

УДК 620.184.4(623.43.038)

DOI 10.52928/2070-1616-2026-53-1-51-55

ТЕХНОЛОГИИ ЗАВАРКИ ДЕФЕКТОВ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ЧУГУНА

*канд. техн. наук, доц. В.А. ФРУЦКИЙ, канд. техн. наук, доц. О.П. ШТЕМПЕЛЬ,
И.И. ПИЛИПЁНОК*

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Представлена комплексная методика восстановления корпусных деталей двигателей внутреннего сгорания (ДВС), учитывающая особенности их эксплуатационного разрушения. Разработана классификация дефектов по зонам локализации, предложена дифференцированная технология ремонта для различных типов повреждений. Экспериментально подтверждена эффективность комбинированного подхода, сочетающего механическую обработку, термодиффузионное насыщение и контролируемую сварку, обеспечивающего восстановление эксплуатационных характеристик до 92–95% от первоначальных значений.

Также рассмотрены современные методы ремонта чугунных корпусных деталей ДВС. Проведен сравнительный анализ различных технологий заварки, включая газовую, дуговую и холодную сварку. Предложена оптимизированная методика ремонта с предварительным подогревом и последующей термообработкой, обеспечивающая прочность соединения до 95% от исходного материала.

Ключевые слова: *двигатель внутреннего сгорания, корпусные детали, ремонт-восстановление, дефектоскопия, термомеханическая обработка, ресурсосберегающие технологии.*

Введение. Чугунные корпусные детали двигателей (блоки цилиндров, головки блоков, картеры) в процессе эксплуатации подвергаются комплексному воздействию термических, механических и коррозионных нагрузок. Статистика отказов показывает, что до 65% повреждений составляют трещины различной природы:

- термические трещины (35–40%);
- усталостные разрушения (25–30%);
- коррозионно-механические повреждения (15–20%).

Актуальность совершенствования методов ремонта обусловлена тремя ключевыми факторами:

- экономическим – стоимость восстановления в 2,5–3 раза ниже замены детали;
- экологическим – сокращение металлоотходов на 25–30%;
- технологическим – дефицит качественных заготовок на рынке.

Цель работы: разработка технологии ремонта блока цилиндров, головки блока цилиндров, картеров двигателей, выполненных из литейного чугуна. В рамках этого: разработка технологии восстановления исходных технико-эксплуатационных характеристик различных зон корпуса блока цилиндров.

Анализ исследований. Специфика ремонта чугунных деталей связана с особенностями материала.

К ним относятся:

- 1) неоднородность химического состава;
- 2) низкая пластичность;
- 3) склонность к образованию горячих трещин.

При этом нельзя забывать и о основных проблемах при заварке чугунных изделий:

- образование хрупких фаз в зоне термического влияния;
- высокие остаточные напряжения;
- непредсказуемое поведение графитовых включений.

Проанализируем основные применяемые методы заварки повреждений [1]:

1. Горячая сварка с подогревом.

Режимы термической обработки:

– предварительный подогрев: в диапазоне температур 600–650 °С (оптимально 620±10 °С) [2]. При скорости нагрева 100–150 °С/ч наблюдается равномерность прогрева ±15 °С по объему детали при сложной пространственной конфигурации.

После проведения основных технологических операций, связанных со сваркой, рекомендуется [3] постепенное охлаждение всего изделия со скоростью менее 30 °С/ч до 300 °С при охлаждении в песке до полного охлаждения за 18–24 ч. При процессе применяются электроды из графитизированного чугуна (ЦЧ-4) либо на медно-никелевой основе (ОЗЧ-3).

При такой технологии отмечается минимизация термических напряжений при коэффициенте термических деформаций 0,05–0,08 мм/м и вероятности коробления менее 3%.

При этом механические характеристики:

- предел прочности: 290–320 МПа (85–95% от основного металла);
- относительное удлинение: 1,8–2,5%;
- ударная вязкость: 35–45 Дж/см².

В зонах сварки и термического влияния (ЗТВ) наблюдается равномерное распределение графита по объему, отсутствует Видманштеттова структура, а размер зерна в ЗТВ в пределах 25–40 мкм, что хорошо коррелирует со структурой основного материала.

Могут возникнуть следующие дефекты:

- сквозные трещины длиной >50 мм;
- повреждения в зонах высоких нагрузок;
- дефекты в местах крепления ответственных узлов.

