



ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТОПЛИВА U-10%Zr

Фролова М.Ю. (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»)
Чесноков Е.А., Курина И.С. (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»)

*Молодежная научно-практическая конференция
«Материалы и технологии в атомной энергетике»*

23-24.06.2021

Содержание

1. Металлическое топливо U-Zr. Применение.
2. Разработка в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» технологии изготовления способом индукционной плавки и литья топливного сплава U-10%Zr.
3. Исследование свойств топлива U–Zr:
 - плотность;
 - фазовый состав;
 - микроструктура;
 - теплопроводность.

Заключение.

Металлическое топливо

Металлическое топливо:

- сплавы U с металлическим разбавителем;
- сплавы Pu с металлическим разбавителем;
- сплавы смеси U и Pu с металлическим разбавителем;
- сплавы смеси U, Pu и МА с металлическим разбавителем.

Разбавители: различные металлы (Zr, Mo, Nb, Ti и др.).

К настоящему времени в мировой практике наиболее проработанной является композиция на основе сплава U-10%Zr.

Преимущества металлического топлива:

- высокая плотность ($\rho \alpha\text{-U} = 19,07 \text{ г/см}^3$);
- высокая теплопроводность;
- высокая производительность.

Быстрые реакторы с плотным металлическим топливом обладают наибольшей эффективностью.

Разработка технологии изготовления металлического топлива в ФЭИ

Технология включает следующие операции:

- Изготовление топливного сплава путём индукционной плавки.
- Производство топливных стержней путём литья в кварцевые ампулы.
- Извлечение отлитых стержней из кварцевых ампул.
- Термический отжиг отлитых стержней.
- Изготовление топливных блочков (для реакторных испытаний) и образцов (для исследования свойств) требуемых размеров путём точения стержней на токарном станке.
- Контроль топливных блочков и образцов.
- Газостатическое обжатие блочков с фальшоболочкой.
- Сборка твэлов.

Изготовление металлического топлива в ФЭИ

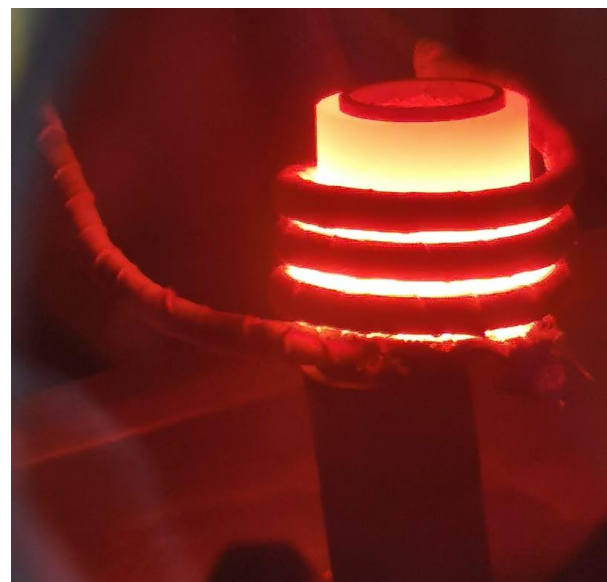


Электродпечь для плавки и литья металлического топлива в ФЭИ

Изготовление металлического топлива в ФЭИ



Шихта в тигле для литья.
Тигли – из НПО «Технология»



Плавка в индукционной печи



Блочки



Отлитые топливные стержни

Исследование свойств литого сплава U-10%Zr в ФЭИ

Проведены следующие исследования топливных образцов U-10%Zr:

- ✓ Определение плотности.
- ✓ Исследование фазового состава.
- ✓ Исследование микроструктуры.
- ✓ Исследование теплопроводности.
- ✓ Исследование ТКЛР.
- ✓ Изменение фазового состава при нагреве – ВДТА. Определение температур фазовых переходов.
- ✓ Исследование взаимодействия топлива U-Zr с конструкционными материалами.

В докладе приводятся не все результаты исследований.

