

# ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ И ГАЗОПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

---

Под редакцией профессора Н. Н. Сергеева



«Инфра-Инженерия»

# **ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ И ГАЗОПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

*Монография*

*Под редакцией профессора Н. Н. Сергеева*

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2020

УДК 669.14.018.291

ББК 34.222.23

О-75

*Авторы:*

*Н. Н. Сергеев, И. В. Минаев, И. В. Тихонова, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов,  
М. Ю. Комарова, А. Е. Гвоздев*

*Рецензенты:*

*Гадалов В. Н., проф., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет);  
Поляков В. А., канд. техн. наук, д-р экон. наук, зав. кафедрой экономики и управления  
Финансового университета при Правительстве РФ (Тульский филиал)*

**О-75** **Основы лазерной и газоплазменной обработки конструкционных сталей:** монография / [Сергеев Н. Н. и др.] ; под ред. проф. Н. Н. Сергеева. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 284 с.  
ISBN 978-5-9729-0450-1

Разработаны математические модели для углеродистых и легированных конструкционных сталей, отражающие влияние различных факторов на характеристики качества поверхности реза изделий из листового стального проката различной толщины. Исследованы возможности комплексной оптимизации режимов высокоточной обработки для достижения минимальной шероховатости, ортогональности и формирования необходимой зоны термического влияния. Предложена серия лазерных и газоплазменных комплексов для резки листового стального проката и сварки металлоконструкций.

Для специалистов по материаловедению, физике конденсированного состояния, металловедению и термической обработке металлов и сплавов, технологии машиностроения, ресурсосбережению, а также бакалавров, магистрантов, аспирантов и преподавателей соответствующих направлений и профилей.

УДК 669.14.018.291

ББК 34.222.23

ISBN 978-5-9729-0450-1

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	<b>6</b>
1.1. Термическая резка металлов .....	6
1.2. Лазерная обработка металлов: основные понятия и классификация .....	9
1.3. Термическое упрочнение при лазерной обработке .....	12
1.3.1. Смещение критических точек фазовых превращений при нагреве железоуглеродистых сплавов лазерным излучением .....	12
1.3.2. Механизм термоупрочнения железоуглеродистых сплавов.....	15
1.3.3. Особенности структурообразования при лазерной обработке железоуглеродистых сплавов.....	18
1.4. Физические процессы, протекающие при лазерной резке.....	26
1.5. Оборудование для лазерной обработки .....	31
1.6. Проблемы качества лазерной резки конструкционной стали .....	35
1.6.1. Качество поверхности.....	35
1.6.2. Химический состав обрабатываемых объектов.....	36
1.6.3. Влияние параметров газолазерной резки на качество поверхности реза .....	37
1.7. Особенности лазерной резки листовой стали и мониторинг качества образцов после лазерного воздействия .....	42
1.8. Возможности лазерной резки как финишной операции при изготовлении деталей различного класса.....	48
1.9. Постановка цели и задач исследования .....	55
<b>2. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦА УСТАНОВКИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ.....</b>	<b>57</b>
2.1. Обоснование проектирования установки прецизионной плазменной резки конструкционных сталей.....	57
2.1.1. Актуальность работы.....	57
2.1.2. Научная новизна работы .....	58
2.1.3. Практическая ценность работы .....	59
2.1.4. Эффективность работы.....	60
2.1.5. Основное содержание работы.....	61
2.2. Разработка проектной документации на выполнение опытно-конструкторских работ и изготовление образца установки плазменной резки .....	63
2.2.1. Технические требования.....	64
2.2.2. Требования безопасности труда .....	68
2.3. Разработка технической документации на транспортирование и хранение комплексов прецизионной плазменной резки.....	71
2.3.1. Требования по надежности и долговечности.....	72
2.3.2. Правила приемки.....	73
2.3.3. Методы контроля .....	74
2.3.4. Транспортирование и хранение.....	77

