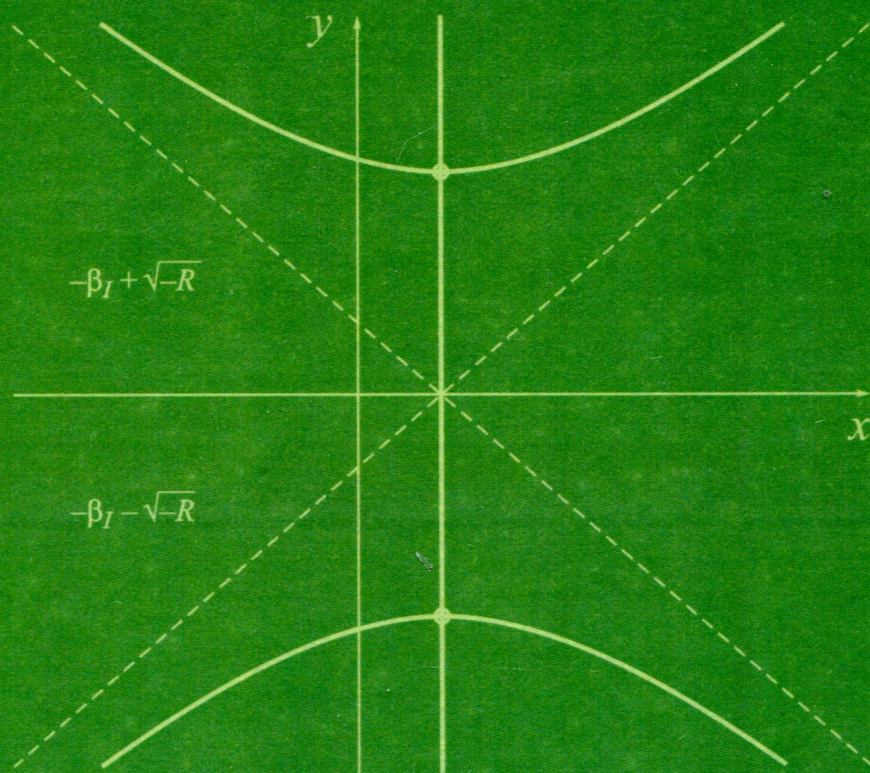


**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
ФОРМИРОВАНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ СТРУКТУР
В МАТЕРИАЛАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ**



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

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
ФОРМИРОВАНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ
СТРУКТУР В МАТЕРИАЛАХ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ
ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ**



НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
2019

УДК 539.2:539.3:621.791.927
ББК 22.3
М34



Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту № 19-12-00007, не подлежит продаже

Авторы

В.Д. Сарычев, С.А. Невский, А.Ю. Грановский, В.Е. Громов

М34 Математические модели формирования градиентных структур в материалах при воздействии концентрированных потоков энергии / В.Д. Сарычев, С.А. Невский, А.Ю. Грановский, В.Е. Громов; М-во науки и высш. образования РФ, Сиб. гос. индустр. ун-т; Межгос. координационный совет по физике прочности и пластичности материалов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. – 120 с.

Представлены результаты теоретических исследований формирования и эволюции градиентов структуры, фазового состава сплавов на основе титана, железа и алюминия при воздействии концентрированных потоков энергии (гетерогенные плазменные потоки, созданные электрическим взрывом проводников, низкоэнергетические высокопоточные электронные пучки, электродуговая наплавка). Установлено, что основным механизмом формирования микро- и наноразмерных структурно-фазовых состояний при воздействии этих потоков являются гидродинамические неустойчивости, образующиеся в расплавленных слоях. Получены дисперсионные уравнения для возмущений границы плазма – расплав. Показано, что зависимость скорости роста возмущений от длины волны имеет бимодальный характер. Выявлена область параметров, при которых реализуются микро- и наноструктурные состояния в металлах и сплавах при воздействии гетерогенных плазменных потоков и электронных пучков на металлы и сплавы.

Монография предназначена для специалистов в области физики конденсированного состояния, металловедения и термической обработки материалов и сплавов, может быть полезна аспирантам и студентам старших курсов соответствующих направлений подготовки.

