

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Самарская государственная сельскохозяйственная академия»

**Т. Ф. Миронова, Т. В. Миронова, Д. В. Миронов**

# **ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЖЕНИЙ НА ФАЗООБРАЗОВАНИЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛОВ С АТОМАМИ ВНЕДРЕНИЯ**

*Монография*

Кинель 2014

УДК 539:219.3:53

М-13

*Рецензенты:*

д-р физико-математических наук, проф., зав. кафедрой ОФ и ФНГП  
ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»

*А. М. Штеренберг;*

канд. техн. наук, зам. директора

ООО «Самарское агентство консалтинга и оценки»

*Д. И. Степанов*

**Миронова, Т. Ф.**

**М-13** Влияние импульсных нагружений на фазообразование и взаимодействие металлов с атомами внедрения : монография / Т. Ф. Миронова, Т. В. Миронова, Д. В. Миронов. – Кинель : РИЦ СГСХА, 2014. – 135 с.

**ISBN 978-5-88575-341-8**

В монографии освещается современное состояние вопросов влияния импульсных нагружений на процессы фазообразования и характер взаимодействия металлов с атомами внедрения в широком температурном интервале, включая криогенные температуры. Выясняется роль импульсных упругих деформаций различного вида в образовании твердых растворов и фаз при взаимодействии металлов с легкими элементами. Рассматриваются различные факторы влияния импульсной пластической деформации на скорость массопереноса и особенности фазообразования в металлах и сплавах. Предлагается возможная модель процесса взаимодействия металлов с элементами внедрения при импульсной пластической деформации.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в области физики металлов и металловедения.

© Миронова Т.Ф., Миронова Т. В., Миронов Д. В., 2014

© ФГБОУ ВПО Самарская ГСХА, 2014

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ.....</b>	<b>5</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
<b>1. ОСОБЕННОСТИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МЕТАЛЛОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ ВНЕДРЕНИЯ.....</b>	<b>9</b>
1.1. Фазообразование в системах Me-C, Me-N, Me-O в равновесных условиях и возможности его применения.....	9
1.2. Фазообразование в системах Me-C, Me-N, Me-O в неравновесных условиях.....	18
1.2.1. Образование твердых растворов и фаз внедрения при импульсном упругом деформировании.....	18
1.2.2. Проникновение легких элементов в металлы в условиях высокочастотных колебаний.....	31
1.2.3. Взаимодействие металлов с углеродом и азотом при импульсной пластической деформации.....	37
<b>2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ ВНЕДРЕНИЯ.....</b>	<b>41</b>
2.1. Объекты исследования и подготовка образцов.....	41
2.2. Способы нагружения металлов и сплавов.....	42
2.2.1. Импульсное упругое деформирование.....	42
2.2.2. Высокочастотное и импульсное пластическое деформирование.....	47
2.3. Методы исследования процессов перераспределения атомов и образования фаз.....	56
2.3.1. Определение формы концентрационного профиля.....	56
2.3.2. Определение коэффициента диффузии.....	58
2.3.3. Определение диффузионной ширины границы и субграницы.....	61
2.3.4. Определение фазового состава диффузионной зоны.....	62
<b>3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛОВ С ЛЕГКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНЫХ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ.....</b>	<b>65</b>
3.1. Образование твердых растворов и фаз внедрения в металлах под действием ионной бомбардировки в тлеющем разряде.....	65
3.2. Взаимодействие металлов с легкими элементами при действии искровых разрядов.....	73
3.3. Образование твердых растворов и фаз внедрения при импульсном сжатии среды.....	78

3.4. Влияние электрогидроимпульсной обработки на взаимодействие металлов с углеродом и кислородом.....	85
<b>4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ С ЛЕГКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ.....</b>	<b>89</b>
4.1. Фазообразование при взаимодействии с углеродом железа и его сплавов в процессе ультразвуковой ударной обработки.....	89
4.2. Особенности взаимодействия металлов с углеродом и азотом в условиях ударного сжатия .....	102
4.3. Модель процесса взаимодействия металла с элементом внедрения при импульсной пластической деформации.....	111
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>119</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>120</b>
<b>АЛФАВИТНО-ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....</b>	<b>133</b>

