

Научный журнал

ВЕСТНИК

Сибирского
государственного
индустриального
университета

№ 1 (31), 2020

Основан в 2012 году
Выходит 4 раза в год

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Редакционная коллегия

М.В. Темлянецв
(главный редактор)
А.В. Новичихин
(отв. секретарь)

Е.П. Волынкина
Г.В. Галевский
В.Ф. Горюшкин
В.Е. Громов
Л.Т. Дворников
Жан-Мари Дрезет
Стефан Золотарефф
Пенг Као
С.В. Коновалов
С.М. Кулаков
А.Г. Никитин
Е.Г. Оршанская
Т.В. Петрова
Е.В. Протопопов
В.И. Пантелеев
Арвинд Сингх
А.Ю. Столбоушкин
И.А. Султангузин
А.В. Феоктистов
В.Н. Фрянов
В.П. Цымбал
Си Чжан Чен

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Громов В.Е. Предисловие к подборке статей «Прочность и пластичность материалов при внешних энергетических воздействиях».....	3
Кормышев В.Е., Жаворонкова Е.Ю., Рубанникова Ю.А., Громов В.Е., Юрьев А.А. «Белые» слои на поверхности рельсов.....	5
Троицкий О.А., Сташенко В.И. Влияние разной направленности полей СВЧ-излучения и тока на пластическую деформацию металла.....	9
Громов В.Е., Кормышев В.Е., Перегудов О.А., Иванов Ю.Ф., Рубанникова Ю.А. Формирование при закалке тонкой структуры рельсов и ее эволюция при длительной эксплуатации.....	14
Черкасов Н.В., Тришкина Л.И., Черкасова Т.В., Конева Н.А. Влияние размера зерен, температуры деформации и состава сплавов Cu-Al на параметр междислокационного взаимодействия в соотношении Тейлора.....	21
Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Троицкий О.А. Динамические эффекты в проводниках при воздействии импульсных токов.....	27
Будовских Е.А., Шляров В.В., Абатурова А.А., Загуляев Д.В., Громов В.Е. Влияние упрочняющей электровзрывной обработки на механические характеристики чугуна.....	35
Шляров В.В., Загуляев Д.В. Изменение механических характеристик поликристаллических парамагнитных материалов в магнитном поле.....	39
Бутакова К.А., Осинцев К.А., Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Громов В.Е. Зависимость микротвердости от содержания легирующих элементов в модифицированном слое сплава Al – 11Si – 2Cu, подвергнутого электронно-плазменному легированию.....	44
Будовских Е.А., Башенко Л.П., Макеева Н.И. Особенности жидкофазного смешивания титана и никеля с алюминием при электровзрывном легировании.....	49
Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Михно А.Р., Бутакова К.А., Гостевская А.Н. Исследование влияния параметров изотермической выдержки на структурообразование в сварных соединениях рельсов из стали марки Э76ХФ.....	52
Аксенова К.В., Комиссарова И.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Чэнь С. Повышение усталостной долговечности легких сплавов электронно-пучковой обработкой.....	59
Уманский А.А., Головатенко А.В., Симачев А.С. Анализ влияния химического состава рельсовых сталей на их пластичность.....	65

УДК 621.793.74

ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧУГУНА

Е.А. Будовских, В.В. Шляров, А.А. Абатурова, Д.В. Загуляев, В.Е. Громов

E-mail: budovskikh@mail.ru

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Проведен анализ структуры и микротвердости детали из жаро- и кислотостойкого чугуна марки ЧЯ после электровзрывной обработки внутренней цилиндрической поверхности. Выбран оптимальный режим обработки, для которого характерно образование термически стабильного слоя с повышенной в 1,8 раза микротвердостью глубиной около 40 мкм; частичное растворение в упрочненном слое крупных включений графита и колоний эвтектики, по которым происходит разрушение детали; образование на поверхности припеченного слоя твердой смазки мелкодисперсного графита; создание дополнительного рельефа изнашиваемой поверхности, облегчающее приработку сопрягаемых поверхностей.

