

О.В. Захарчук¹, О.А. Мікуліч¹, В.І. Захарчук¹, О.С. Приходько¹, А.С. Кленшин²

Луцький національний технічний університет¹

ТФК Луцького національного технічного університету²

ВИБІР СПОСОБУ ЗВАРЮВАННЯ ЧАВУНУ ПРИ РЕМОНТІ ТА ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ

У роботі досліджено особливості зварювання без попереднього підігріву чавуну, що може бути використано при ремонті та відновленні деталей автомобілів. Актуальність теми пов'язана зі складністю зварювання чавуну через його крихкість, схильністю до утворення тріщин та формування твердих структур у зоні термічного впливу. Проведено аналіз існуючих способів зварювання чавуну та визначено, що застосування спеціальних електродів і оптимальних режимів дозволяє підвищити якість зварних з'єднань. Експериментальні дослідження виконано на зразках із сірого чавуну, отриманих із випускного колектора двигуна. Зварювання проводили без попереднього підігріву із використанням трьох типів електродів: ЦЧ-4, МНЧ-2 та УТР-8. Для оцінки якості зварних з'єднань застосовано випробування на розтяг на стенді МР-100, при цьому кожен зразок випробовувався п'ять разів із подальшим визначенням середнього значення сили руйнування при розриві. Отримані результати дозволили об'єктивно оцінити механічні властивості зварних з'єднань. Проведено розрахунок міцності стикових зварних з'єднань, який показав, що всі досліджені варіанти відповідають умовам міцності та мають достатній запас надійності. Встановлено, що електрод ЦЧ-4 забезпечує міцний, але відносно крихкий шов, тому його доцільно застосовувати для деталей без динамічних навантажень. Електрод МНЧ-2 є універсальним і забезпечує добрий баланс міцності та пластичності, тоді як УТР-8 формує найбільш пластичний і якісний шов, проте характеризується вищою вартістю. Результати дослідження підтверджують ефективність зварювання чавуну та дозволяють обґрунтовано обирати тип електрода залежно від умов експлуатації деталі та економічної доцільності.

Ключові слова: ремонт автомобілів, відновлення деталей автомобілів, дугове зварювання, зварювальні електроди.

O. Zakharchuk, O. Mikulich, V. Zakharchuk, O. Prykhod'ko, A. Klenshyn

SELECTION OF CAST IRON WELDING METHOD FOR REPAIR AND RESTORATION OF AUTOMOTIVE COMPONENTS

The study investigates the features of cast iron welding without preheating, which can be applied in the repair and restoration of automotive components. The relevance of the topic is determined by the inherent difficulties of welding cast iron due to its brittleness, susceptibility to cracking, and the formation of hard structures in the heat-affected zone. An analysis of existing cast iron welding methods was carried out, demonstrating that the use of specialized electrodes and optimized welding parameters can significantly improve the quality of welded joints. Experimental studies were performed on gray cast iron samples obtained from an engine exhaust manifold. Welding was carried out without preheating using three types of electrodes: TsCh-4, MNCh-2, and UTP-8. The quality of the welded joints was evaluated through tensile testing on an MR-100 testing machine, with each sample tested five times followed by the determination of the average fracture load. The obtained results made it possible to objectively assess the mechanical properties of the welded joints. A strength analysis of butt welded joints was conducted, showing that all investigated variants meet the strength requirements and possess a sufficient safety margin. It was established that the TsCh-4 electrode provides a strong but relatively brittle weld, making it suitable for components not subjected to dynamic loads. The MNCh-2 electrode is versatile and ensures a good balance between strength and ductility, while the UTP-8 electrode produces the most ductile and high-quality weld, although it is characterized by a higher cost. The results of the study confirm the effectiveness of welding of cast iron and allow for a well-founded selection of electrode type depending on operating conditions and economic feasibility.

Keywords: automotive repair, restoration of automotive parts, arc welding, welding electrodes.

Постановка проблеми. Чавун є одним із найпоширеніших конструкційних матеріалів, який широко застосовується в машинобудуванні, зокрема в автомобільній промисловості. Він являє собою залізовуглецевий сплав, що містить понад 2,14 % вуглецю, а також кремній, марганець, сірку та фосфор. Завдяки високим ливарним властивостям, добрій зносостійкості, достатній міцності та здатності поглинати вібрації чавун широко використовують для виготовлення корпусних деталей, блоків циліндрів двигунів, випускних трубопроводів, гальмівних барабанів, картерів та інших елементів автомобілів. Разом з тим чавун характеризується відносно низькою пластичністю та крихкістю, що ускладнює його зварювання і потребує застосування спеціальних технологій під час ремонту та відновлення деталей.

