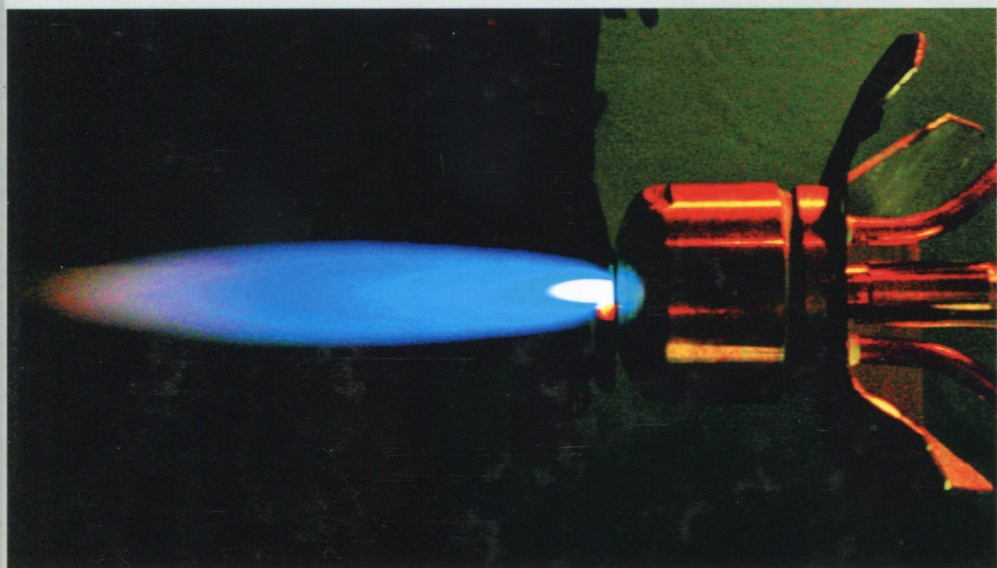


М. В. РАДЧЕНКО, Т. Б. РАДЧЕНКО, В. С. КИСЕЛЁВ

СВЕРХЗВУКОВАЯ ГАЗОПОРОШКОВАЯ НАПЛАВКА



«Инфра-Инженерия»

М. В. Радченко, Т. Б. Радченко, В. С. Киселёв

СВЕРХЗВУКОВАЯ ГАЗОПОРОШКОВАЯ НАПЛАВКА

Учебник

Под общей редакцией доктора технических наук, профессора
М. В. Радченко

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2023

УДК 621.791.7
ББК 34.641
Р15

Рецензенты:

д. т. н., профессор, зав. кафедрой современных методов сварки и контроля конструкций Уфимского государственного авиационного технического университета *Валерий Владимирович Атрощенко*;
к. т. н., с. н. с., руководитель Аттестационного центра лабораторий неразрушающего контроля Головного аттестационного центра Алтайского региона НАКС *Вольферц Геннадий Анатольевич*

Радченко, М. В.

Р15 Сверхзвуковая газопорошковая наплавка : учебник / М. В. Радченко, Т. Б. Радченко, В. С. Киселёв ; под общ. ред. д. т. н., проф. М. В. Радченко. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 464 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-1121-9

Изложены материалы сравнительного анализа дозвуковых способов напыления и наплавки и принципиально нового авторского способа сверхзвуковой газопорошковой наплавки. Рассмотрены базовые основы конструирования сверхзвуковых сопел Лаваля для газопорошковой наплавки, вопросы технологии наплавки, методов исследования технологических параметров процесса наплавки и прочностных характеристик наплавленных покрытий, а также принципы автоматизации процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки, диагностирования сверхзвуковых газопорошковых струй и оптимизации процесса наплавки с использованием методов математического моделирования.

Для студентов направления 15.03.01 «Машиностроение», направленности (профиля) «Оборудование и технология сварочного производства», а также слушателей факультетов повышения квалификации и переподготовки кадров в области сварочного производства.