Плотность и фазовый состав литого сплава U-10%Zr

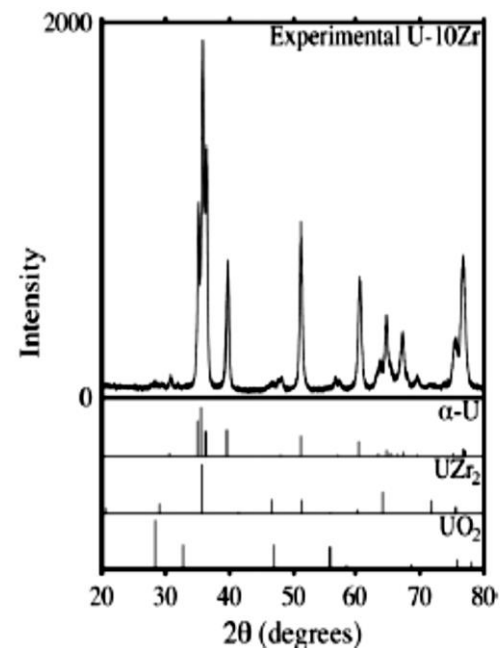
Таблица 1 – Средняя плотность и пористость топливного сплава U-10%Zr

Топливная композиция	Количество измеренных образцов	Средняя плотность, г/см ³	Средняя пористость общая, %	Средняя пористость открытая, %
U-Zr	33	16,0	0,76	0,24

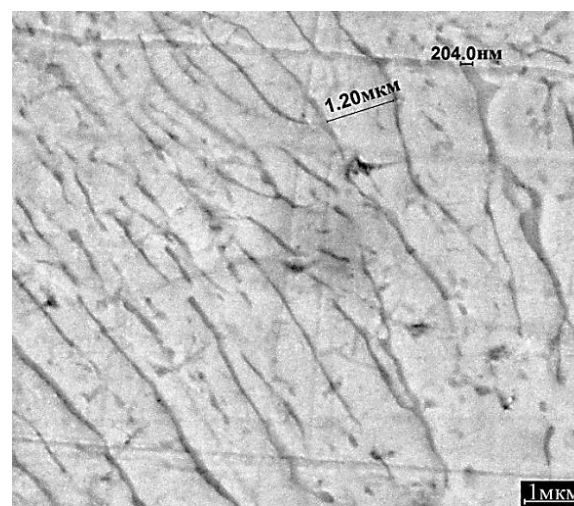
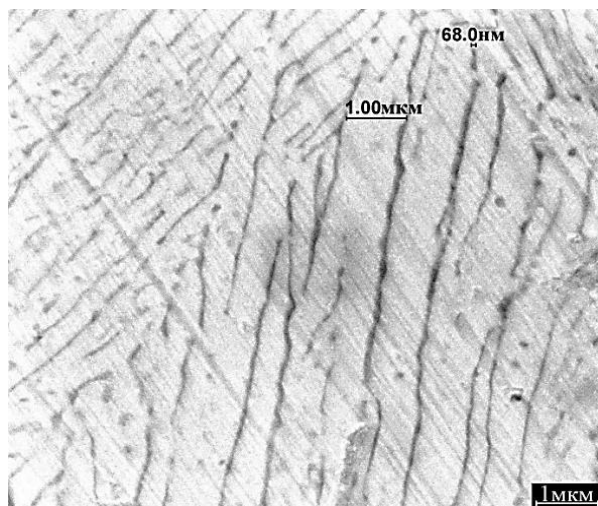
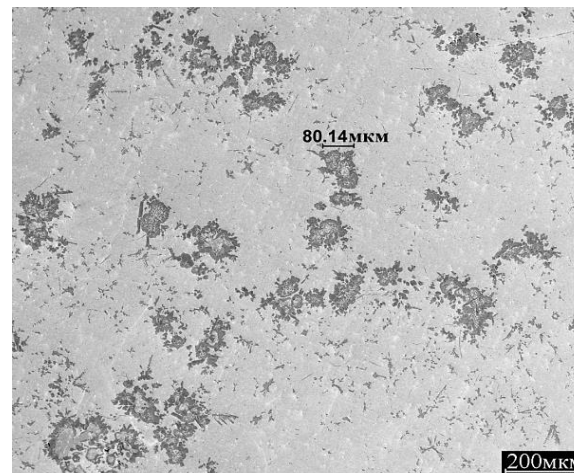
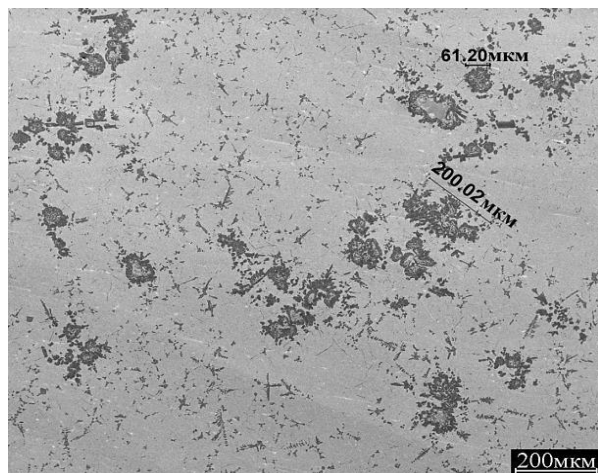
Таблица 2 – РФА топливного сплава U-10%Zr