Ключевые слова: чугун с вермикулярным графитом, фреттинг-коррозия, электровзрывное легирование, микроструктура, микротвердость.

INFLUENCE OF STRENGTHENING ELECTROEXPLOSIVE TREATMENT ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CAST IRON

E.A. Budovskikh, V.V. Shlyarov, A.A. Abaturova, D.V. Zagulyaev, V.E. Gromov

E-mail: budovskikh@mail.ru

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The analysis of the structure and microhardness of a part made of heat and acid resistant cast iron grade CHYA after electroexplosive treatment of the internal cylindrical surface of the “sphere” part. The optimal processing mode is selected, which is characterized by the formation of a thermally stable layer with a 1.8-fold increased microhardness depth of about 40 microns; partial dissolution in the hardened layer of large graphite inclusions and eutectic colonies, which cause the destruction of the part; the formation of a fine graphite on the surface of a baked layer of solid lubricant; creating an additional relief of the wear surface, which facilitates the running-in of the mating surfaces.

Keywords: cast iron with vermicular graphite, fretting corrosion, electroexplosive treatment, microstructure, microhardness.

Введение

Повышение эксплуатационных требований к материалам постоянно стимулирует разработки в области поверхностного легирования. Традиционные способы химико-термической обработки – это энергоемкие и длительные процессы. В последние годы все более широкое применение находят новые способы упрочнения металлов и сплавов, основанные на использовании концентрированных потоков энергии. Их воздействие может иметь локальный и импульсный характер, что позволяет проводить обработку металлов и сплавов с оплавлением поверхности [1 – 3].

В настоящее время экспериментально показано, что эффективным инструментом поверхностного упрочнения могут служить многофазные плазменные струи продуктов электрического взрыва проводников. Электровзрывное легирование (ЭВЛ) с оплавлением поверхности позволяет сократить время обработки. Возможно встраивание соответствующего оборудования для ЭВЛ в единую технологическую цепь изготовления деталей. Оборудование для ЭВЛ характеризуется малой операционностью, совмещает локальное тепловое воздействие на поверхность и ее насыщение легирующими добавками, которые задаются выбором

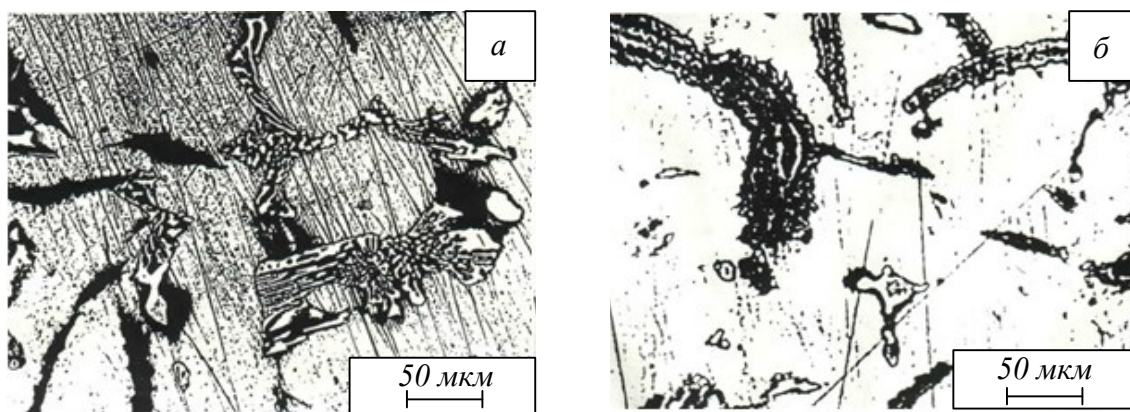


Рис. 1. Микрофотографии структуры сердцевины детали «сфера» до (а) и после (б) высокотемпературного отжига

из широкого круга материалов взрываемых проводников и порошковых навесок различных соединений, вносимых в область взрыва.

В настоящей работе упрочняющей электро-взрывной обработке подвергали внутреннюю цилиндрическую поверхность детали «сфера» форсунки газотурбинного двигателя, испытывающую разрушение при работе в условиях фреттинг-коррозии в окислительной среде.