Сферами застосування зварювання чавуну є виправлення дефектів лиття (раковини, недоливи, тріщини, пористість та ін.), ремонт та відновлення дефектів, які отримуються під час експлуатації автомобілів, виготовлення окремих виробів із чавунних заготовок.

Якість зварного з'єднання в чавунних виробах та деталях визначається наступними показниками: легкість обробки зварного шва, однакова твердість шва та основного металу, достатня

міцність зварного з'єднання, однаковий хімічний склад та структура наплавленого та основного металу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час зварювати чавунні деталі можна наступними способами: газове зварювання із застосуванням присадок із чавуну та кольорових металів, аргонодугове зварювання із чавунною присадкою, напівавтоматичне зварювання, дугове зварювання різними типами електродів, газове низькотемпературне зварювання та ін.

Основні ускладнення при зварюванні чавуну пов'язані зі схильністю до утворення твердих загартованих прошарків при швидкому охолодженні та недостатньою пластичністю чавуну, що при зварюванні приводить до утворення тріщин у зв'язку із нерівномірним нагрівом виробу. Крім того, відбувається втрата пластичних властивостей при плавленні та твердінні зварного шва [1-10].

На даний час ведеться пошук шляхів покращення вже існуючих способів зварювання чавуну. У дослідженні [5] представлено огляд різних присадних матеріалів та електродів, що використовуються для зварювання ковкого чавуну за допомогою аргонодугового зварювання та ручного дугового зварювання. Встановлено, що електроди та присадні матеріали, які містять високу концентрацію Ni, мають найкращі показники зварювального шва.

Проводилися оптимізації зварювання сірих чавунів методом напівавтоматичного зварювання різними режимами. Встановлено, що при зварюванні стандартним дротом Св 08А без підігріву мінімальними струмами можна отримати якісні зварні шви [6].

Досліджений спосіб, коли зварювальна дуга горить між вугільним електродом і виробом, а зварювальний дріт подають через отвір у вугільному електроді, який живиться струмом прямої полярності. При цьому вугільний електрод є струмопідводом до зварювального дроту і речовиною, що утворює захисний вуглекислий газ у зварювальній дузі. Під час дослідження зварних швів пор, тріщин та інших дефектів не виявлено [7].

Існують дослідження із застосуванням електродугового зварювання чавуну із використанням сталевих електродів із окисленням надлишкового вуглецю у зоні плавлення гематитом, який попередньо розплавляли вугільною дугою [8]. Також є схожий спосіб із використанням сталевих електродів, а зварювальні кромки заздалегідь оброблялися активним вуглецепоглиначем – негашаним вапном із подальшим нагрівом до 400-600⁰С [9]. Ці способи зварювання дозволяють видаляти з поверхневого шару чавуну надмірну кількість вуглецю, що приводить до підвищення якості зварного шва і зниження твердості наплавленого металу.

Ще в одному науковому дослідженні розроблені електроди для холодного зварювання чавуну на дроті Св-08А з окисним покриттям. Встановлено, що доцільно зварювати чавунні деталі зі зменшенням сили струму. Це призведе до зменшення науглецювання металу зварного шва [10].

Проведений аналіз літературних джерел показує, що зварювання чавуну залишається складним технологічним процесом через його крихкість, схильність до утворення тріщин та появу твердих структур у зоні термічного впливу. Разом з тим сучасні дослідження свідчать, що застосування спеціальних електродів, присадних матеріалів та оптимальних режимів при зварюванні, дозволяє зменшити науглецювання металу шва та підвищити якість відновлення чавунних деталей.

Таким чином, вибір раціонального способу зварювання є важливим фактором забезпечення надійності та довговічності відремонтованих автомобільних деталей.

Постановка завдань. Мета роботи полягає у дослідженні та виборі раціонального способу зварювання чавуну під час ремонту та відновлення деталей автомобілів, а також у визначенні оптимальних технологічних умов, що забезпечують високу якість зварного з'єднання, підвищення міцності та довговічності відновлених чавунних деталей.

Для досягнення мети в роботі вирішуються наступні завдання: аналіз проблем та перспектив зварювання чавуну при ремонті та відновленні деталей автомобілів; прийняття технічних рішень вибору доцільного способу зварювання чавуну при ремонті та відновленні деталей автомобілів.