	Фазы	Ячейка	Параметры кристаллической решетки (Å)		
			a	b	c
ФЭИ ($\pm 0,005\text{Å}$)	α -U	Орторомбическая	2,851	5,873	4,961
Литературные данные	α -U	Орторомбическая	2,854	5,870	4,956
	δ -UZr ₂	Гексагональная	5,030	5,030	3,080

В ФЭИ в сплаве U-10%Zr идентифицируется только α -U



СЭМ-исследование микроструктуры сплава U-10%Zr в ФЭИ

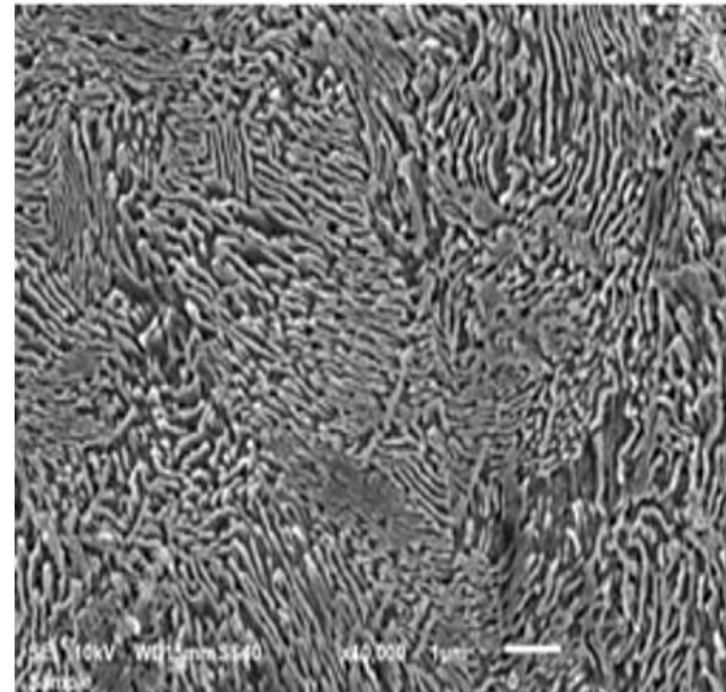
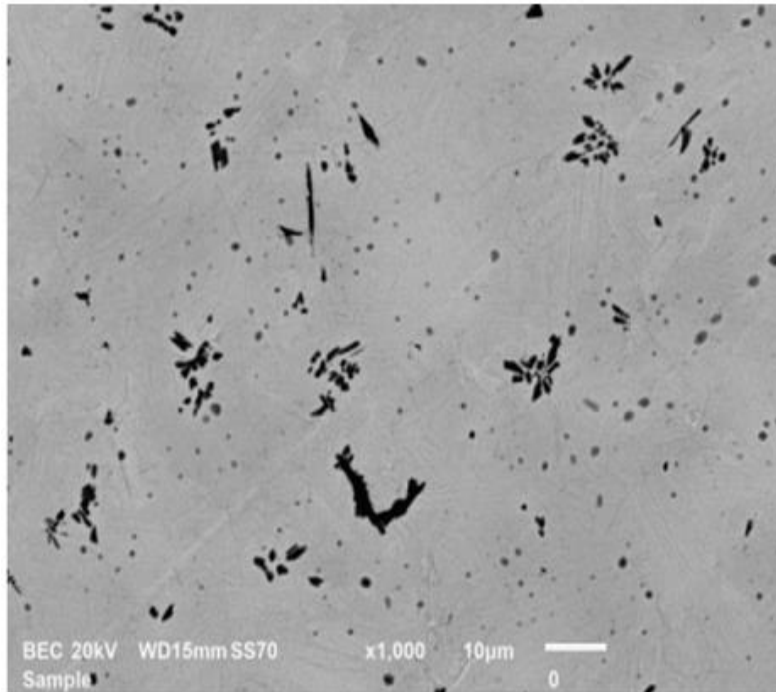


