

## ОСНОВНЫЕ ЦЕНТРЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕДНЕГО ДЕСЯТИЛЕТИЯ

*О.В. Кривченко, В.А. Деревянко, Л.Д. Юрченко, А.Г. Шепелев, Ю.П. Курило*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*

*E-mail: shepelev@kipt.kharkov.ua*

Рассматривается анализ Международной базы данных МАГАТЭ INIS, который позволяет определить основные центры всех стран, принимающих участие в последнее десятилетие в исследовании наиболее применяемых циркониевых сплавов для самых распространенных атомных реакторов водо-водяного типа.

Как известно, особые ядерно-физические, механические и коррозионные свойства сплавов циркония привели к их широкому использованию как основного конструкционного материала активных зон атомных реакторов. Недавно мы рассмотрели динамику информационных потоков по разработке и исследованию таких сплавов в Базе данных «International Nuclear Information System» (БД INIS) и страны, специалисты которых занимались этими проблемами с 1970 г. [1].

Представляло интерес выяснить, какие основные научно-технические центры исследовали эти сплавы в последнее десятилетие. Для анализа использовалась специализированная БД МАГАТЭ INIS, которая создается на кооперативной основе всеми государствами – членами МАГАТЭ; в настоящее время – это 159 стран. Особенностью этой БД является включение в нее так называемой «серой литературы» – отчетов, патентов и диссертаций, выполненных в вышеуказанных странах.

Надо отметить, что циркониевые сплавы, применяемые в атомном реакторостроении, составляют три группы (по основной примеси): сплавы с примесью олова, сплавы с примесью ниобия и сплавы, содержащие в качестве примеси и олово, и ниобий. Поскольку эти сплавы были разработаны достаточно давно, то активная фаза их исследования относится к более раннему периоду изучения.

I. Результаты анализа публикаций по сплавам циркония с **примесью олова** приведены в табл. 1.

Отметим, что сплавы Zircaloy-2 (концентрация примесей, %: олово 1,2...1,8; железо 0,07...0,2; хром 0,05...0,15; никель 0,03...0,08) и Zircaloy-4 (концентрация примесей, %: олово 1,2...1,8; железо 0,18...0,24 и хром 0,07...0,13) были разработаны в США в 1952 г.

Сплав M4 (концентрация примесей, %: олово 0,5; железо 0,6; ванадий 0,3) был разработан во Франции в 1997 г.

По этому сплаву работы проводились наряду с перечисленными в табл. 1 организациями и в организациях Франции, США, Германии и других стран.

Работы по сплавам Zircaloy-2 и Zircaloy-4 выполнялись как в указанных организациях (см. табл. 1), так и в организациях Германии, Швеции, Нидерландов, Аргентины, Великобритании, Китая и других стран.

II. Результаты анализа публикаций по сплавам циркония с **примесью ниобия** представлены в табл. 2.

Заметим, что сплавы E110 (примеси, %: ниобий 0,9...1,1; железо 0,014) и E125 (примесь: ниобий 2,5%) были разработаны в СССР в 1958 г.

Сплав Zr97Nb3 (примеси, %: ниобий 2,4...2,8; железо меньше 0,15) был разработан в Канаде в 1984 г.

Сплав M5 (примеси, %: ниобий 0,8...1,2; железо 0,015...0,06) был разработан во Франции в 1997 г.

Сплав HANA-6 (примеси, %: ниобий 1,1; медь 0,05) был разработан в Южной Корее в 1970 г.

Работы по сплаву E110, наряду с организациями указанными в табл. 2, были выполнены и в организациях Швейцарии, Венгрии, Германии, США и других стран.

По сплаву E125 работы проводились кроме представленной в табл. 2 организации в организациях Чехии, Франции, США, Украины, Аргентины, Индии и других стран.

Работы по сплаву Zr97Nb3 выполнялись наряду с указанными в табл. 2 организациями и в организациях Южной Кореи, России, Индии, Великобритании.

Работы по сплаву M-5 выполнялись наряду с указанными в табл. 2 организациями и в организациях России, Испании, Италии, Китая, Бельгии, Канады и других стран.

Работы по сплаву HANA-6 выполнялись кроме приведенной в табл. 2 организации и в организациях Франции, Японии и Словакии.

III. Результаты анализа публикаций по сплавам циркония с **примесью олова и ниобия** приведены в табл. 3.

Отметим, что сплав E635 (примеси, %: олово 1,1...1,4; ниобий 0,9...1,1; железо 0,3...0,5) был разработан в СССР в 1971 г.

Сплав Zirlo (примеси, %: олово 0,7...1,0; ниобий 1; железо 0,1) был разработан в США в 1990 г.

Сплавы NDA (примеси, %: олово 1; ниобий 0,1; железо 0,3; хром 0,2) и MDA (примеси, %: олово 0,8; ниобий 0,5; железо 0,2; хром 0,1) разработаны в Японии в 1990 г.

Сплав HANA-4 (примеси, %: олово 0,4; ниобий 1,5; железо 0,2; хром 0,1) был разработан в Южной Корее в 1970 г.