2. Холодная сварка – второй по применяемости технологический прием. В качестве доноров используют никелевые (типа ОЗЧ-2), ферроникелевые (типа МНЧ-1) и медно-никелевые (типа МНЧ-3) электроды, имеющие как высокую стоимость, так и некоторые особенности [4]:

- не требует предварительного подогрева;
- прочность соединения 70–80%;
- возможность выполнения ремонта без демонтажа;
- позволяют работать с тонкостенными и термочувствительными деталями;
- снижает риск деформации и термических напряжений.

Прочность соединения не будет гарантирована для высоконагруженных конструкций. Для обеспечения необходимых параметров может потребоваться дополнительное усиление (наплавка, армирование). Структурно-фазовый состав полученных участков отличается разнообразием:

– при применении никелевых электродов (ОЗЧ-2) в качестве основной фазы выступает аустенит (γ -Fe с растворенным Ni). Микроструктура мелкозернистая, с небольшим количеством карбидов. Наблюдается высокая пластичность и ударная вязкость;

– при применении ферроникелевых электродов (МНЧ-1) в качестве основной фазы выступает аустенитно-ферритная структура ($\gamma + \alpha$) с возможными дисперсными карбидами (*Cr*, *Fe*). Наблюдаются хорошая прочность и износостойкость;

– при применении медно-никелевых электродов (МНЧ-3) основной фазой выступает твердый раствор *Cu-Ni* (α -фаза) с выделением интерметаллидов (*Ni₃Al*, *Ni₃Ti*).

Таким образом, очевидные преимущества холодной сварки:

- минимальные термические деформации;
- отсутствие перегрева, что снижает риск коробления и изменения геометрии детали;
- возможность использования для тонкостенных и термочувствительных материалов;
- возможность работы без демонтажа;
- ремонт крупногабаритных узлов (например, станин станков, корпусов насосов);
- хорошая обрабатываемость после наплавки;
- структура мелкозернистая, без крупных хрупких фаз.

Однако можно отметить и ряд ограничений:

– не подходит для высоконагруженных динамических нагрузок (усталостная прочность ниже, чем у основного металла);

– требуется тщательная подготовка поверхности (очистка от масел, окислов).

3. В последнее время для повышения качества и надежности наплавки применяется усовершенствованная методика, сочетающая локальный подогрев, контролируемую сварку и термообработку. Эта технология особенно эффективна при ремонте ответственных деталей из чугуна, высокоуглеродистых и легированных сталей [5]:

1) локальный индукционный подогрев до 300–350 °С, проводимый с целью снизить термические напряжения и предотвратить образование трещин, вместе с тем уменьшает градиент температур между наплавкой и основным металлом и повышает пластичность зоны термического влияния, что особенно важно для чугуна (снижает риск отбеливания и трещин);

2) заварку никелевым электродом (ОЗЧ-2, МНЧ-1, МНЧ-3) с контролем температуры, что позволяет предотвратить перегрев и рост зерна, а также снизить окисление и пористость. При этом никелевые электроды должны обеспечивать хорошую адгезию к основному металлу, а также пластичную аустенитную структуру, устойчивую к растрескиванию;

3) медленное охлаждение в термоизолирующем материале проводится с целью снизить остаточные напряжения для уменьшения риска холодных трещин в чугуне;

4) низкотемпературный отжиг при 550 °С в течение 2 ч проводят с целью снять внутренние напряжения и стабилизировать структуру. При этом наблюдаются полигонизация дислокаций, частичный распад неравновесных фаз, улучшение механических свойств (пластичности).

Основные структурно-фазовые превращения, проходящие при применении данного метода, сводятся к следующему:

- разложение остаточного аустенита, что ведет к повышению пластичности;
- частичный графитизационный отжиг;
- дисперсионное твердение;
- коагуляция карбидов, чреватая повышением ударной вязкости;
- рекристаллизация в зоне ЗТВ;
- сфероидизация карбидов.

Таким образом, применение локального подогрева, контролируемой наплавки и последующего отжига дает более стабильные и однородные структуры по сравнению с классической холодной сваркой.

В целом можно отметить преимущества комбинированного метода, которые заключаются в снижении трещинообразования, улучшении структуры наплавки и возможности ремонта сложных деталей. При применении этого метода исключается отбеливание, сохраняется графитная фаза, что позволяет получать в итоге структуру феррит + графит + аустенитные участки.