УДК 621.791.7
ББК 34.641

ISBN 978-5-9729-1121-9

© Радченко М. В., Радченко Т. Б., Киселёв В. С., 2023
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2023
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| ВВЕДЕНИЕ | 9 |
| 1 МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ | 13 |
| 1.1 Способы напыления защитных покрытий..... | 20 |
| 1.2 Способы наплавки защитных покрытий..... | 41 |
| 1.3 Комбинированные способы создания защитных покрытий..... | 65 |
| 1.4 Выбор способа нанесения защитного покрытия..... | 72 |
| 1.5 Материалы для создания защитных покрытий..... | 79 |
| 1.5.1 Напыляемые материалы..... | 81 |
| 1.5.2 Наплавочные материалы..... | 88 |
| 1.5.3 Выбор материала для наплавки защитных покрытий..... | 90 |
| 2 УСТАНОВКИ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ | 91 |
| 2.1 Дозвуковые газопламенные установки..... | 96 |
| 2.2 Сверхзвуковые газопламенные установки..... | 102 |
| 2.3 Горелочные устройства сверхзвуковых газопламенных установок..... | 113 |
| 2.4 Порошковые питатели..... | 120 |
| 3 ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ГАЗОПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ | 138 |
| 3.1 Расчет сверхзвукового сопла Лавалия..... | 141 |
| 3.2 Сверхзвуковые и дозвуковые газопламенные наплавочные сопла..... | 148 |
| 3.2.1 Конструкция первого опытного сверхзвукового наплавочного сопла..... | 148 |
| 3.2.2 Дозвуковые наплавочные сопла..... | 149 |
| 3.2.3 Технические характеристики газопламенных наплавочных сопел..... | 151 |
| 3.3 Схемы подачи наплавочного порошка для СГП наплавки..... | 166 |
| 3.4 Конструирование сверхзвуковых газопорошковых сопел для СГП наплавки..... | 170 |
| 3.4.1 Определение длины цилиндрического участка сопла Лавалия..... | 170 |
| 3.4.2 Конструкция пистолета с соплом М5 и радиальным подводом порошка..... | 171 |
| 3.4.3 Защита основных узлов сверхзвуковой газопорошковой наплавочной установки..... | 173 |
| 3.5 Автоматизация установки СГП наплавки..... | 177 |
| 3.6 Конструкция универсальной сверхзвуковой наплавочной газопорошковой установки..... | 180 |
| 4 ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЦЕССОВ ДОЗВУКОВОЙ И СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРОШКОВЫХ НАПЛАВОК | 187 |
| 4.1 Технологические параметры дозвуковой и сверхзвуковой газопорошковых наплавки..... | 187 |
| 4.2 Оценка качества свойств защитных покрытий, выполненных до- и сверхзвуковой газопорошковыми наплавками..... | 192 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.3 | Механические и эксплуатационные свойства защитных покрытий, выполненных дозвуковой газопорошковой наплавкой | 199 |
| 4.3.1 | Структура металлов основного и защитного покрытия | 202 |
| 4.3.2 | Фазовый состав защитного покрытия | 205 |
| 4.3.3 | Механические свойства наплавленных покрытий | 206 |
| 4.3.4 | Износостойкость защитных покрытий, наплавленных способом дозвуковой ГПН | 209 |
| 4.4 | Механические и эксплуатационные свойства защитных покрытий, выполненных сверхзвуковой газопорошковой наплавкой | 213 |
| 4.4.1 | Микроструктура защитных покрытий | 216 |
| 4.4.2 | Фазовый состав защитных покрытий | 219 |
| 4.4.3 | Микротвердость защитных покрытий | 221 |
| 4.4.4 | Износостойкость защитных покрытий, наплавленных способом сверхзвуковой ГПН | 228 |
| 4.5 | Сравнительный анализ свойств защитных покрытий при дозвуковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавке | 230 |
| 4.6 | Формирование свойств защитных покрытий сверхзвуковой газопорошковой наплавкой | 235 |
| 5 | АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СГП-НАПЛАВКИ | 241 |
| 5.1 | Принципы построения систем управления газопламенных установок | 241 |
| 5.2 | Параметры управления СГП-наплавкой | 251 |
| 5.3 | Автоматическое управление СГП-наплавкой | 264 |
| 5.3.1 | Алгоритм САУ параметрами расхода рабочих газов | 266 |
| 5.3.2 | Структурная схема САУ параметрами расхода газов | 269 |
| 5.3.3 | Программное управление газорегулирующей системой СГП-наплавки | 276 |
| 5.4 | Система автоматического управления СГП наплавкой | 291 |
| 5.4.1 | Средства измерения технологических параметров СГП-наплавки .. | 291 |
| 5.4.2 | Определение рабочих диапазонов горючих газов | 298 |
| 5.4.3 | Взаимосвязь диапазона рабочих газов и мощности газопламенной струи | 301 |
| 6 | ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВЫХ СТРУЙ НА КАЧЕСТВО НАПЛАВЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ | 307 |
| 6.1 | Техническое обеспечение измерений технологических параметров СГП-наплавки | 307 |
| 6.1.1 | Измерение расхода рабочих газов | 307 |
| 6.1.2 | Измерение температуры СГП струи | 309 |
| 6.1.3 | Регистрация спектра СГП струи | 310 |
| 6.1.4 | Измерение скорости пролёта порошковых материалов в СГП струе | 312 |
| 6.2 | Обеспечение достоверности результатов измерений | 320 |

