

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

**Наномодифицирование
сварных соединений
при лазерной сварке
металлов и сплавов**

2014

Российская академия наук
Сибирское отделение
Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича
Уральское отделение
Институт машиноведения

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

НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Ответственный редактор
академик *В. М. Фомин*



НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
2014

УДК 621.791
ББК 34.641
О-65

Оришич А. М. Наномодифицирование сварных соединений при лазерной сварке металлов и сплавов / А. М. Оришич, А. Н. Черепанов, В. П. Шапеев, Н. Б. Пугачева; отв. ред. В. М. Фомин; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича, Уральское отд-ние, Ин-т машиноведения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – 252 с.

ISBN 978-5-7692-1379-3

В книге обобщены оригинальные результаты исследований, выполненных при активном участии авторов в ИТПМ СО РАН, в течение последних 10 лет. 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. Развито новое научное направление – лазерная микрометаллургия, основанная на возможности эффективного управления процессами структуро- и фазообразования в лазерном сварочном шве, а именно, диспергировать зерна матрицы и избыточных фаз за счет искусственного увеличения числа центров кристаллизации, оптимизировать морфологию кристаллического зерна, карбидных и интерметаллидных фаз. 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 широкого круга специалистов, занимающихся проблемами создания неразъемных соединений металлов: инженерно-технических и научных работников, преподавателей, а также для начинающих исследователей, аспирантов и студентов вузов соответствующего профиля.

Книга написана в рамках комплексных (партнерских) интеграционных проектов ИТПМ СО РАН, ИМаш УрО РАН № 140, № 04, междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 11.5 и финансовой поддержке грантов РФФИ № 08 08 00248, № 14-08-00633.

Рецензенты:

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

Рекомендовано к печати Ученым советом
Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича

ISBN 978-5-7692-1379-3

© Оришич А. М., Черепанов А. Н.,
Шапеев В. П., Пугачева Н. Б., 2014
© Институт теоретической и прикладной
механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 2014
© Институт машиностроения УрО РАН, 2014
© Оформление: Издательство СО РАН, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение | 3 |
| Глава 1. Особенности формирования сварного соединения и методики его исследования | 11 |
| 1.1. Взаимодействие лазерного излучения с металлом | – |
| 1.1.1. Поглощение лазерного излучения | – |
| 1.1.2. Нагрев металла без изменения фазового состояния ... | 13 |
| 1.1.3. Нагрев металла с изменением фазового состояния | 18 |
| 1.1.4. Расчет и определение оптимальных режимов нагрева железоуглеродистых сплавов излучением CO ₂ -лазеров непрерывного действия | 20 |
| 1.2. Превращение стали при быстром нагреве и охлаждении | 23 |
| 1.2.1. Компоненты и фазы в сплавах железа | – |
| 1.2.2. Влияние углерода на свойства стали | 24 |
| 1.2.3. Мартенситное превращение аустенита | 25 |
| 1.3. Сущность и основные преимущества сварки лазерным лучом | 28 |
| 1.3.1. Технологические особенности процесса лазерной сварки | 29 |
| 1.3.2. Критическая плотность мощности при лазерной сварке алюминиевых сплавов | 36 |
| 1.3.3. Влияние газовой защиты на качество шва и стабильность процесса | 38 |
| 1.3.4. Перспективы применения нанопорошков для управления микроструктурой лазерного сварного шва и его механическими характеристиками | 39 |
| 1.4. Современные методы исследования качества сварных соединений, полученных с помощью лазера | 41 |
| Глава 2. Сварка алюминиевых сплавов | 58 |
| 2.1. Структура и микроструктура сварных соединений | 59 |
| 2.2. Статические и усталостные механические испытания сварного соединения | 63 |
| 2.2.1. Механические характеристики сварных соединений ... | 63 |
| 2.2.2. Результаты усталостных испытаний | 70 |
| 2.3. Влияние ультразвуковой обработки шва на характеристики сварных соединений и зону термического влияния | 72 |

| | |
|---|------------|
| 2.4. Неоднородность структуры и распределения нормального модуля упругости в сварном соединении | 75 |
| Глава 3. Сварка низкоуглеродистой стали 20 | |
| СО₂-лазерным излучением | 90 |
| 3.1. Фокусирующая система для сварки листовых образцов | – |
| 3.2. Зависимость глубины проплавления от мощности и скорости сварки | 92 |
| 3.3. Влияние режимов сварки на формирование сварного шва ... | 95 |
| 3.4. Влияние нанопорошков на свойства сварного шва | 97 |
| 3.5. Формирование макро- и микроструктуры сварных швов при лазерной сварке малоуглеродистой стали | 100 |
| Глава 4. Сварка титановых сплавов | 118 |
| 4.1. Влияние нанопорошков на свойства сварных соединений сплавов ВТ 1 – 0, ВТ 20 | – |
| 4.2. Структура шва при сварке титанового сплава ВТ5-1 | 123 |
| Глава 5. Экспериментальные исследования сварки пластин из нержавеющей стали | 135 |
| 5.1. Сварка нержавеющей стали без применения нанопорошков | – |
| 5.2. Сварка нержавеющей стали с применением нанопорошков ... | 138 |
| Глава 6. Сварка разнородных материалов | 148 |
| 6.1. Влияние режимов сварки титана с нержавеющей сталью на свойства сварного соединения | 149 |
| 6.2. Морфология, структура и фазовый состав шва с промежуточной вставкой при сварке титана с нержавеющей сталью | 154 |
| 6.2.1. Морфология сварного шва и границ контакта вставки с титаном и сталью | 155 |
| 6.2.2. Структура и фазовый состав шва | 156 |
| 6.3. Влияние режима сварки на строение и прочность сварных соединений с медной вставкой | 164 |
| 6.4. Сварка титана с нержавеющей сталью с применением композиционной вставки, полученной взрывом | 178 |
| Глава 7. Математическое моделирование процессов лазерной сварки металлов и сплавов | 185 |
| 7.1. Моделирование теплофизических процессов при сварке металлических пластин | 186 |
| 7.2. Теоретическая оценка параметров дендритной структуры и газовой пористости в сварном шве | 194 |
| 7.3. Моделирование тепло- и гидродинамических процессов в сварочной ванне | 198 |

| | |
|--|------------|
| 7.3.1. Численный анализ влияния эффективной теплопроводности на параметры сварочной ванны | 198 |
| 7.3.2. Моделирование сварки с учетом конвекции расплава | 199 |
| 7.4. Трехмерная математическая модель сварки | – |
| 7.5. Математическая модель кристаллизации сплава, модифицированного наноразмерными частицами | 209 |
| 7.6. Моделирование процесса сварки разнородных металлов с применением промежуточной вставки | 216 |
| Приложение. Квазитрехмерная модель | 227 |
| П.1. Осреднение уравнений Навье–Стокса | 228 |
| П.2. Осреднение уравнения теплопроводности | 230 |
| П.3. Осреднение краевых условий | 231 |
| Литература | 234 |