## Организации, исследующие сплавы циркония с примесью олова

Страна	Наименование организации	Кол-во работ
<b>Zircaloy-2</b>		
S. Korea	Korea Atomic Energy Research Institute, Daejon	142
	Hanyang Univ., Seoul	11
India	Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai	100
Japan	Japan Atomic Energy Agency, Advanced Science Research Center, Tokai	66
	Central Research Inst. of Electric Power Industry, Yokosuka	28
	Nippon Nuclear Fuel Development Co., Oarai-machi	23
France	Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire, CEN Cadarache	34
USA	AREVA NP Inc., Richland	19
	Argonne National Laboratory, Argonne	16
	Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge	15
Canada	Queen's University, Kingston	11
Russia	Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Troitsk	10
<b>Zircaloy-4</b>		
S. Korea	Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon	148
	Hanyang Univ., Seoul	16
India	Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai	103
	Nuclear Fuel Complex, Hyderabad	22
Japan	Japan Atomic Energy Research Inst., Tokai	99
	Central Research Inst. of Electric Power Industry, Kanagawa	29
	Osaka University, Osaka	12
France	Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire, CEN Cadarache	61
	AREVA NP SAS, Lyon	43
	CEA Saclay, 91 - Gif sur Yvette	41
	Electricite de France, SEPTEN, Villeurbanne	20
USA	AREVA NP Inc., Richland	21
	Argonne National Laboratory, Argonne	17
	Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge	16
	University of Idaho, CAES, Idaho Falls	12
	The Pennsylvania State University, University Park	10
	University of Michigan, Ann Arbor	10
<b>M4</b>		
Japan	Japan Atomic Energy Agency, Advanced Nuclear System Res. & Dev. Directorate, Oarai	131
	Kyoto University, Graduate School of Energy Science, Kyoto	20
	Central Research Inst. of Electric Power Industry, Tokyo	17
	Nippon Nuclear Fuel Development Co., Ltd., Ibaraki	6
Ukraine	NSC 'Kharkov Institute of Physics and Technology	18
	Odessa National Polytechnic University	7
Russia	Research Institute of Atomic Reactors, Dimitrovgrad	12
	Institute Scientific and Industrial Association 'Luch', Podolsk	12
	Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow	11
S. Korea	Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon	11

Работы по сплаву E635 выполнялись наряду с указанными в табл. 3 организациями и в организациях Болгарии, Франции, Чехии, Швейцарии, Украины и других стран.

Работы по сплаву Zirlo проводились кроме упомянутых в табл. 3 организациях и в организациях России, Чехии, Украины, Аргентины, Бельгии, Индии, Китая и других стран.

Работы по сплаву NDA выполнялись наряду с указанными в табл. 3 организациями и в организа-

циях Бельгии, Великобритании, США, Швейцарии, Германии и других стран.

Работы по сплаву MDA проводились кроме указанных в табл. 3 организаций и в организациях США, Словакии, Израиля, Швейцарии, Германии и других стран.

Работы по сплаву HANA-4 наряду с перечисленными в табл. 3 организациями выполнялись и в организациях Германии, Чехии, Японии, Бразилии, Польши и других стран.

Таблица 2

## Организации, исследующие сплавы циркония с примесью ниобия

Страна	Наименование организации	Кол-во работ
<b>E110</b>		
Ukraine	NSC 'Kharkov Institute of Physics and Technology', Khar'kov	29
Russia	Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow	27
	Research Institute of Atomic Reactors, Dimitrovgrad	17
	Fuel Company Open Joint Stock Association 'TVEL', Moscow	8
Bulgaria	Inst. Nuclear Research and Nuclear Energy, Bulgarian Acad. of Sciences, Sofia	9
Finland	VTT Materials and Building, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo	5
<b>E125</b>		
Russia	Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow	4
<b>СПИЯВ Zr97Nb3</b>		
Romania	Institute for Nuclear Research	13
Canada	Queen's Univ., Kingston	6
<b>M5</b>		
S. Korea	Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon	42
France	Institut de Radioprotection et Surete Nucleaire, Cadarache	39
	Nuclear Materials Department, Research Centre de Saclay	28
	AREVA-FRAMATOME ANP, an AREVA and Siemens Company, Lyon	21
	OECD, Nuclear Energy Agency	14
	Ecole Nationale Superieure des Mines de Paris Univ.	12
	Societe Francaise d'Energie Nucleaire	11
	Universite de Grenoble	10
	Electricite de France, SEPTEN, Villeurbanne	8
	Aix-Marseille Universite	8
Japan	Japan Atomic Energy Agency, Ken	15
Switzerland	Swiss Fedral Nuclear Safety Inspectorate	9
	Paul Scherrer Institut	8
Germany	AREVA-FRAMATOME ANP, an AREVA and Siemens Company, Erlangen	7
	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH	7
	Institute for Materials Research 1, Nuclear Safety Program	6
USA	AREVA NP Inc.	7
Brazil	Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares, Sao Paulo	7
Sweden	Swedish Nuclear Power Inspectorate	6
Czech Rep.	Nuclear Research Institute Rez plc	6
<b>HANA-6</b>		
S. Korea	Korea Atomic Energy Research Institute	49