Викладення основного матеріалу. Експериментальні дослідження зварювання проводилися на деталі, яка виготовлена із сірого чавуну СЧ 18-36 – випускний колектор двигуна (рис. 1). Із деталі було вирізано дві заготовки для подальших наукових досліджень (рис. 2).

Для проведення зварювання використовувався зварювальний апарат Дніпро-М MIG/MMA-210. Напівавтомат призначений для комбінованої роботи в режимах MIG/MAG (з використанням дроту) та MMA (ручна дугова зварка електродом).

Для зварювання заготовок із сірого чавуну підібрано електроди, які мають різні характеристики зварювання, різну вартість та є доступними для покупки (рис. 3).



Рис. 1. Випускний колектор двигуна автомобіля



Рис. 2. Заготовки вирізані із випускного колектора двигуна автомобіля



Рис. 3. Зварювальні електроди, які використовувалися в експерименті: 1 – ЦЧ-4; 2 – МНЧ-2; 3 – УТР 8

Електрод ЦЧ-4 – спеціальний феритний електрод для ручного дугового зварювання сірого та ковкого чавуну, який широко застосовується під час ремонту корпусних деталей, блоків двигунів, станин та інших чавунних елементів. Наплавлений метал має феритно-перлітну структуру і твердість приблизно 180–220 НВ, що забезпечує задовільну механічну оброблюваність. Основними перевагами електрода є невисока вартість, доступність і можливість зварювання без значного попереднього підігріву, однак шов має меншу пластичність порівняно з нікелевими електродами.

Електрод МНЧ-2 є мідно-нікелевим електродом, призначеним для зварювання та наплавлення сірого, ковкого і високоміцного чавуну, а також для з'єднання чавуну зі сталлю. Наплавлений метал містить значну частку нікелю і міді, що забезпечує високу пластичність шва, твердість близько 160–190 НВ та хорошу механічну оброблюваність. Електрод широко застосовується під час холодного зварювання чавуну, оскільки дозволяє виконувати зварювання без попереднього підігріву або з мінімальним нагріванням.

Електрод УТР 8 – це нікелевий електрод типу Ni-Fe, призначений для ремонту та наплавлення чавунних деталей, зокрема корпусів, блоків двигунів, станин і корпусів насосів. Наплавлений метал характеризується високою міцністю, доброю оброблюваністю та твердістю близько 170–190 НВ, що забезпечує надійність зварного з'єднання. Основними перевагами електрода є висока якість шва, зменшений ризик утворення тріщин і можливість зварювання чавуну без значного попереднього підігріву.

Порівняння електродів для зварювання чавуну наведено у таблиці 1.

Наступним етапом було проведення зварювання заготовок, які виготовлені із сірого чавуну, різними типами електродів (рис. 4). Зварювання виконували без попереднього підігріву деталі. Під час виконання робіт дотримувалися рекомендованих режимів зварювання, зокрема відповідної сили струму, короткої довжини дуги та виконання коротких зварних швів. Також враховували технологічні особливості зварювання чавуну, пов'язані з його крихкістю та схильністю до утворення тріщин, тому між окремими проходками забезпечували поступове охолодження деталі. Це дозволило зменшити внутрішні напруження у металі шва та підвищити якість отриманих зварних з'єднань.

Після зварювання виконують зачистку зварного шва, яка спрямована на видалення шлаку, бризок металу, окалини та інших нерівностей, що утворилися під час зварювання. Ця операція

© О.В. Захарчук, О.А. Мікулич, В.І. Захарчук, О.С. Приходько, А.С. Кленшин

забезпечує кращу якість з'єднання, покращує зовнішній вигляд шва та підготовлює деталь до подальшої обробки.

Табл. 1

Порівняння електродів для зварювання чавуну

Електрод	Основа	Переваги	Недоліки	Вартість, грн/шт
ЦЧ-4	Fe-C-Si	дешевий, простий, доступний	шов крихкий при динамічних навантаженнях, тріщини	20
МНЧ-2	Ni-Cu-Fe	універсальний, добре варить без підігріву	дещо менша міцність шва, ніж у нікелевих	40
УТР 8	Ni-Fe	міцний, пластичний	дорогий	150

