeneniem lazerno-plazmennoj ustanovki dlja nanomodifikacii poverhnostej metallov i sinteza sverhtverdyh pokrytij* [The possibility of using

the technology of surface hardening of metals using laser-plasma system for nanomodifikatsii metal surfaces and synthesis of superhard coatings]. *Bjulleten' OUS OAO «RZhD»*, Moscow, PTC "Scientific Research Institute of Railway Transport" Publ., 2012, no. 6, pp. 42–52.

3. Bagaev S.N., Grachev G.N., Ponomarenko A.G., Smirnov A.L., Demin V.N., Okotrub A.V., Baklanov A.M., Onischuk A.A. A new method of laser-plasma synthesis of nanomaterials. First results and prospects. Proceedings of SPIE. International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007. Laser-assisted Micro- and Nanotechnologies. 2007, Vol. 6732, pp.62-71.

4. Stacenko P.A., Grachev G.N., Smirnov A.L., Mjakushina A.A. *Issledovanie prostranstvennykh harakteristik izlucheniya moshhnoj SO_2 -lazernoj sistemy generator-usilitel'* [Investigation of spatial characteristics of radiation powerful CO₂ laser oscillator-amplifier system]. *Sbornik dokladov 22-oy mezhdunarodnoj konferencii «Lazery. Izmereniya. Informaciya – 2012»* [Proc. 22th. International Conference "Lasers. Measurement. Information - 2012"]. Saint Petersburg, 2012, Vol. 2, pp. 168–176.

5. Bagaev S.N., Grachev G.N., Demin V.N., Smirnov A.L., Smirnov P.Yu., Smirnova T.P. *Lazerno-plazmennyy sposob sinteza vysokotverdykh mikro i nanostrukturirovannykh pokrytij i ustrojstvo* [Laser-plasma method for the synthesis of highly rigid micro-and nano-structured coatings and device]. Patent RF, no. 2 416 673 C2, 2011.

6. Bagaev S.N., Grachev G.N., Smirnov A.L., Smirnov P.Yu. *Sposob modifikacii metallicheskih poverhnostej i ustrojstvo* [A method of modifying surfaces of metal and the device]. Patent RF 2 425 907 C2, 2011.

7. Makagon L.D., Tokarev A.O., Grachev G.N., Smirnov A.L. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i dal'nego Vostoka*, 2006, no. 1, pp. 194–198.

8. Tokarev A.O., Makagon L.D. *Povyshenie antifrikcionnykh svoystv serogo chuguna lazernoj obrabotkoj* [Increasing antifriction properties of gray cast iron laser treatment]. *Sibirskij nauchnyj vestnik*, Novosibirsk, NSAWT, 2007, Issue X, pp. 50–55.

9. Tokarev A.O. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*, 2012, no. 1 (54), pp. 69–73.

10. Tokarev A.O., Ivanchik I.S., Ivanchik S.N., Makagon L.D., Gurin A.M. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego vostoka*, 2012, no. 1, pp. 287–291.

11. Tyurin A.G., Plotnikova N.V., Burov V.G., Veselov S.V., Golovin E.D. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*, 2008, no. 1 (38), pp. 25–27.