Материал и методики проведения исследований

Материал детали – отливка из жаро- и кислотостойкого чугуна марки ЧЯ по ОСТ 190077 – 72 с аустенитной структурой металлической основы, вермикулярным графитом и фосфидно-карбидной эвтектикой (рис. 1, а).

Сочетание высоких литейных, механических и теплофизических характеристик чугуна делает его перспективным материалом для отливок ответственного назначения, например, для применения при высоких температурах в условиях фреттинг-коррозии [4, 5]. Внутренний диаметр детали составлял 27 мм, высота – 18 мм, твердость – 120 – 197 НВ, температура эксплуатации – 600 °С. Сопрягаемая деталь – гайка форсунки из коррозионностойкой стали ЭИ 961-Ш по ТУ 14-1-3297 – 82 с азотированной на глубину 0,1 – 0,3 мм поверхностью. При фреттинг-коррозии происходит изнашивание при колебательных перемещениях порядка нескольких десятков микрон со скоростью в пределах нескольких миллиметров в секунду одной поверхности относительно другой в условиях воздействия малоагрессивной коррозионной среды, например воздуха. Процесс разрушения представляет собой диспергирование поверхности без удаления продуктов изнашивания, которые не могут выйти из зоны действительного контакта, подвергаются быстрому окислению, оказывают высокое давление и абразивное действие на основной металл. Дополнительным источником повреждений

может являться возникающее в процессе эксплуатации детали схватывание сопряженных металлов.

В качестве взрываемого проводника использовали углеродные волокна. Импульсную плазменную обработку проводили при движении плазменной струи напролет. Для этого деталь закрепляли соосно каналу сопла, диаметр которого, равный 20 мм, был меньше, чем внутренний диаметр детали. Расстояние от детали до среза сопла (15 мм) подбирали таким, чтобы истекающая из канала плазменная струя расширялась до внутреннего диаметра детали и рабочая поверхность обрабатывалась равномерно по высоте. Обработку осуществляли по трем подобранным экспериментально режимам: режим I обеспечивал воздействие плазменной струи на деталь на пороге оплавления ее поверхности, режим II вызывал минимальное оплавление, режим III обеспечивал более сильное оплавление. Появление оплавления поверхности контролировали путем осмотра детали с помощью микроскопа.

Обработанные детали разрезали на образцы, часть которых отжигали в камерной печи на воздухе при температурах 300, 400, 500, 600 и 700 °С в течение 1 ч. После этого готовили косые шлифы и проводили металлографические исследования.

Результаты

Исследования показали, что обработка детали по режиму I сохраняла исходную топографию поверхности, имеющую характерный вид регулярных кольцевых канавок после механической обработки резцом по седьмому классу. В приповерхностном слое было заметно частичное растворение колоний фосфидно-карбидной эвтектики при кратковременном плазменном нагреве.

Обработка по режиму II вызывала оплавление вершин исходного рельефа поверхности на глубину порядка нескольких микрон. В зоне термического влияния наблюдали незначительное растворение эвтектики.