Рецензенты

доктор физико-математических наук, проф. *В.Д. Кургузов*
доктор технических наук, проф. *В.О. Каледин*

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

ISBN 978-5-7692-1655-8

© Издательство СО РАН, 2019

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGH EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
SIBERIAN STATE INDUSTRIAL UNIVERSITY
INTERNATIONAL COORDINATING COUNCIL
FOR PHYSICS OF STRENGTH AND PLASTICITY OF MATERIALS

**MATHEMATICAL MODELS
OF FORMATION GRADIENT STRUCTURES
IN MATERIALS UNDER THE INFLUENCE
OF CONCENTRATED ENERGY FLUXES**



NOVOSIBIRSK
PUBLISHING HOUSE OF THE SIBERIAN BRANCH
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
2019



Published with financial support of the Russian Foundation for Basic Research project
N 19-12-00007. Publication RFBR not be sold

Authors

V.D. Sarychev, S.A. Nevskii, A.Yu. Granovskiy, V.E. Gromov

Mathematical models of formation gradient structures in materials under the influence of concentrated energy fluxes / V.D. Sarychev, S.A. Nevskii, A.Yu. Granovskiy, V.E. Gromov; Ministry of Science and High Education of the Russian Federation, Siberian State Industrial University; International coordinating council for physics of strength and plasticity of materials. – Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2019. – 120 p.

The results of theoretical studies of the formation and evolution of gradients of the structure, phase composition of alloys based on titanium, iron and aluminum under the influence of concentrated energy flows (heterogeneous plasma flows created by the electric explosion of conductors, low-energy high-current electron beams, electric arc surfacing) are presented. It is established that the main mechanism of formation of micro- and nanoscale structural-phase states under the influence of these flows are hydrodynamic instabilities formed in the molten layers. The dispersion equation for perturbations of the boundary plasma – melt are given. It is shown that the dependence of the perturbation growth rate on the wavelength is bimodal. The region of parameters at which micro- and nanostructural states are realized in metals and alloys under the influence of heterogeneous plasma flows and electron beams on metals and alloys is revealed

The monograph is intended for specialists in the field of condensed matter physics, metallurgy and heat treatment of materials and alloys, may be useful for post-graduate students and senior students of the relevant areas of training.

Reviewers

V.D. Kurguzov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Prof.

V.O. Kaledin, Doctor of Technical Sciences, Prof.

*It is approved to printing by research and technology councils
of Siberian State Industrial University and International coordinating council
for physics of strength and plasticity of materials*

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ МИКРО- И НАНО-СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ	6
1.1. Формирование микро- и наноструктур за счет развития неустойчивости Кельвина – Гельмгольца	–
1.2. Исследование термокапиллярной неустойчивости и формирования наноструктур в поверхностных слоях металлов и сплавов при электронно-пучковой обработке	10
1.3. Неустойчивости в сварочных процессах	14
1.4. Метод компьютерного моделирования на примере COMSOL Multiphysics	19
Выводы	21
Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ	22
2.1. Воздействие гетерогенных плазменных потоков на металлы и сплавы	23
2.2. Линейный анализ неустойчивости Кельвина – Гельмгольца для двухслойной среды, один из которых является вязким	24
2.2.1. Вывод дисперсионного уравнения	25
2.2.2. Анализ дисперсионных уравнений	30
2.3. Неустойчивость Релея – Тейлора при воздействии гетерогенных плазменных потоков	35
Выводы	37
Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ	38
3.1. Термокапиллярная неустойчивость при воздействии концентрированного потока энергии	39
3.1.1. Линейное исследование термокапиллярной неустойчивости	–
3.1.2. Нелинейное исследование термокапиллярной неустойчивости	45
3.2. Формирование градиентных структур в силуминах при электронно-пучковой обработке	46
3.2.1. Анализ экспериментальных данных. Механизмы протекающих процессов	–
3.2.2. Исследование температурного поля	48
3.3. Модель растворения частиц вторых фаз в жидком металле	51
Выводы	55

Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ СВАРКЕ И НАПЛАВКЕ.....	56
4.1. Течение плазмы при дуговой сварке.....	–
4.1.1. Анализ течения струи плазмы без отверстия в аноде.....	59
4.1.2. Анализ течения струи плазмы с отверстием в аноде.....	–
4.2. Формирование капель расплава на электроде.....	60
4.3. Неустойчивость цилиндрического столба расплава.....	64
4.4. Формирование ванны расплава. Термокапиллярное перемешивание в ванне.....	68
Выводы.....	74
Глава 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ГРАДИЕНТНЫЕ СТРУКТУРЫ, СФОРМИРОВАННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ.....	76
5.1 Модель воздействия статической контактной нагрузки на градиентную структуру материалов.....	–
5.2. Модель воздействия статической контактной нагрузки на градиентную структуру (трехмерный случай).....	85
5.3. Математическая модель прохождения ультразвука в градиентных материалах, полученных методом электродуговой наплавки при контактных нагрузках.....	92
5.4. Математическое моделирование абразивного износа футеровочных пластин ковша экскаватора с композиционными покрытиями, нанесенными методом электродуговой наплавки.....	102
Выводы.....	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	107
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	108