Поперечный шлиф

Продольный шлиф

Толщина пластинок δ -фазы колеблется в пределах от 50 до 200 нм.
Микротвёрдость сплава $H_{200} = 395$ (350-430) кгс/мм²

Микроструктура сплава U-10%Zr (литературные данные)

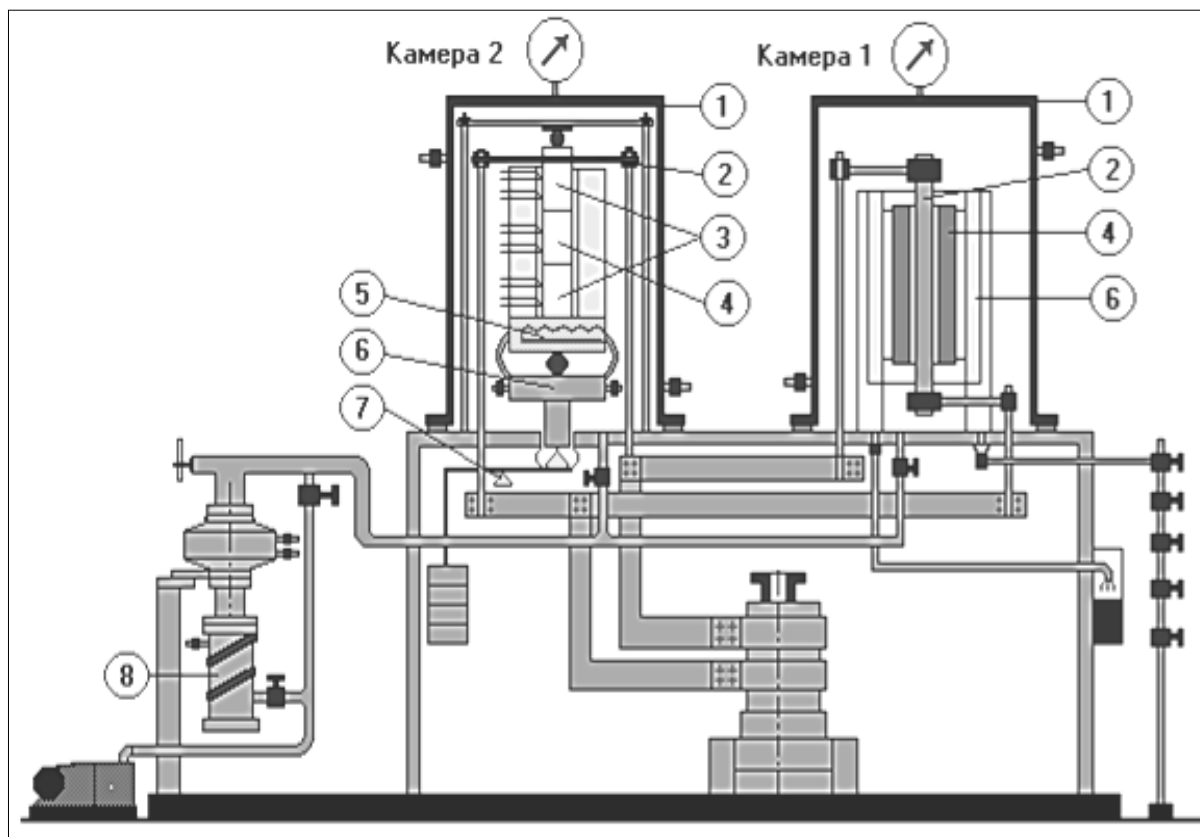


Дисперсные частицы размером около 5 мкм состоят из богатых цирконием фаз, таких как UZr_2 или Zr. Матрица имеет ламеллярную структуру с толщиной ламелей 200 нм.