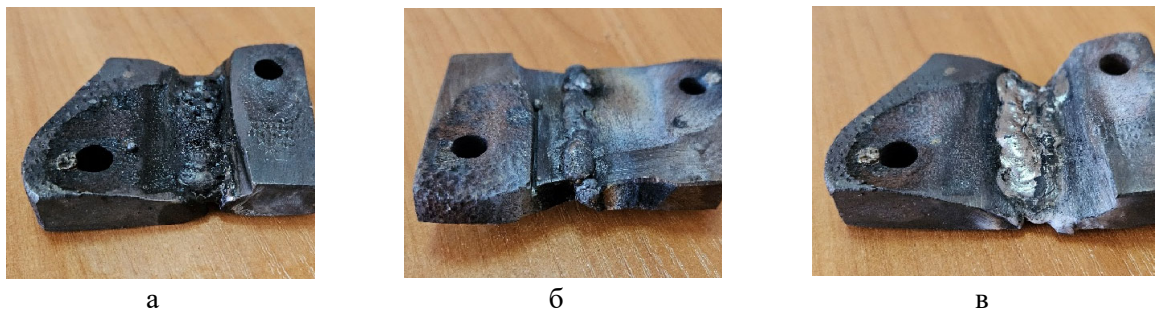


Рис. 4. Зразки заготовок, які виготовлені із сірого чавуну зварені різними електродами: а – ЦЧ-4; б – МНЧ-2; в – УТР 8

Для проведення експериментальних досліджень механічних властивостей зразків із сірого чавуну, які зварювалися різними електродами, використовувався випробувальний стенд типу МР-100 (рис. 5). Даний стенд призначений для визначення характеристик міцності матеріалів шляхом випробування зразків на розтяг і стиск. Принцип роботи установки полягає у прикладанні до зразка поступово зростаючого навантаження до моменту його руйнування. Під час випробування реєструються значення прикладеної сили, що дозволяє визначити межу міцності зварного шва. Отримані результати використовуються для оцінювання механічних властивостей досліджуваних зразків та аналізу якості зварних з'єднань.

Зразки встановлювали у захватах машини та навантажували поступово зі збільшенням сили до моменту їх руйнування, при цьому фіксували максимальне значення навантаження (сили руйнування при розриві) (рис. 6).



Рис. 5. Проведення експериментальних досліджень механічних властивостей зразків із сірого чавуну на стенді МР-100



Рис. 6. Один із дослідних зразків після випробувань на розтяг із характером руйнування

Для підвищення достовірності результатів кожен зразок випробовували п'ять разів за однакових умов. Після проведення серії випробувань визначали середнє значення сили розриву, яке використовували для подальшого аналізу міцності зварних з'єднань. Результати випробувань наведено у таблиці 2.

Усі зразки після випробувань на розтяг мають типовий характер руйнування, що свідчить про однаковий механізм розриву матеріалу в зоні зварного з'єднання (рис. 6). Характер руйнування підтверджує відповідність отриманих результатів умовам випробування та дозволяє об'єктивно оцінити механічні властивості досліджених з'єднань.

Табл. 2

Результати випробувань механічних властивостей зразків із сірого чавуну

Електроди	Серії випробувань, кН					Середнє значення
	1	2	3	4	5	
ЦЧ-4	5200	5250	5300	5150	5100	5200
МНЧ-2	3900	4000	4100	3950	4050	4000
УТР 8	3400	3550	3600	3450	3500	3500

Розрахунок міцності зварних з'єднань є необхідним етапом для оцінки їхньої надійності та працездатності при дії зовнішніх навантажень. Проведені розрахунки дозволяють перевірити відповідність зварного шва умовам міцності та визначити можливість його використання в реальних умовах експлуатації. Це також дає змогу порівняти ефективність різних електродів і обрати оптимальний варіант для відновлення чавунних деталей.

Розрахунок зварних стикових з'єднань при дії поздовжньої сили N , що проходить через центр ваги з'єднання, виконується за формулою [11]:

$$\frac{N \cdot \gamma_n}{t_{min} \cdot l_w \cdot R_{wy} \cdot \gamma_c} \leq 1$$

де N – поздовжня сила, Н;

γ_n – коефіцієнт надійності за навантаженням;

t_{min} – мінімальна товщина деталей, мм;

l_w – довжина зварного шва, мм;

R_{wy} – розрахунковий опір металу шва, МПа;

γ_c – коефіцієнт умови роботи.

Фактичне напруження у зварному шві [11]:

$$\sigma = \frac{N}{A}, \text{ МПа}$$

де A – площа розрахункового перерізу зварного шва, мм².

Під час експериментальних випробувань встановлено, що зварні з'єднання, виконані електродом ЦЧ-4, витримували прикладене навантаження, при цьому руйнування частково відбувалося по основному металу, а не по шву. Це свідчить про високу міцність зварного шва, але разом з тим вказує на його недостатню пластичність. У випадку застосування електродів МНЧ-2 та УТР-8 руйнування відбувалося безпосередньо по зварному шву, що свідчить про більшу пластичність наплавленого металу. Така поведінка з'єднання є більш сприятливою при роботі деталей в умовах змінних та динамічних навантажень.