2.3.5. Указания по эксплуатации .....	77
2.3.6. Гарантии изготовителя .....	78
2.4. Разработка эксплуатационной документации и методики контроля качества деталей, получаемых методом прецизионной плазменной резки .....	78
2.4.1. Техническое описание и комплектность .....	80
2.4.2. Эксплуатационная документация .....	81
2.4.3. Указания по эксплуатации и хранению .....	84
2.4.4. Сведения по утилизации и перечень ссылочных нормативно- технических документов .....	86
2.5. Разработка и утверждение технического описания и инструкции по эксплуатации комплекса прецизионной плазменной резки .....	87
<b>3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	92
3.1. Объекты исследования .....	92
3.2. Методика макрофрактографического анализа .....	93
3.3. Методика измерения шероховатости поверхности и угла отклонения .....	94
3.4. Методика микроструктурных исследования .....	95
3.5. Методика дюрOMETрического анализа .....	95
3.6. Статистическая обработка результатов измерений .....	97
3.6.1. Проверка равнозначности измерения шероховатости .....	97
3.6.2. Сравнение средних значений шероховатости в разных зонах поверхности реза .....	97
3.6.3. Регрессионный анализ .....	98
<b>4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ И ГАЗОПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ, ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ</b> .....	101
4.1. Макрофрактографический анализ поверхности реза .....	101
4.2. Исследование шероховатости поверхности реза .....	104
4.3. Исследование распределения микротвердости и особенностей микроструктуры в зоне термического влияния .....	108
4.3.1. Микротвердость и микроструктурные особенности зоны термического влияния на стали Ст3 .....	109
4.3.2. Микротвердость и микроструктурные особенности зоны термического влияния на стали 09Г2С .....	117
4.3.3. Микротвердость и микроструктурные особенности зоны термического влияния на стали 20Х13 .....	123
4.3.4. Микротвердость и микроструктурные особенности зоны термического влияния на стали 30ХГСА .....	128
4.3.5. Микротвердость и микроструктурные особенности зоны термического влияния на стали 40Х .....	134
4.3.6. Микротвердость и микроструктурные особенности зоны термического влияния на стали 60С2ХА .....	139

4.3.7. Микротвердость и микроструктурные особенности зоны термического влияния на стали 65Г .....	143
4.3.8. Общие закономерности строения конструкционных легированных сталей .....	148
4.4. Модели показателей качества поверхности реза при лазерной резке стали Ст3 .....	152
4.4.1. Взаимосвязь толщины листа с параметрами лазерной резки .....	152
4.4.2. Взаимосвязь шероховатости поверхности с параметрами лазерной резки .....	157
4.4.3. Взаимосвязь протяженности зоны термического влияния с параметрами лазерной резки .....	163
4.4.4. Взаимосвязь перпендикулярности поверхности реза с параметрами лазерной резки .....	168
4.5. Модели показателей качества поверхности реза при лазерной резке легированных сталей .....	172
4.5.1. Взаимосвязь шероховатости с параметрами лазерной резки, химическим составом объектов исследования и толщиной листа .....	172
4.5.2. Взаимосвязь перпендикулярности и шероховатости поверхности реза с параметрами лазерной резки, химическим составом объектов исследования и толщиной листа .....	178
4.5.3. Взаимосвязь протяженности зоны термического влияния с параметрами лазерной резки, химическим составом объектов исследования и толщиной листа .....	184
4.6. Выбор оптимальных параметров лазерной резки стали Ст3 для получения заданных показателей качества реза .....	188
4.6.1. Оптимизация параметров лазерной резки для получения минимальных значений отдельных показателей качества реза .....	188
4.6.2. Оптимизация параметров лазерной резки для получения заданных показателей качества реза методом последовательных уступок .....	191
4.6.3. Оптимизация параметров лазерной резки для получения заданных показателей качества реза с помощью компромиссной целевой функции .....	193
4.7. Выбор оптимальных параметров лазерной резки легированных сталей для получения заданных показателей качества реза .....	195
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	200
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	203
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	245