Микротвёрдость сплава $H_{100} = 435$ кгс/мм².

[*Kim K.-H., Kim J.-H., Oh S.-J., Lee J.-W., Lee H.-J., Lee C.-B. Fabrication of U-10wt.%Zr metallic fuel rodlets for irradiation test in BOR-60 fast reactor. Science and Technology of Nuclear Installations, vol. 2016, Article ID 4385925, 7 p.*](#)

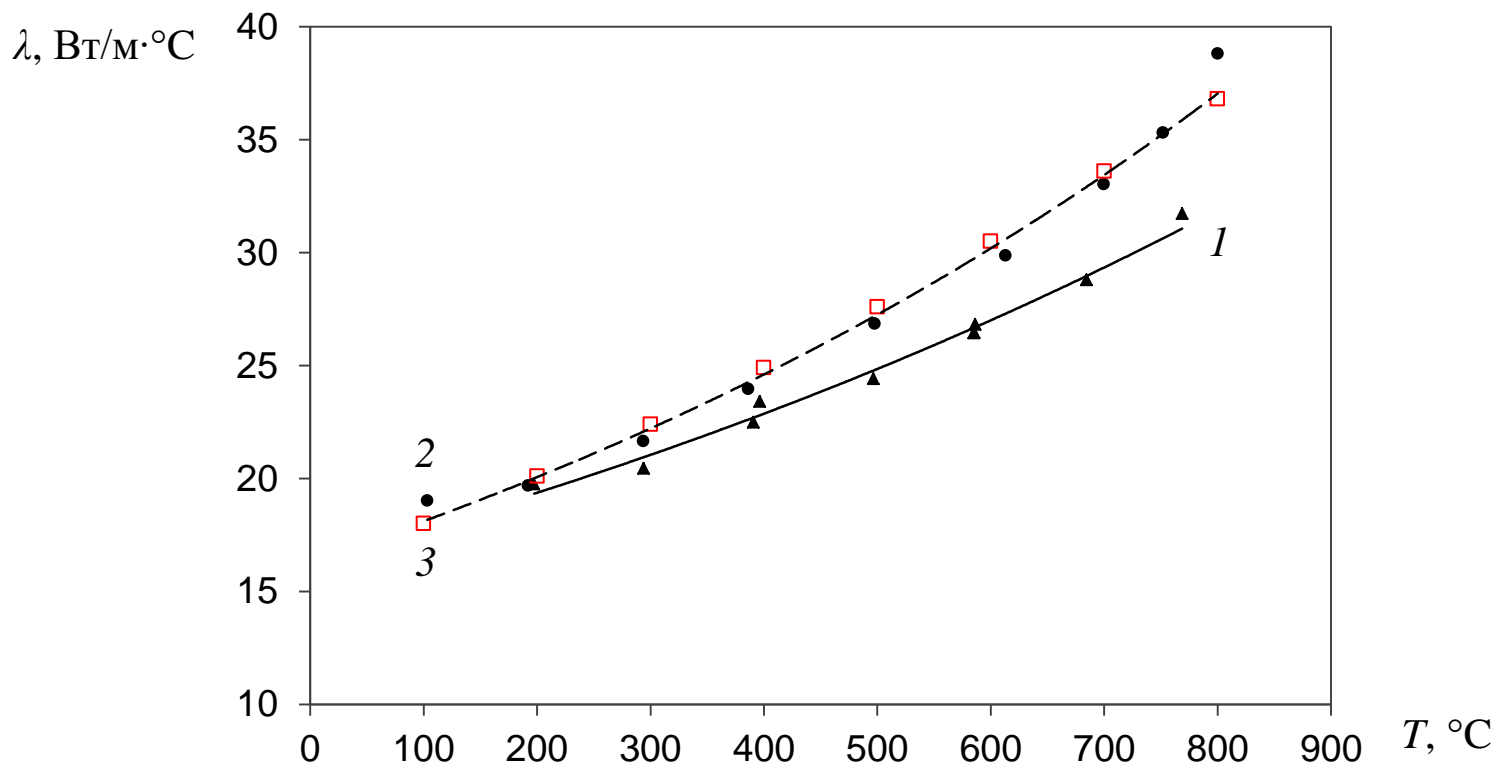
Измерение теплопроводности сплава U-10%Zr в ФЭИ