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ

- ВВ – взрывчатое вещество.
- ВИМС – вторичная ионная масс-спектрометрия.
- ГПУ – гексагональная плотно упакованная (решетка).
- ГЦК – гранецентрированная кубическая (решетка).
- ОЦК – объемно-центрированная кубическая (решетка).
- УЗО – ультразвуковая обработка (упругая обработка с ультразвуковой частотой).
- УЗУО – ультразвуковая ударная обработка.
- ЭГИ – электрогидроимпульсное (воздействие, обработка).
- ЭИЛ – электроискровое легирование.
- $T$  – абсолютная температура, К.
- $t$  – температура, °С.
- $T_{пл}$  – температура плавления, К.
- $\Delta$  – интервал значений физических величин.
- $x_n$  – толщина  $n$ -го слоя.
- $N_n$  – активность образца после снятия слоя толщиной  $x_n$ .
- $\tau$  – длительность процесса (массопереноса, диффузии, деформации).
- $\mu$  – линейный коэффициент поглощения радиоактивного излучения материалом образца.
- $X$  – глубина проникновения диффузанта.
- $D$  – коэффициент диффузии.
- $Q$  – энергия активации.
- $D_o$  – предэкспоненциальный множитель.
- $C$  – концентрация проникающих атомов и атомов в твердом растворе.
- $\rho$  – плотность вещества.
- $\rho_d$  – плотность дислокаций.
- $r_A$  – атомный радиус.
- $\lambda$  – длина волны излучения (рентгеновского, радиоактивного).

$a, b, c$  – параметры кристаллической решетки.

$(h, k, l)$  – кристаллографические индексы плоскостей.

$n_A$  – количество атомов в элементарной ячейке.

$S$  – степень почернения фотоэмульсии под действием радиоактивного и рентгеновского излучения, измеряемая в относительных единицах.

$\mu\text{кс}$  – длительность импульса (микросекунды).

$\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$  – единица измерения коэффициента диффузии (массопереноса).

$\frac{\text{имп}}{\text{мин}}$  – единица измерения радиоактивности слоя.

$\overset{\circ}{\text{А}}$  – единица измерения расстояний, параметров решетки, длин волн излучений, называемая «ангстрем» ( $\overset{\circ}{\text{А}} = 10^{-10} \text{ м}$ ).

$1\text{МэВ}$  – единица измерения энергии, называемая «мега электрон-вольт»,  $1\text{МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ .

## ВВЕДЕНИЕ

Современные условия в промышленности диктуют особые требования к ускорению технологических процессов обработки металлов и сплавов, к снижению энергозатрат при получении изделий, а также к улучшению качества и конкурентоспособности самих изделий.

В последние десятки лет в этих целях использовались отдельные виды обработки материалов, основанные на применении внешних воздействий, таких как обработка взрывом, деформация в сильных электромагнитных полях, электроискровое легирование, ионное азотирование и другие [1-10].

А открытый в 70-х годах прошлого века группой украинских ученых эффект аномального массопереноса, активированного импульсными воздействиями, дал возможность целенаправленно создавать новые и оптимизировать уже известные методы и способы механико-химико-термической обработки в твердой фазе [11-20].

Комплекс механических, физико-химических и иных свойств твердых тел определяется процессом диффузионного переноса вещества, который лежит в основе не только формирования в ходе обработки, но и стабильности в условиях эксплуатации структуры и фазового состава материала.

К настоящему времени довольно подробно изучен механизм и характер взаимодействия различных металлов в условиях быстропротекающих процессов деформирования и в результате экспериментов установлено, что импульсная упругая и пластическая деформация является необходимым условием для ускоренной миграции атомов, причем не только металлов, но и атомов неметаллов. При этом процесс аномального массопереноса приводит к формированию фаз по всей ширине диффузионной зоны и может осуществляться в весьма разнообразных условиях импульсных методов сварки и химико-термической обработки, а кроме того при эксплуатации готовых изделий в условиях, далеких от стационарных. Поэтому переоценить роль этих процессов в науке и технике практически невозможно.

В связи с этим, систематические экспериментальные исследования, направленные на изучение особенностей и определения

закономерностей миграции атомов легких элементов и образования фаз внедрения, безусловно, представляют не только сугубо научный, но практический интерес. При этом следует подчеркнуть, что взаимодействию металлов и сплавов с атомами легких элементов в условиях импульсных нагрузжений при низких температурах достаточного внимания не уделялось. Уменьшение времени и снижение температуры обработки является, прежде всего, экономически выгодным, так как приводит к уменьшению стоимости процесса получения готовых изделий. Но, кроме того, указанные факторы приводят к улучшению качества самого изделия, например, из-за отсутствия разупрочнения (особенно это касается скоростной пластической деформации).