Таблица 3

## Организации, исследующие сплавы циркония с примесью олова и ниобия

Страна	Наименование организации	Кол-во работ
1	2	3
<b>E635</b>		
Russia	Research Institute of Atomic Reactors, Dimitrovgrad	11
	Bochvar High-Technology Research Inst. Inorganic Materials, Moscow	10
S. Korea	Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon	7
<b>Zirlo</b>		
S. Korea	Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon	85
	Kepco Nuclear Fuel Company Ltd., Daejeon	10
	Kyunghye University, Dept. of Nuclear Engineering, Yongin	8
	Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon	5
Japan	Japan Atomic Energy Agency, Nuclear Safety Research Center, Tokai	12
USA	Westinghouse Electric Company, Columbia	10
France	Electricite de France, SEPTEN, Villeurbanne	9
	OECD, Nuclear Energy Agency	7
	Ecole Nationale Superieure des Mines de Paris, Paris	7
	Institut de Radioprotection et Surete Nucleaire, Cadarache	6

1	2	3
<b>Zirlo</b>		
Sweden	Westinghouse Electric Co., Vaesteraas	8
Brazil	Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares, Sao Paulo	8
Switzerland	Swiss Fedral Nuclear Safety Inspectorate, Brugg	6
Germany	Karlsruhe Institute of Technology	6
Spain	Departamento Ciencia de los Materiales, UPM, E.T.S.I. Caminos, Madrid	5
UK	Department of Materials, University of Oxford	5
Norway	Institutt for energiteknikk, OECD Halden Reactor Project, Halden	5
<b>NDA</b>		
S.Korea	Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon	40
France	OECD, Nuclear Energy Agency	19
	Commissariat a l'energie atomique et aux energies alternatives, Saclay	12
	AREVA, Paris	11
Japan	Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki	17
Sweden	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm	5
Finland	Helsinki University	5
<b>MDA</b>		
S.Korea	Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon	14
Japan	Japan Atomic Energy Agency, Tokai	13
	Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Kobe	7
France	OECD, Nuclear Energy Agency	8
<b>HANA-4</b>		
S.Korea	Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon	110
	Kepeco Nuclear Fuel Company Ltd., Daejeon	17
Slovakia	Comenius University, Bratislava	6
France	Universite de Grenoble	6

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее активная фаза разработок и исследований всех рассматриваемых в нашей статье сплавов циркония в основном относятся к более раннему периоду времени.

Проведенные аналитические исследования информационных документов, введенных в последнее десятилетие в БД INIS, позволили установить следующее.

1. Основными центрами по изучению сплавов с оловом Zircaloy-2 и Zircaloy-4 являются следующие организации

2. Основными центрами по изучению сплавов с ниобием являются: для сплава E110 – NSC

По сплаву Zr97Nb3 – Institute for Nuclear Research (Romania).

По сплаву M5 – Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon; Institut de Radioprotection et Surete Nucleaire, Cadarache (France); Nuclear Materials Department, Research Centre de Saclay; AREVA-FRAMATOME ANP, an AREVA and Siemens Company, Lyon (France); Japan Atomic Energy Agency.

По сплаву HANA-6 – Korea Atomic Energy Research Institute.

3. Основными центрами в последнее десятилетие по изучению сплавов с оловом и ниобием являются: по сплаву E635 – Research Institute of Atomic Reactors, Dimitrovgrad; Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow (Russia).

По сплаву Zirlo – Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon. По сплаву NDA – Korea Atomic Energy Research Institute; Japan Atomic Energy Agency, Tokai. По сплаву MDA – Korea Atomic Energy Research Institute; Japan Atomic Energy Agency, Tokai. По сплаву HANA-4 – Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon.

Авторы признательны К.В. Ковтуну за обсуждение.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.Г. Шепелев, Ю.П. Курило, О.В. Кривченко, Л.Д. Юрченко. Динамика информационных потоков в БД INIS по сплавам циркония для активных зон ядерных реакторов // *ВАНТ. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2016, №1(101), с. 102-107.

*Статья поступила в редакцию 24.03.2016 г.*

## **ОСНОВНІ ЦЕНТРИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИРКОНІЄВИХ СПЛАВІВ ОСТАНЬОГО ДЕСЯТИЛІТТЯ**

*О.В. Кривченко, В.А. Дерев'янку, Л.Д. Юрченко, А.Г. Шепелев, Ю.П. Курило*

Розглянуто аналіз Міжнародної бази даних МАГАТЕ INIS, який дозволив визначити основні центри усіх країн, що беруть участь в останнє десятиліття в дослідженні цирконієвих сплавів, що більше всього застосовуються для найпоширеніших атомних реакторів водо-водяного типу.

## **BASIC ZIRCONIUM ALLOYS RESEARCH CENTRES IN THE LAST DECADE**

*O.V. Krivchenko, V.A. Derevianko, L.D. Yurchenko, A.G. Shepelev, Y.P. Kurilo*

The paper is analyzed the International Data Base of the IAEA INIS, which allowed to identify the main centers of all countries participating in the last decade in the research the most used zirconium alloys for nuclear reactors, the most common water-cooled type.