Установка для измерения теплопроводности

- 1 – герметичная камера; 2 – нагреватель;
- 3 – эталонные образцы; 4 – испытуемый образец; 5 – медный блок холодильника;
- 6 – водоохлаждаемые холодильники; 7 – рычажная система;
- 8 – диффузионный насос

Измерение теплопроводности сплава U-10%Zr в ФЭИ



Температурные зависимости сплава U-10%Zr :

- 1 – экструдированного (с плотностью 15,8 г/см³) – сплошная линия и треугольники,
- 2 – литого (с плотностью 16,0 г/см³) – пунктирная линия и кружки,
- 3 – данные из работы [Hofman G.L., Leibovitz L., Kramer J.M., Billone M.C., Koenig J.F. *Metallic Fuels Handbook. Report of Argonne National Laboratory, 1985, ANL-IFR-29*] – красные квадраты

Измерение теплопроводности сплава U-10%Zr в ФЭИ

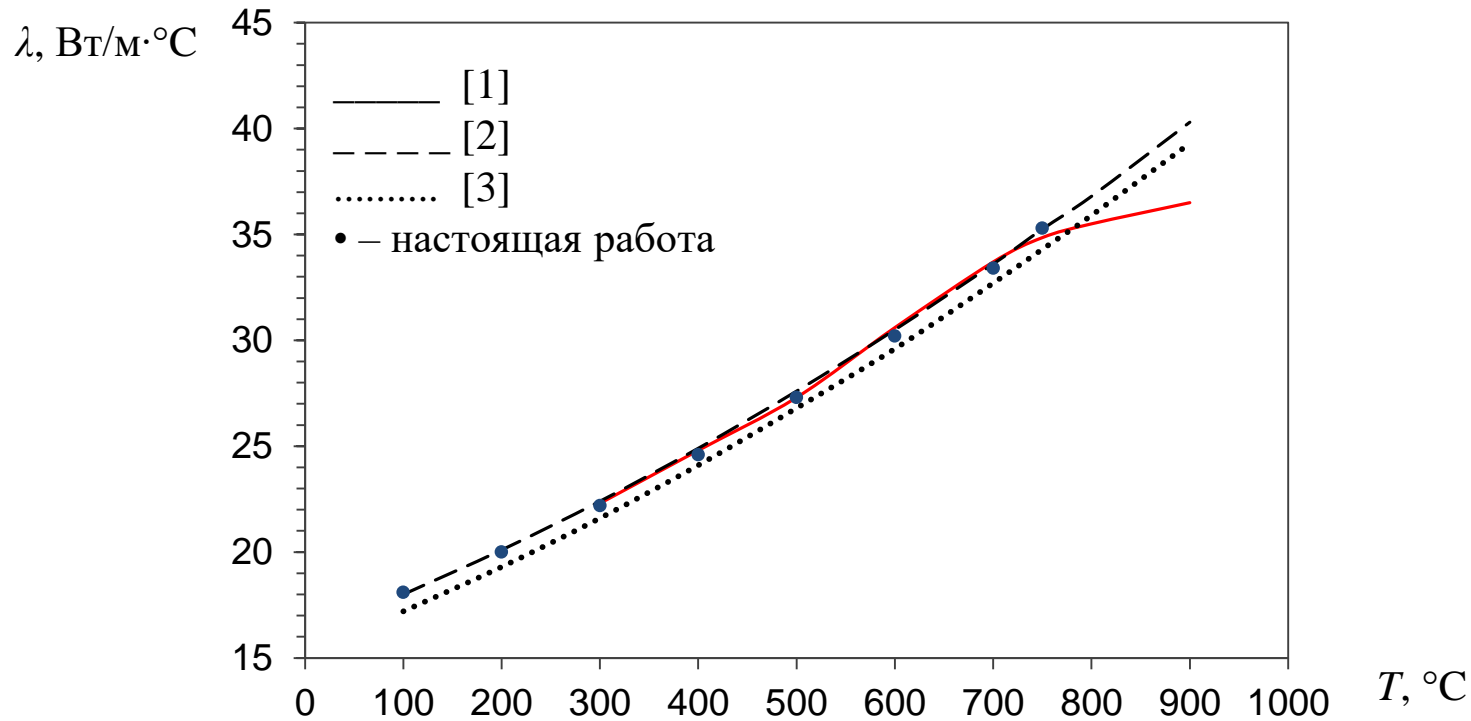
Таблица 3 – Теплопроводность топливного сплава U-10%Zr