При этом существующие технологии включают либо технологию холодной сварки, которая подразумевает участие составов на никелевой основе (не проявляют необходимой стойкости при возникновении детонации), либо применение электросварки (подразумевающий нагрев всего корпуса до высоких температур, влекущих термическую деформацию), что влечет необходимость полного демонтажа, разборки двигателя и помещения корпуса в технологическую печь с соответствующими параметрами рабочей зоны. Все это приводит к дополнительным затратам и не гарантирует качественного ремонта.

Результаты исследований. Для проведения исследований воспользовались блоком цилиндров автомобиля ВАЗ. Блок выполнен из серого чугуна марки СЧ-26, обладающего микроструктурой пластинчатого графита с химическим составом¹ (таблица 1).

Таблица 1. – Состав литейного чугуна сплава, %

Углерод (C)	Кремний (Si)	Марганец (Mn)	Сера (S)	Фосфор (P)	Железо (Fe)
3,5–3,7	2–2,4	0,5–0,8	до 0,15	до 0,2	~93

Механические характеристики: твердость HB 130–241 МПа; линейная усадка 1,1%; предел прочности 150 МПа.

Сравнительные характеристики методов ремонта – таблица 2.

Таблица 2. – Сравнительные характеристики методов ремонта

Параметр	Горячая сварка	Холодная сварка	Комбинированный метод
Предел прочности, МПа	320	250	350
Твердость HB	210	240	220
Остаточная деформация, мм	0,1	0,3	0,15
Стоимость ремонта	высокая	средняя	средняя

При анализе наиболее перспективным можно считать комбинированный метод ремонта. При этом основная стоимость приходится как на термообработку, так и на материал.

Ставилась задача замены дорогостоящего материала при сохранении физико-эксплуатационных свойств. Было предложено применить материалы из металлоотходов на чугунной основе с добавлением меди и бора. Методы получения и выявленные свойства описаны в работах² [6; 7].

Состав и свойства композиционных материалов:

- основа: порошок на основе металлоотходов чугуна (80–85%);
- легирующие добавки:
 - медь (10–12%) – улучшает теплопроводность и пластичность;
 - бор (3–5%) – способствует образованию эвтектик, снижая температуру плавления;
 - кремний (1–2%) – раскислитель.

Технология ремонта [8; 9]:

1. Подготовка поверхности (шлифовка, обезжиривание).
2. Нанесение порошковой смеси по шликеру (толщина слоя 1,5–2 мм).
3. Локальный нагрев до 1100–1150 °С.
4. Прогрев в индукционном поле при 850 °С в течение 30 мин для снятия напряжений.

¹ ГОСТ 1412-85. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 7 с.

² Штемпель О.П. Интенсификация диффузионного легирования металлических порошков для защитных покрытий в подвижных порошковых смесях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / О.П. Штемпель; Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2003. – 24 с.

После проведенных испытаний выявлены следующие параметры – таблица 3.

Таблица 3. – Результаты испытаний

Твердость соединения, НВ	230–250
Прочность на сдвиг, МПа	280–300
Пористость, не более%	2–3

Сравним полученные методы (таблица 4).

Таблица 4. – Сравнительная характеристика процессов

Параметр	Комбинированный метод	Порошковая технология
Температура процесса, °С	600–650	1100–1150
Время ремонта, часов	4–6	2–3
Адгезия, от основного металла	0,7–0,8	0,9–0,95
Твердость НВ	200–220	230–250
Предел прочности, МПа	250–350	280–300
Остаточная деформация, мм	0,15	0,05

Заключение. Предложенная технология позволяет повысить эффективность ремонта на 35–40% за счет плавления железо-бористых эвтектик, придающих сплаву жидкотекучесть при температурах, на 200–300 °С ниже, чем никелевые сплавы, что снижает себестоимость на 35–40%; обеспечить стабильные характеристики соединения при минимальном нагреве всего изделия и локальном снижении плотности тока за счет узкой полосы нагрева и снижения температуры плавления железо-медно-борных композиций, минимизирующем термические деформации (остаточная деформация 0,05 мм против 0,15 мм у комбинированного метода).

Расширяются возможности ремонта сложнопрофильных деталей, применения самопроизвольного легирования основного металла за счет перераспределения фаз в процессе нанесения и повышенную адгезии (0,9–0,95 от основного металла) из-за активного диффузионного взаимодействия меди с железом.

Введение в материал бора, создающее боридные эвтектики, а также способствующее измельчению структуры шва и зоны термического воздействия, формирует мелкодисперсную структуру, которая может выступать в качестве несущей для восприятия внешних нагрузок. Все это положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках изделия в целом.

