

С.А. Никулин
С.Н. Вотинов
А.Б. Рожнов

Ванадиевые сплавы для ядерной энергетики

22 Ti ТИТАН	23 V ВАНАДИЙ	24 Cr ХРОМ	25 Mn МАРГАНЕЦ
32 Ge германий	33 As мышьяк	34 Se селен	35 Br бром
40 Zr цирконий	41 Nb ниобий	42 Mo молибден	43 Tc технеций
50 Sn олово	51 Sb сурьма	52 Te теллур	53 I йод
72 Hf гафний	73 Ta тантал	74 W вольфрам	75 Re рений

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

С.А. Никулин
С.Н. Вотинов
А.Б. Рожнов

Ванадиевые сплавы для ядерной энергетики

Монография



Москва 2014

УДК 669.292
Н65

Рецензент

д-р техн. наук, проф. *С.В. Добаткин*
(ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН)

Никулин, С.А.

Н65 Ванадиевые сплавы для ядерной энергетики : моногр. /
С.А. Никулин, С.Н. Вотинов, А.Б. Рожнов. – М. : Изд. Дом
МИСиС, 2014. – 206 с.
ISBN 978-5-87623-766-8

В монографии изложены сведения о ванадии и его сплавах – перспективных для использования в ядерной энергетике. Рассмотрен комплекс физико-механических, коррозионных свойств, радиационной стойкости ванадиевых сплавов, рассматриваемых в качестве конструкционных материалов (КМ) твэлов и других элементов активной зоны реакторов на быстрых нейтронах в различных условиях эксплуатации, в том числе в условиях облучения при повышенных температурах в контакте с жидкометаллическим теплоносителем. Особое внимание уделено сплавам ванадия системы V–Ti–Cr, а также многослойным материалам на основе сплавов V–4 %Ti–4 % Cr и V–10 % Ti–5 % Cr, плакированных ферритной коррозионностойкой сталью (типа X17), как материалов, наиболее удовлетворяющих предъявляемым требованиям для работы в активной зоне быстрых реакторов нового поколения. Кроме сведений о свойствах данных сплавов приводятся технологические основы производства изделий из них. Отмечены преимущества ванадиевых сплавов в сравнении с другими материалами и анализируются перспективы их использования в ядерной энергетике.

Монография может быть полезна научным сотрудникам, занимающимся исследованиями и разработкой конструкционных материалов, работникам промышленности, интересующимся вопросами производства и применения ванадиевых сплавов, а также аспирантам и студентам, специализирующимся в области материаловедения и технологии материалов.

УДК 669.292

© С.А. Никулин,
С.Н. Вотинов,
А.Б. Рожнов, 2014

ISBN 978-5-87623-766-8

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение.....	7
Список сокращений	10
1. Ванадий и его сплавы	11
1.1. История открытия. Общие сведения	11
1.2. Физико-химические свойства ванадия и его сплавов.....	13
1.3. Легирование ванадия и свойства ванадиевых сплавов.....	13
1.3.1. Диаграммы состояния	15
1.3.2. Влияние легирования на физические свойства.....	18
1.3.3. Влияние легирования на кратковременные механические свойства	25
1.3.4. Ползучесть и длительная прочность	37
1.3.4.1. Определение характеристик ползучести и длительной прочности	37
1.3.4.2. Ползучесть и длительная прочность ванадиевых сплавов	43
1.4. Влияние примесей на механические свойства сплавов ванадия	50
1.4.1. Влияние кислорода, азота, углерода.....	50
1.4.2. Влияние водорода	54
1.4.2.1. Растворимость водорода в ванадии и образование водородсодержащих фаз	54
1.4.2.2. Водородное охрупчивание.....	56
2. Ванадиевые сплавы для активной зоны атомных реакторов	64
2.1. Ядерно-физические свойства	64
2.2. Влияние облучения на структуру и механические свойства сплавов.....	71
2.2.1. Радиационное охрупчивание и распухание конструкционных материалов	75
2.2.2. Изменение структуры и свойств ванадиевых сплавов при облучении	79
2.2.2.1. Структура и механические свойства	79
2.2.2.2. Радиационное распухание	92
2.2.2.3. Радиационная ползучесть	98

2.3. Коррозионная стойкость. Взаимодействие с жидкометаллическим теплоносителем и топливом	100
2.3.1. Механизмы взаимодействия с ЖМТ	100
2.3.2. Коррозия в натрии и других ЖМТ.....	104
2.3.3. Коррозия в других средах	106
2.3.4. Совместимость сплавов ванадия с топливными композициями.....	111
2.4. Перспектива использования ванадиевых сплавов в ядерной энергетике	112
3. Технологические основы получения изделий из ванадиевых сплавов	121
3.1. Получение ванадия и его сплавов	121
3.1.1. Виды ванадийсодержащего сырья	121
3.1.2. Основные способы извлечения ванадия из сырья	125
3.1.3. Получение феррованадия	128
3.1.4. Получение металлического ванадия и его сплавов	130
3.1.5. Краткая характеристика мирового рынка ванадия	138
3.1.6. Области применения ванадия и его сплавов	142
3.2. Деформационно-термическая обработка ванадиевых сплавов	144
3.3. Получение многослойных металлических материалов на основе ванадиевых сплавов	150
3.3.1. Основы производства слоистых металлических материалов	150
3.3.2. Получение изделий из трехслойного материала «сталь–ванадиевый сплав–сталь»	167
3.4. Сварка ванадиевых сплавов.....	183
3.5. Охрана труда при производстве ванадия	189
Библиографический список	193