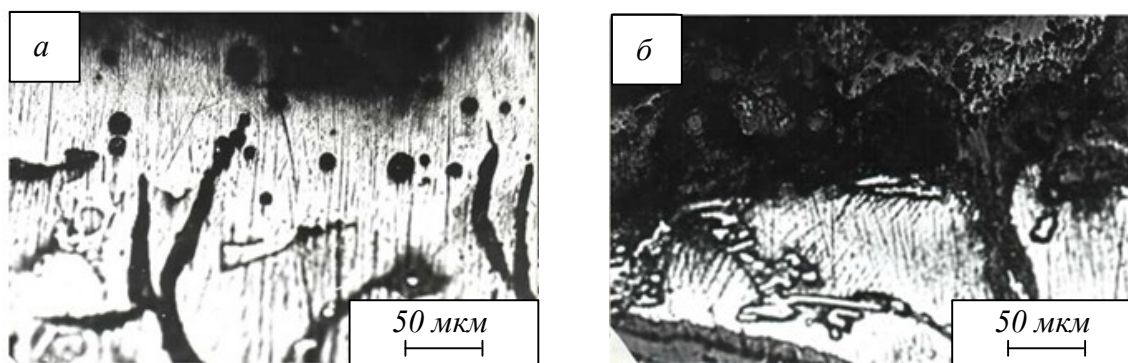


Рис. 2. Микрофотографии структуры модифицированного слоя детали «сфера» после электровзрывной обработки (а) и дополнительного высокотемпературного отжига (б)

Обработка по режиму III вызывала оплавление поверхностного слоя детали на глубину около 30 мкм и частичное продольное разрушение выпуклостей исходного рельефа. При этом регулярность в расположении канавок от обработки резцом и класс чистоты обработки сохранялись. Травление шлифа выявило ровную границу зоны оплавления с основой. В слое, закаленном из жидкого состояния, эвтектические колонии растворялись, а включения графита приобретали шаровидную форму (рис. 2, а). Наблюдали их незначительное диспергирование.

Микротвердость у поверхности увеличивалась до 3,1 ГПа, на глубине около 80 мкм снижалась до исходного значения 1,65 – 1,80 ГПа (рис. 3). После отпуска при всех указанных температурах микротвердость в слое сохранялась в пределах 2,90 – 3,15 ГПа (рис. 4). После отпуска, начиная с температуры 500 °С и выше, в основе наблюдали появление темной оторочки вокруг включений графита (рис. 2, б), а химическая травимость модифицированного слоя сильно возрастала. Графит частично растворялся, появлялись светлые области неправильной вытянутой формы, по-видимому, оксиды (рис. 2, б). Микротвердость ниже границы оплавления снижалась более резко, чем до отпуска.

В зоне легирования вследствие растворения эвтектики и графита происходило насыщение расплава углеродом. Дополнительное легирование расплава вызывало его взаимодействие с плазменным и конденсированным компонентами струи продуктов взрыва. Взаимодействие с расплавом быстро движущейся вдоль обрабатываемой поверхности плазменной струи приводило к перемешиванию и гомогенизации расплава, о чем свидетельствовало диспергирование вермикулярных включений графита. При высоких температурах отпуска сохранение высокого уровня микротвердости может быть обусловлено образованием оксидов.

При всех указанных режимах обработки поверхность детали покрывалась слоем мелкодисперсного графита, образующего с обрабатываемой поверхностью металлургическую связь. Слой облегчал отвод продуктов изнашивания, улучшение передачи нагрузок, снижение сопротивления трению. Недостатком графита в качестве твердой смазки является его заметное окисление при температуре эксплуатации детали, поэтому графитовое покрытие могло эффективно выполнять свои функции непродолжительное время. Однако известно, что повреждение поверхностей происходит уже на стадии приработки пары трения. Слой твер-

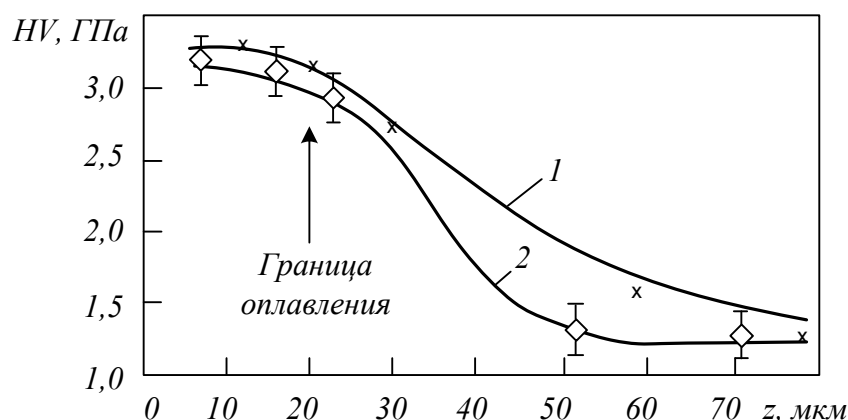


Рис. 3. Распределение по глубине (z) микротвердости модифицированного слоя детали «сфера»: 1 – исходное состояние; 2 – после ЭВЛ

