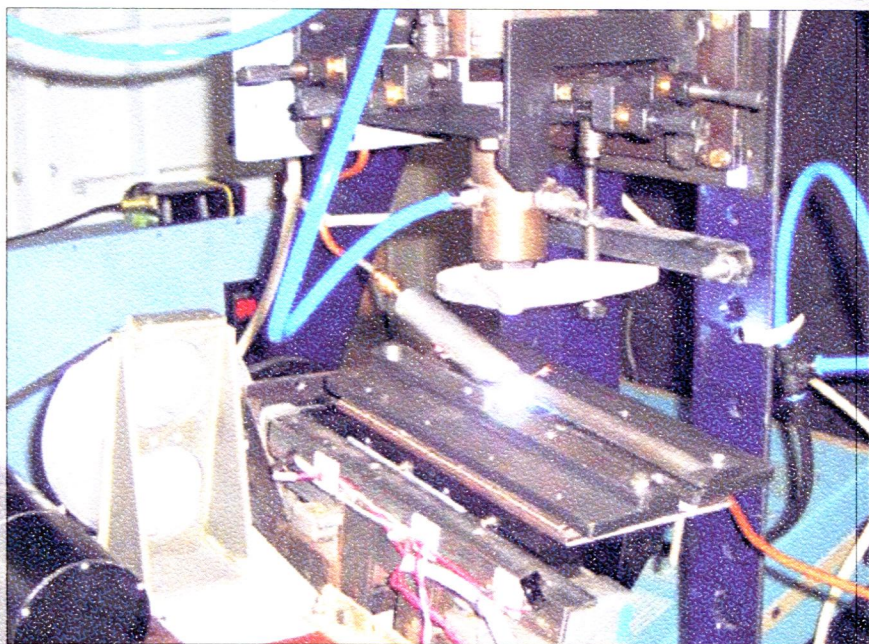


А. М. Оришич, А. Н. Черепанов,  
В. П. Шапеев, Н. Б. Пугачева

## **ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ** с применением нанопорошковых модификаторов



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
Институт теоретической и прикладной механики им. А. С. Христиановича  
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
Институт машиноведения  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
Новосибирский государственный университет  
Физический факультет

А. М. Оришич, А. Н. Черепанов, В. П. Шапеев, Н. Б. Пугачева

**ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОПОРОШКОВЫХ  
МОДИФИКАТОРОВ**

Учебное пособие

Ответственный редактор  
академик *В. М. Фомин*

Новосибирск  
2016

УДК 621.791  
ББК34.641  
О 658

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, проф. *В. Е. Овчаренко*,  
канд. физ.-мат. наук, доц. *В. И. Мали*,  
д-р физ.-мат. наук, проф. *О. П. Солоненко*

**Оришич, А. М.**

О 658 Лазерная сварка металлов с применением нанопорошковых модификаторов : учеб. пособие / А. М. Оришич, А. Н. Черепанов, В. П. Шапеев, Н. Б. Пугачева ; отв. ред. акад. В. М. Фомин ; Новосибирский государственный ун-т ; Ин-т теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН ; Ин-т машиноведения УрО РАН. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2016. – 267 с.

ISBN 978-5-4437-0413-5

В книге рассмотрены наиболее важные результаты исследования новых процессов лазерной сварки металлов и сплавов, в том числе разнородных, с применением наноразмерных тугоплавких соединений, используемых в качестве модифицирующих добавок. Приведены многочисленные экспериментальные данные по изучению влияния малых наномодифицирующих добавок на структуру и морфологию кристаллического зерна в сварном шве, механические и эксплуатационные характеристики сварного соединения. Представлены результаты численного анализа тепло- и гидродинамических процессов в сварочной ванне расплава при «кинжальном» проплавлении свариваемых пластин.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся лазерной сваркой материалов, а также для студентов старших курсов и аспирантов.