Авторами данной монографии получены систематические экспериментальные результаты по диффузии в металлах и сплавах атомов легких элементов под действием упругих, высокочастотных и пластических деформаций, позволяющие определить условия, в которых происходит ускоренная миграция атомов и фазообразование, а также особенности локализации проникающих атомов и выделившихся фаз в объеме и дефектах кристаллической структуры. В свою очередь, это дает возможность целенаправленно использовать новые знания как серьезную основу для разработки новых специальных способов обработки импульсным воздействием, а также определять оптимальные режимы импульсной сварки давлением и химико-термической обработки, в основе которых лежат диффузионные процессы.



# 1. ОСОБЕННОСТИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МЕТАЛЛОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ ВНЕДРЕНИЯ

## *1.1. Фазообразование в системах металл-атомы внедрения в равновесных условиях и возможности его использования*

В мировой промышленной практике при химико-термической обработке основное место занимают процессы насыщения металлических изделий углеродом и азотом. Это связано с тем, что введение в металлы и сплавы атомов данных элементов позволяет изменять в довольно широких пределах не только их структурно-фазовое состояние, но и их эксплуатационные свойства и характеристики. В первую очередь, это касается износостойких и прочностных свойств.

Кроме того, в процессе эксплуатации при повышенных температурах конструкционные материалы подвергаются окислению или насыщению водородом, что существенно влияет на их характеристики. Особенно это проявляется при работе изделий в условиях знакопеременных или импульсных упругих или неупругих воздействий.

В равновесных условиях фазовый состав диффузионной зоны, которая образуется при проникновении в металл атомов легких элементов, определяется особым характером взаимодействия металла с углеродом, азотом, водородом и кислородом. Это получило свое отражение в различном строении диаграмм состояния двойных систем Me-C, Me-N, Me-O. Для одних металлов характерно образование твердых растворов и фаз внедрения, например, для железа и титана. Другим металлам свойственно растворять элементы внедрения без образования химического соединения в процессе термического воздействия, например, углерода в никеле. В третьих же металлах, например в меди, азот и углерод практически не растворяются в твердой фазе [21-40]. Однако в целом ряде бинарных систем при импульсных нагружениях, закалке или с помощью химических реакций возникают фазы внедрения и пересыщенные твердые растворы, не существующие в равновесных

Ä

## Система железо-азот.

Рассмотрим подробно диаграмму состояния железо-азот. В стабильной системе находятся в равновесии  $\alpha$ - и  $\gamma$ -твердые растворы и молекулярный азот в газообразном состоянии. Однако в реальных условиях гораздо большее значение имеет метастабильная система железо-азот (рис. 1.1 [9]), содержащая следующие фазы (рис. 1.2 [9]):

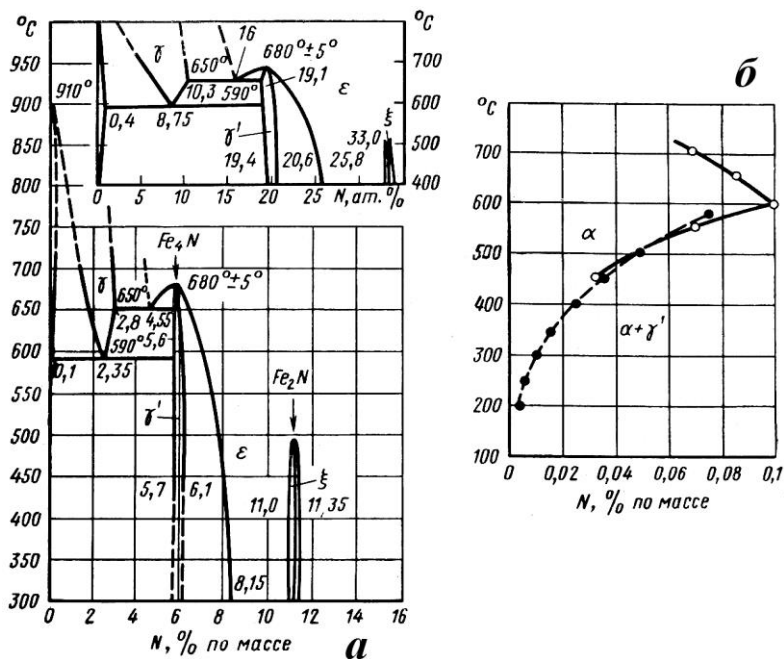


Рис. 1.1. Диаграмма Fe-N (а) и область растворимости азота в феррите (б) [9]