Стикове зварне з'єднання, виконане електродом ЦЧ-4, при навантаженні 5200 Н задовольняє умову міцності, оскільки розрахунковий показник становить 0,0608 (що є меншим за 1), а фактичне напруження у шві дорівнює 7,90 МПа, що є значно нижчим за допустиме. Для електрода МНЧ-2 при навантаженні 4000 Н отримано значення 0,0415, при цьому напруження у зварному шві становить 8,71 МПа, що також підтверджує забезпечення необхідної міцності. У випадку застосування електрода УТР-8 при навантаженні 3500 Н розрахунковий показник становить 0,0291, а напруження – 6,69 МПа, що свідчить про високий запас міцності з'єднання.

Висновки. Проаналізовано проблеми та перспективи зварювання та відновлення деталей автомобілів, які виготовлені із сірого чавуну.

Проведено електродугове зварювання заготовок із сірого чавуну різними типами спеціальних електродів. Виконано експериментальні дослідження механічних властивостей зразків із сірого чавуну на стенді МР-100.

Розраховано на міцність зварні з'єднання. Експериментальними дослідженнями встановлено, що всі зварні з'єднання, виконані електродами ЦЧ-4, МНЧ-2 та УТР-8, відповідають умові міцності. Електрод ЦЧ-4 доцільно застосовувати для деталей без динамічних навантажень через знижену пластичність зварного шва, МНЧ-2 є універсальним, а УТР-8 забезпечує найбільш пластичний і якісний шов, але є дорожчим.

Список використаних джерел:

1. E.B. Farahani, A. Sarhadi, M. Alizadeh-Sh, S. Fæster, H.K. Danielsen, M.A. Eder Thermomechanical modeling and experimental study of a multi-layer cast iron repair welding for weld-induced crack prediction

Journal of Manufacturing Processes, vol 104, p 443-459. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.08.059

2. Mateichyk V., Ahieiev M., Mościszewski J., Ustincev S., Volodarets M., Kovbasenko S. The use of additive technologies for the restoration and strengthening of parts of transport means. Transportation Research Procedia, 2023, vol. 74, p. 592–599. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.186.

3. Ahieiev M., Gritsuk I., Litikova A., Bilousov I., Vrublevskyi R., Boboshko O., Smyrnov O., Saraieva I., Khudiakov I., Pohorletskyi D. Application of combined electric arc coatings for parts and units of vehicles recovery in Repair Technologies. SAE Technical Paper Series, 2021. DOI: 10.4271/2021-01-5100.

4. Стальніченко О.І. Технологічні можливості відновлення чавунних деталей судових дизелів / О.І. Стальніченко, О.В. Шамов, Є.М. Козішкур // Вісник Одеського національного морського університету, 2023, № 3 (70), С. 58–70.

5. Mphela C., Phasha M., Moema J. Filler materials used to weld ductile cast iron. MATEC Web of Conferences, 2022, 370, 04004 (2022). DOI:10.1051/mateconf/202237004004.

6. Маткова А.В. Особливості зварювання сірих чавунів методом напівавтоматичного зварювання / А.В. Маткова, М.В. Дмитріюк, Н.М. Поліщук // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ», 2011, № 32, С. 224–227.

7. Калін М.А. Спосіб зварювання чавуну / М.А. Калін, А.О. Емдін // Вісник НТУ «ХП», 2013, № 26 (999), С 3–7.

8. Ізотова К.О. Спосіб зварювання чавуну з окисленням надлишкового вуглецю / К.О. Ізотова // Машинобудування, 2016, № 18, С. 89–92.

9. Калін М.А. Спосіб холодного зварювання чавуну / М.А. Калін, К.О. Ізотова // «Сучасні технології промислового комплексу», 2015, Херсон: ХНТУ, С. 141–143.

10. Багров, В. А. Підвищення якості зварних з'єднань чавуну / В. А. Багров, Д. О. Плужніков // Актуальні напрями матеріалознавства: збільшення ресурсу конструкцій на основі конвергенції сучасних технологій обробки матеріалів: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 24–25 верес. 2020 р. / ХНАДУ – Харків, 2020. – С. 38–43.

11. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зміна № 1. – Київ: Мінрегіон України, 2022. – [Електронний ресурс]: https://uscc.ua/uploads/page/images/normativnye%20dokumenty/dbn/dbn_v_2_6198_zmina1_interactive.pdf.