



**Эволюция структуры
и свойств легких сплавов
при энергетических
воздействиях**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ
ПО ФИЗИКЕ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

**ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ
И СВОЙСТВ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ
ПРИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ВОЗДЕЙСТВИЯХ**



НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
2016

УДК 669.539:620.186:539.12

ББК 34.206:34.556

Э15

Авторы:

В.Е. Громов, С.В. Коновалов, К.В. Аксёнова, Т.Ю. Кобзарева

Эволюция структуры и свойств легких сплавов при энергетических воздействиях / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, К.В. Аксёнова, Т.Ю. Кобзарева; Мин-во обр. и науки РФ, СибГИУ, Межгос. координац. совет по физике прочности и пластичности материалов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. – 249 с.

В монографии представлены результаты экспериментальных исследований, посвященных выявлению на различных структурных и масштабных уровнях закономерностей влияния внешних энергетических воздействий (электровзрывное легирование, облучение низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками) на легкие сплавы (титановые, на основе алюминия). Установлены и проанализированы физические механизмы влияния данных видов воздействий на физические и механические свойства легких сплавов.

Книга предназначена для специалистов в области физики конденсированного состояния, металловедения и термической обработки, физического материаловедения и может быть полезна аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

The monograph presents the results of experimental studies devoted to the identification the regularities of the external energy actions (electroexplosive alloying, high current electron beam irradiation) on light alloys (titanium and aluminum alloys) at different scale levels. The physical mechanisms of these energy actions on physical and mechanical properties of light alloys are established and analyzed.

The book is intended for specialists in the field of condensed matter physics, metallurgy and heat treatment, materials science and may be useful for graduate students and senior students of relevant specialties.

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор *В.И. Данилов*

доктор технических наук, профессор *В.В. Муравьев*

Утверждено к печати Научно-техническим советом
Сибирского государственного индустриального университета
и Межгосударственным координационным советом
по физике прочности и пластичности материалов

ISBN 978-5-7692-1501-8

© Издательство СО РАН, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ	11
1.1. Усталостное разрушение металлов и сплавов	–
1.2. Поверхностное упрочнение металлов и сплавов концентрированными потоками энергии	17
1.3. Влияние электронно-пучковой обработки на усталостную долговечность сталей различных структурных классов	30
1.4. Влияние методов поверхностного упрочнения на структуру и свойства силумина	37
1.5. Методы обработки поверхностных слоев титана и титановых сплавов	48
1.6. Применение концентрированных потоков энергии для упрочнения поверхностного слоя титана и его сплавов	53
1.7. Модифицирование структуры и свойств при комбинированной обработке поверхности	57
Выводы по главе 1	64
Литература к главе 1	65
Глава 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	97
2.1. Материалы исследования	–
2.2. Методика усталостных испытаний	–
2.3. Методика электронно-пучковой обработки	99
2.4. Вакуумный импульсный электровзрывной аппарат ЭВУ 60/10 для получения импульсных многофазных плазменных струй ...	101
2.5. Оборудование для обработки поверхности титанового сплава низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками	106
2.6. Методики структурных исследований	108
2.7. Методика количественной обработки результатов исследований	117
Литература к 2 главе	119

Глава 3. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИЛУМИНА В СОСТОЯНИИ ПОСТАВКИ И ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ИНТЕНСИВНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ	126
3.1. Структурно-фазовая аттестация силумина в состоянии поставки	127
3.2. Структура и фазовый состав силумина после обработки интенсивным импульсным электронным пучком	133
Выводы по главе 3	142
Литература к главе 3	143
Глава 4. ФРАКТОГРАФИЯ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СИЛУМИНА, ПОДВЕРГНУТОГО МНОГОЦИКЛОВЫМ УСТАЛОСТНЫМ ИСПЫТАНИЯМ	144
4.1. Фрактография поверхности усталостного разрушения силумина в состоянии поставки	146
4.2. Фрактография поверхности усталостного разрушения силумина после обработки интенсивным импульсным электронным пучком	151
4.2.1. Анализ структуры поверхности разрушения образцов силумина, модифицированного электронным пучком, показавших минимальную усталостную долговечность ...	—
4.2.2. Анализ структуры поверхности разрушения образцов силумина, модифицированного электронным пучком, показавших максимальную усталостную долговечность	158
Выводы по главе 4	164
Литература к главе 4	165
Глава 5. ДЕГРАДАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СИЛУМИНА В УСЛОВИЯХ МНОГОЦИКЛОВЫХ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ	170
5.1. Дegrадация свойств силумина, подвергнутого облучению электронным пучком и многоцикловым усталостным испытаниям	—
5.2. Эволюция в процессе усталостных испытаний дефектной субструктуры и фазового состава силумина, облученного интенсивным импульсным электронным пучком	174
Выводы по главе 5	184
Литература к главе 5	185
Глава 6. МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ	191
6.1. Электровзрывное легирование поверхности титанового сплава ВТ6 диборидом титана	—
6.2. Электровзрывное легирование поверхности титанового сплава ВТ6 карбидом бора	195

6.3. Электровзрывное легирование поверхности титанового сплава ВТ6 карбидом кремния	200
Выводы по главе 6	205
Литература к главе 6	206
Глава 7. МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ	208
7.1. Исследование титанового сплава ВТ6 после электровзрывного дигорирования и последующей электронно-пучковой обработки	—
7.2. Влияние электронно-пучковой обработки на модифицирование поверхности титана после электровзрывного легирования карбидом бора	217
7.3. Влияние электронно-пучковой обработки на модифицирование поверхности титана после электровзрывного легирования карбидом кремния	226
Выводы по главе 7	231
Литература к главе 7	233
Глава 8. МИКРОТВЕРДОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЛОЕВ	235
8.1. Распределение микротвердости по глубине модифицированных слоев	—
8.1.1. Влияние массы порошковой навески на распределение микротвердости по глубине зоны электровзрывного легирования	—
8.1.2. Влияние поверхностной плотности энергии при электронно-пучковой обработке на распределение микротвердости по глубине зоны обработки	237
8.2. Износостойкость модифицированных слоев	239
Выводы по главе 8	243
Литература к главе	—