© А. М. Оришич, А. Н. Черепанов,  
В. П. Шапеев, Н. Б. Пугачева, 2016

© Институт теоретической и прикладной  
механики им. С. А. Христиановича  
СО РАН, 2016

© Институт машиноведения УрО РАН,  
2016

© Новосибирский государственный  
университет, 2016

ISBN 978-5-4437-0413-5

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<b>Глава 1. Особенности формирования сварного соединения и методики его исследования</b> .....	11
1.1. Взаимодействие лазерного излучения с металлом.....	11
1.1.1. Поглощение лазерного излучения.....	11
1.1.2. Нагрев металла без изменения фазового состояния.....	14
1.1.3. Нагрев металла с изменением фазового состояния.....	19
1.1.4. Расчет и определение оптимальных режимов нагрева железоуглеродистых сплавов излучением CO <sub>2</sub> -лазеров непрерывного действия.....	21
1.2. Превращение стали при быстром нагреве и охлаждении.....	23
1.2.1. Компоненты и фазы в сплавах железа.....	23
1.2.2. Влияние углерода на свойства стали.....	25
1.2.3. Мартенситное превращение аустенита.....	27
1.3. Сущность и основные преимущества сварки лазерным лучом.....	29
1.3.1. Технологические особенности процесса лазерной сварки.....	30
1.3.2. Критическая плотность мощности при лазерной сварке алюминиевых сплавов.....	36
1.3.3. Влияние газовой защиты на качество шва и стабильность процесса.....	39
1.3.4. Перспективы применения нанопорошков для управления микроструктурой лазерного сварного шва и его механическими характеристиками.....	40
1.4. Современные методы исследования качества сварных соединений, полученных с помощью лазера.....	42
<b>Глава 2. Сварка алюминиевых сплавов</b> .....	62
2.1. Структура и микроструктура сварных соединений.....	63
2.2. Статические и усталостные механические испытания сварного соединения.....	67
2.3. Влияние ультразвуковой обработки шва на характеристики сварных соединений и зону термического влияния.....	79

---

2.4. Неоднородность структуры и распределения нормального модуля упругости в сварном алюминиевом соединении.....	83
<b>Глава 3. Сварка низкоуглеродистой стали 20 CO<sub>2</sub>-лазерным излучением .....</b>	<b>99</b>
3.1. Фокусирующая система для сварки листовых образцов.....	99
3.2. Зависимость глубины проплавления от мощности и скорости сварки.....	102
3.3. Особенности формирования сварных швов при лазерной сварке углеродистой стали.....	104
3.4. Влияние нанопорошков на структуру и механические свойства шва при лазерной сварке углеродистой стали.....	107
3.5. Формирование макро- и микроструктуры сварных швов при лазерной сварке малоуглеродистой стали.....	110
<b>Глава 4. Сварка титановых сплавов .....</b>	<b>129</b>
4.1. Сварка титановых сплавов BT1-0 и BT20 излучением непрерывного CO <sub>2</sub> -лазера.....	129
4.2. Структура шва при сварке титанового сплава BT5-1 излучением непрерывного CO <sub>2</sub> -лазера.....	134
<b>Глава 5. Сварка разнородных материалов .....</b>	<b>147</b>
5.1. Структура и прочность сварных соединений титана с нержавеющей сталью 12X18H10T с использованием промежуточной вставки .....	148
5.2. Морфология, структура и фазовый состав шва при сварке титана с нержавеющей сталью .....	153
5.2.1. Морфология сварного шва и границ контакта вставки с титаном и сталью .....	154
5.2.2. Структура и фазовый состав шва .....	155
5.3. Влияние режима сварки на строение и прочность сварных соединений с медной вставкой.....	164
5.4. Применение многослойной вставки, полученной взрывом.....	178

---

<b>Глава 6. Экспериментальные исследования сварки образцов из стали 12X18H10T</b> .....	183
6.1. Сварка образцов без применения нанопорошков.....	183
6.2. Сварка нержавеющей стали с нанопорошками.....	187
<b>Глава 7. Математическое моделирование процессов лазерной сварки металлов и сплавов</b> .....	198
7.1. Моделирование теплофизических процессов при сварке металлических пластин.....	199
7.2. Теоретическая оценка параметров дендритной структуры и газовой пористости в сварном шве.....	207
7.3. Моделирование тепло- и гидродинамических процессов в сварочной ванне.....	212
7.3.1. Численный анализ влияния эффективной теплопроводности на параметры сварочной ванны.....	212
7.3.2. Моделирование сварки с учетом конвекции расплава.....	213
7.4. Трехмерная математическая модель сварки.....	213
7.5. Математическая модель кристаллизации сплава, модифицированного наноразмерными частицами.....	223
7.6. Моделирование процесса сварки разнородных металлов с применением промежуточной вставки.....	231
<b>Приложение. Квазитрехмерная модель</b> .....	242
П.1. Осреднение уравнений Навье – Стокса.....	242
П.2. Осреднение уравнения теплопроводности.....	244
П.3. Осреднение краевых условий.....	245
<b>Список литературы</b> .....	249