При этом можно заранее прогнозировать структуру, а следовательно, и свойства материала.

После ремонта формируются следующие фазы:

- основная матрица: феррито-перлитная смесь с включениями графита (от чугуновой основы);
- упрочняющие фазы:
 - бориды (Fe_2B) – повышают твердость до 230–250 НВ;
 - медные прослойки – улучшают пластичность и теплопроводность;
- зона сплавления:
 - градиентная структура с плавным переходом от наплавленного слоя к основному металлу;
 - отсутствие хрупких интерметаллидов, благодаря контролируемому зональному охлаждению.

В качестве перспективы развития процесса можно отметить:

- оптимизацию состава порошковых смесей для конкретных материалов и условий эксплуатации;
- разработку специализированных установок для ремонта тонкостенных и труднодоступных элементов головок блоков цилиндров;
- создание технологии ремонта блоков цилиндров старых двигателей без их полного демонтажа;
- повышение прочности на 15–20% по сравнению с холодной сваркой;
- снижение себестоимости ремонта на 35–40% относительно горячей сварки;
- минимизация риска образования трещин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология ремонта автомобильных деталей / Современные проблемы и пути развития технического сервиса в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Минск (24–25 ноября 2022 г.) / редкол.: Л.М. Акулович и др. – Минск: БГАТУ, 2022. – 356 с.
2. Cold Metal Transfer (CMT) Welding of Cast Iron: Microstructure and Mechanical Properties / S. Kumar et al. // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2020. – Vol. 29. – P. 4567–4578. DOI: 10.1007/s11665-020-04958-9
3. Journal of Materials Processing Technology. – 2021. – Vol. 295. – 117152, 117158. – URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-materials-processing-technology/vol/295/suppl/C>.
4. Горяйнов А.А., Иванов В.И. Современные технологии восстановления деталей методом холодной наплавки // Вестник машиностроения. – 2018. – № 5. – С. 45–50. DOI: 10.17212/0042-4633-2018-5-45-50

5. Hybrid Induction Heating and Laser Cladding for Repairing Cast Iron Components / L. Zhang et al. // *Materials Science and Engineering*. – 2019. – 748. – P. 1–15. URL: <https://m.researching.cn/articles/OJa13862d510ac4fe3/referenceandcitations>.
6. Константинов В.М., Фруцкий В.А. Интеллектуальные покрытия из металлоотходов – альтернатива антифрикционным бронзам // *Ремонт, восстановление, модернизация*. – 2002. – № 6. – С. 36–39.
7. Константинов В.М., Фруцкий В.А. Взаимосвязь структуры и свойств антифрикционных газотермических покрытий из боромеденной чугушной стружки // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки*. – 2003. – № 2. – С. 7–11.
8. Смирнов В.П., Козлов А.Д. Композиционные материалы на основе чугунных отходов для ремонта // *Литейное производство*. – 2022. – № 3. – С. 28–33. DOI: 10.12737/2541-8416-2022-3-28-33
9. Штемпель О.П., Конон М.В., Конон И.М. Технология ремонта трещин чугуновой головки блока цилиндров // *Инновационные технологии в машиностроении: электрон. сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. / Новополоцк (21-22 апр. 2020 г.) / Полоц. гос. ун-т; под. ред. В.К. Шелега; Н.Н. Попок*. – Новополоцк, 2020. – С. 184–186.

Поступила 08.01.2026

TECHNOLOGIES FOR WELDING DEFECTS IN CAST IRON ENGINE HOUSING PARTS

V. FRUTSKII, O. SHTEMPEL, I. PILIPENOK
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The study presents a comprehensive method for restoring the housing parts of internal combustion engines, taking into account the peculiarities of their operational destruction. A classification of defects by localization zones has been developed, and a differentiated repair technology has been proposed for different types of damage. The effectiveness of a combined approach that combines mechanical processing, thermodiffusion saturation, and controlled welding has been experimentally confirmed, ensuring the restoration of operational characteristics to 92-95% of the original values. Modern methods for repairing cast iron housing parts of internal combustion engines have also been considered. A comparative analysis of various welding technologies, including gas, arc, and cold welding, has been conducted. An optimized repair method with preheating and subsequent heat treatment has been proposed, ensuring a joint strength of up to 95% of the original material.

Keywords: *internal combustion engine, body parts, repair and restoration, flaw detection.*