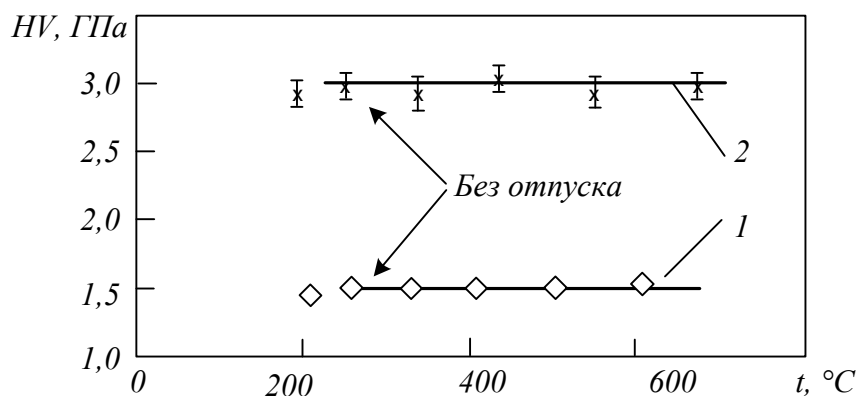


Рис. 4. Зависимость микротвердости металлической основы (1) и модифицированного слоя (2) чугунной детали от температуры отпуска

дой смазки графита, предупреждая непосредственный контакт металлов, ускоряя приработку поверхностей трения, увеличивая долговечность детали.

Рентгенофазовый анализ, который проводили на механически очищенных от графита образцах до электровзрывной обработки, после нее и после электровзрывной обработки и последующего отпуска, показал наличие текстуры аустенитной металлической основы в модифицированном слое. После отпуска наблюдали уменьшение ширины дифракционных пиков, а также появление в упрочненном слое оксидов $\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и Fe_3O_4 .

Частичное продольное разрушение регулярного рельефа модифицированных поверхностей увеличивало возможности отвода продуктов изнашивания с фактической площади контакта трущихся деталей и, следовательно, должно было уменьшать величину нормальной нагрузки со стороны сопрягаемой детали.

По результатам исследований в качестве оптимального выбран режим III, для которого характерна наибольшая глубина упрочненного слоя. В этом режиме была обработана партия деталей для испытания в условиях эксплуатации, наблюдалось увеличение срока их службы на 30 %.

Выводы

Для электровзрывной обработки характерен ряд факторов, способных повысить устойчивость поверхности детали против фреттинг-коррозии. Наблюдаются образование термически стабильного слоя с повышенной в 1,8 раза микротвердостью глубиной около 40 мкм; частичное растворение в упрочненном слое крупных включений графита и колоний эвтектики, по которым происходит раз-

рушение детали; образование на поверхности припеченного слоя твердой смазки мелкодисперсного графита; создание дополнительного рельефа изнашиваемой поверхности, облегчающее приработку сопрягаемых поверхностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2007. – 304 с.
2. Романов Д.А., Громов В.Е., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф. Закономерности формирования структурно-фазовых состояний на поверхности металлов и сплавов при электровзрывном легировании // Успехи физики металлов. 2015. Т. 16. № 2. С. 119 – 157.
3. Формирование структуры, фазового состава и свойств поверхности титановых сплавов при электровзрывном легировании и последующей электронно-пучковой обработке / С.В. Райков, Е.А. Будовских, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Е.С. Ващук. – Новокузнецк: Полиграфист, 2015. – 290 с.
4. Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С. Триботехника. – М.: КНОРУС, 2013. – 408 с.
5. Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ и смазка). – М.: Эко-Пресс, 2010. – 604 с.

© 2020 г. Е.А. Будовских, В.В. Шляров,
А.А. Абатулова, Д.В. Загуляев,
В.Е. Громов
Поступила 3 февраля 2020 г.