

669.18
K12

Національна академія наук України
Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича

В. В. Каверинський

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І
КОМП'ЮТЕРНИЙ АНАЛІЗ
ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ
ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ В ХОДІ
ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ**

Національна академія наук України
Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича

В. В. Каверинський

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І
КОМП'ЮТЕРНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ
СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ
В ХОДІ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ**

Київ
ВИДАВНИЦТВО
КІМ
2019

ББК 34.22

УДК 669.046.4: 544.2: 004.942

*Затверджено і рекомендовано до публікації
Вченою радою Інституту проблем матеріалознавства
ім. Францевича НАН України від 20.11.2018*

Рецензенти:

КОНДРАТЮК С. Є. - зав. відділу «Металознавства та фазово-структурних перетворень сталей та сплавів» ФТМС НАН України проф., д.т.н.

БОНДАР А. А. - зав. відділу № 6 «Фізичної хімії неорганічних матеріалів» ІПМ НАН України д.х.н., ст.н.с.

Каверинский В. В.

K23

Математичне моделювання і комп'ютерний аналіз процесів структуроутворення легованих сталей в ході фазових перетворень/В. В. Каверенський – К.: КІМ, 2019. – 212 с.: ил.

ISBN 978-617-628-079-8

У книзі розглядається математичне моделювання фазових перетворень у твердому стані за допомогою фізично обґрунтованих моделей. Подано огляд розробленої лабораторної установки для керованого охолодження зразків у потоці повітря. Представлені методи і результати досліджень з аналізу промислових даних, спрямовані на підвищення пластичності і протидії крихкому руйнуванню евтектоїдних сталей. Книга призначена для науковців і промислових спеціалістів, що займаються термічною обробкою, обробкою тиском і зварюванням вуглецевих і легованих сталей, а також буде цікава студентам старших курсів і аспірантам матеріалознавчих і металургійних напрямків.

ISBN 978-617-628-079-8

© Каверинский В. В., 2019

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ	7
1. Сучасні досягнення у сфері математичного моделювання фазових перетворень і структуроутворення у легованих сталях	10
1.1 Методи математичного моделювання фазових перетворень.....	11
1.1.1. Емпіричні моделі.....	11
1.1.2. Термодинаміка фазових перетворень.....	15
1.1.3. Моделювання дифузії у твердих розчинах.....	20
1.1.4. Фізично обґрунтовані моделі розпаду аустеніту.....	27
1.1.5. Врахування впливу деформації.....	35
1.2. Теорія і базові фізичні процеси, що лежать в основі деформаційно-термічної обробки низьколегованих сталей.....	38
1.2.1. Процеси структуроутворення при гарячій деформації.....	38
1.2.2. Теорія утворення карбідних і канбонітридних фаз у низьковуглецевих сталях, легованих сильними карбонітридоутворюючими елементами.....	47
2. Математична модель розпаду аустеніту в сталі	55
2.1. Термодинамічне моделювання.....	56
2.2. Дифузійна модель феритного перетворення.....	61
2.2.1. Зародження фериту.....	61
2.2.2. Зростання зерен фериту.....	67
2.3. Модель перлітного перетворення.....	71
2.4. Модель бейнітного перетворення.....	72
2.6. Модель мартенситного перетворення.....	75
2.7. Загальні принципи виконання розрахунків за розробленою математичною моделлю.....	75

3. Верифікація розробленої моделі розпаду аустеніту.....	78
4. Результати моделювання розпаду переохолодженого аустеніту в сталях.....	85
4.1. Приклади розрахунків за розробленою комп'ютерною моделлю фазових перетворень.....	85
4.2. Комп'ютерне моделювання розпаду аустеніту в об'ємі.....	91
4.3. Моделювання трансформації аустеніту для розробки технології керованої прокатки.....	96
4.4. Математичне моделювання структуроутворення в області термічного впливу зварювального шва низьковуглецевої середньолегованої сталі.....	100
4.5. Математичне моделювання кінетики розпаду аустеніту при охолодженні низьковуглецевої сталі з врахуванням впливу деформації.....	106
5. Дослідження утворення карбонітридних фаз у комплексно мікролегованих і модифікованих сталях.....	114
5.1. Термодинамічний опис процесів виділення карбонітридів в модифікованій мікролегованій сталі.....	114
5.2. Термодинамічне дослідження виділення карбонітридних фаз в комплексно мікролегованій сталі в процесі охолодження.....	119
5.3. Термодинамічне моделювання карбонітридоутворення в комплексно мікролегованих сталях в ізотермічних умовах....	124
5.4. Вплив вмісту цирконію на карбонітридоутворення в мікролегованій низько вуглецевій сталі.....	135
6. Термічна обробка низьколегованих сталей у потоці повітря з керованою швидкістю.....	142
6.1. Базові принципи керування охолодженням за рахунок зміни швидкості потоку повітря.....	142
6.2. Конструкція лабораторної установки для контрольованого повітряного охолодження.....	144

6.3. Експериментальне дослідження режимів керованого повітряного охолодження.....	147
7. Основи методології аналізу даних і виявлення прихованих залежностей.....	153
7.1. Багатофакторний регресійний аналіз.....	153
7.2. Кластерний аналіз.....	156
7.3. Попередня підготовка даних і регресійний аналіз на кластерах.....	158
8. Розробка методів підвищення пластичності і протидії крихкому руйнуванню у евтектоїдних сталях.....	163
8.1. Підвищення показників відносного звуження сталі загартованих рейок.....	163
8.2. Виявлення причин крихкого руйнування катанки зі сталі 85	170
8.3. Застосування регресійного аналізу на кластерах для детального аналізу залежності механічних властивостей і дефектів від хімічного складу і технологічних параметрів.....	179
8.3.1. Аналіз розподілу механічних властивостей і дефектів різних типів у катанці з перлітною сталі 85.....	179
8.3.1.1. Розбиття на 2 кластери.....	179
8.3.1.2. Розбиття на 3 кластери.....	181
8.3.1.3. Розбиття на 4 кластери.....	183
8.3.2. Регресійний аналіз залежності дефектності і механічних властивостей катанки зі сталі 85 в залежності від діаметру і хімічного складу, проведений на окремих кластерах.....	185
Висновки.....	191
Рекомендації щодо практичного застосування отриманих результатів.....	196
Перелік посилань.....	198