| | |
|--|------------|
| 6.3 Влияние технологических параметров газовых струй на качество наплавленных покрытий..... | 324 |
| 6.3.1 Соотношение рабочих газов при наплавке газовыми струями | 324 |
| 6.3.2 Распределение температуры нагрева по длине сверхзвуковой газовой струи..... | 328 |
| 6.3.3 Распределение температуры по длине сверхзвуковой газопорошковой струи..... | 344 |
| 6.3.4 Распределение частиц порошкового сплава в СГП струе | 349 |
| 7 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ СПОСОБОМ СГП-НАПЛАВКИ..... | 353 |
| 7.1. Планирование эксперимента..... | 353 |
| 7.2 Программные средства обобщения характеристик наплавленных покрытий, определяющих их качественные параметры..... | 357 |
| 7.2.1 Программные продукты для моделирования и прогнозирования свойств сварных соединений | 359 |
| 7.2.2 Программные продукты для моделирования и прогнозирования свойств защитных покрытий..... | 371 |
| 7.3 Безразмерные критерии оценки качества процесса СГП-наплавки..... | 376 |
| 7.4 Прогнозирование эксплуатационных свойств покрытий, наплавленных СГП струей | 388 |
| 7.4.1 Основные факторы, определяющие качество наплаваемого защитного покрытия | 388 |
| 7.4.2 Регрессионный анализ в процессах СГП наплавки защитных покрытий..... | 391 |
| 7.4.3 Термические циклы при нагреве газовыми струями..... | 399 |
| 7.5 Структуры и свойства защитных покрытий, наплавленных СГП наплавкой..... | 401 |
| 7.5.1 Выбор режимов наплавки | 401 |
| 7.5.2. Исследование структуры наплавленного слоя..... | 402 |
| 7.5.3 Аппаратура, материалы и методики экспериментальных исследований процесса СГП-наплавки..... | 409 |
| 8 ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ СГП НАПЛАВКИ | 412 |
| 8.1 Первая отечественная технологическая аппаратура для СГП наплавки..... | 412 |
| 8.2 Насосное оборудование | 415 |
| 8.3 Теплоэнергетические установки..... | 424 |
| 8.4 Метод прогнозирования качества покрытий при СГПН..... | 428 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 432 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А | |
| Сравнение устройств термического напыления | 444 |

| | |
|---|-----|
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б | |
| Основные схемы электрошлаковой наплавки | 447 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ С | |
| Патент на полезную модель №60410 | 448 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д | |
| Типы программируемых логических контроллеров..... | 450 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Ж | |
| Акты внедрения СТП-наплавки | 457 |