Сплав	Выровненные коэффициенты теплопроводности, Вт/м·°С, в зависимости от температуры, °С:								
	100	200	300	400	500	600	700	750	800
Экструдированный (плотность = 15,8 г/см ³)	-	19,25	20,0	22,9	24,9	27,0	29,3	30,7	-
Литой (плотность = 16,0 г/см ³)	18,1	20,0	22,2	24,6	27,3	30,2	33,4	35,3	37
Литой сплав U-10%Zr [1]	18,0	20,1	22,4	24,9	27,6	30,5	33,6	35,4	36,8

[1] – Hofman G.L., Leibovitz L., Kramer J.M., Billone M.C., Koenig J.F. *Metallic Fuels Handbook. Report of Argonne National Laboratory, 1985, ANL-IFR-29.*

Метод осевого теплового потока обладает достаточно высокой точностью при измерениях до температуры 750 °С. При дальнейшем повышении температуры происходят процессы, приводящие к ошибке измерений: размягчение сплава U-10%Zr и сцепление смежных поверхностей испытуемого и эталонного образцов.

Исследование теплопроводности сплава U-10%Zr



Температурные зависимости теплопроводности сплавов:

- U-10мас.%Zr [1] – пунктирная линия; U-11,4мас.%Zr [2] – точечная линия;
U-11,4мас.%Zr [3] – сплошная красная линия (метод осевого теплового потока);
U-10мас.%Zr – кружки (настоящая работа, метод осевого теплового потока)

[1] – Steindler M.J. et al. Chemical Technology Division Annual Technical Report for 1986.

Report of Argonne National Laboratory, 1987, ANL-87-19.

[2] – Hofman G.L. et al. Metallic Fuels Handbook. *Report of Argonne National Laboratory, 1985, ANL-IFR-29.*

[3] – Hofman G.L. et al. Metallic Fuels Handbook. *Report of Argonne National Laboratory, 2019, ANL-NSE-3.*

Заключение

1. Разработана технология изготовления способом индукционной плавки и литья топливного сплава U-10%Zr.
 2. Исследованы основные свойства топлива U-10%Zr (плотность, фазовый состав, микроструктура, теплопроводность).
- ✓ Усреднённая плотность литого сплава составила 16,0 г/см³.
 - ✓ Рентгенофазовым анализом в сплаве обнаружена только орторомбическая фаза α -U.
 - ✓ С помощью сканирующего электронного микроскопа установлено, что основную часть объёма металлической матрицы занимает α -U. В матрице присутствуют также выделения δ -фазы в виде тонких одинаково ориентированных пластинок значительной протяжённости.
 - ✓ Методом осевого теплового потока при температурах от 100 до 800 °C исследована теплопроводность сплава U-10%Zr, полученного литьём под давлением (с плотностью 16,0 г/см³) и экструзией (с плотностью 15,8 г/см³). Теплопроводность для экструдированного сплава U-10%Zr при 600-750 °C значительно ниже, чем для литого, причём с увеличением температуры от начала измерений до 750 °C расхождение в значениях увеличивается. Проведено сравнение полученных данных с результатами опубликованных работ. Измеренная теплопроводность литого сплава U-10%Zr до температуры 750 °C не расходится с литературными данными.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