

Филиал
«ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ»
Республиканского государственного предприятия
на праве хозяйственного ведения
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН»
МИНИСТЕРСТВА ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

УДК 620.172

Даулетханов Ерхат Даулетханулы

**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА СПЛАВА ЦИРКОНИЯ
Э125 В ЗОНЕ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**Работа, представленная на XIX конференцию-конкурс НИОКР
молодых ученых и специалистов**

Национального ядерного центра Республики Казахстан
(прикладные исследования)

Руководитель: Сапатаев Ержан Ернатулы, PhD,
начальник лаборатории радиационного материаловедения

Курчатов 2020

АВТОР

Даулетханов Ерхат Даулетханулы

инженер лаборатории радиационного материаловедения,

Институт Атомной Энергии НЯЦ РК

1992 года рождения,

образование послевузовское (НИ ТПУ в 2018 г.)

специальность — «Физика конденсированного состояния»,

квалификация по диплому — магистр естественных наук по специальности «Физика

конденсированного состояния,

работает в ИАЭ НЯЦ РК с января 2019 г.,

общий стаж работы 1.5 года

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Начальник лаборатории

радиационного материаловедения



10.04

Сапатаев Е.Е.

подпись, дата

Инженер лаборатории

радиационного материаловедения



10.04

Уркунбай А.С.

подпись, дата

Инженер лаборатории

радиационного материаловедения



10.04

Даулетханов Е.Д.

подпись, дата

РЕФЕРАТ

Конкурсная работа содержит 18 с., 10 рис., 4 табл., 9 источника.

Актуальность:

Циркониевые сплавы широко используются в качестве конструкционных материалов изделий активных зон (АЗ) ядерных энергетических установок (ЯЭУ), которые эксплуатируются в жестких условиях воздействия облучения, высоких температур, тепловых и механических нагрузок, теплоносителя и других неблагоприятных факторов. Стойкость к этим воздействиям в значительной степени определяет работоспособность активной зоны в целом. По этой причине изучение эксплуатационных свойств этих сплавов при воздействии агрессивных сред и высоких температур, а также проблема предотвращения разрушения оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) при условиях аварии с потерей теплоносителя является важнейшей задачей материаловедения в области циркониевых сплавов для атомной энергетики. В связи с этим, исследования прочностных характеристик при температурно-силовых воздействиях на свойства циркониевых сплавов является актуальным направлением исследований.

Объектом исследования: Объектом исследования являются фрагменты листового материала сплава циркония марки Э125.

Цель работы: Оценка изменения прочностных характеристик материала циркониевого сплава Э125 после локального термического воздействия.

Задачи исследования:

- изготовление образцов для термического испытания;
- проведение термического воздействия аргонодуговым способом при различных режимах;
- оценка профиля в участке термического воздействия;
- определение твердости в участке термического воздействия;
- изготовление испытательных образцов;
- механическое испытание образцов;
- анализ и обобщение результатов.

Методика исследования:

Для определения прочностных характеристик были проведены механические испытания при комнатной температуре на универсальной испытательной машине Tinius Olsen 50ST требованиям ГОСТ 1497-84. Определение распределения твердости по Виккерсу на автоматическом твердомере Qness Q10A+ согласно ГОСТ ИСО 6507. Методы визуального и измерительного контроля пятна термического воздействия.

Результаты работы:

В работе приведены результаты механических испытаний по определению изменений прочностных характеристик материала циркониевого сплава Э125 после локального термического воздействия. Определены зависимости прочностных характеристик материала сплава Э125 от твердости. Определены максимальные и минимальные значения прочности в зонах оплавления и термического воздействия. Выполнена оценка изменения геометрических параметров и твердости пятна термического воздействия от режимов дугового воздействия и условий последующего охлаждения.

Научная новизна: Получены результаты прочностных характеристик циркониевого сплава Э125 после термического воздействия при различных режимах. Установлена зависимость прочностных характеристик от твердости.

Практическая значимость: Полученные данные по прочностным характеристикам сплава циркония Э125 после локального термического воздействия могут быть применены для обоснования работоспособности циркониевых сплавов в условиях температурно-силовых воздействий.

Личный вклад автора: Личный вклад автора состоит в проведении механических испытаний на растяжение, определение распределения твердости образцов циркониевого сплава Э125 после локального термического воздействия. А так же непосредственное участие в анализе полученных результатов.

Степень завершенности работы: работа полностью завершена.

Уровень конкурентоспособности: В радиационном материаловедении и радиационной физике твердого тела накоплен значительный фактический материал по эволюции структуры и изменению прочностных характеристик циркония и его сплавов под действием облучения. Работы по исследованию прочностных характеристик циркониевых сплавов при воздействии агрессивных сред и высоких температур, а также проблема предотвращения разрушения оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) при условиях аварии с потерей теплоносителя не так много. Поэтому исследование прочностных характеристик циркониевых сплавов после термического воздействия остается важной и актуальной задачей в прикладном направлении.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ

АЗ — активная зона;
ЯЭУ — ядерные энергетические установки;
ТВС — тепловыделяющая сборка;
ТВЭЛ — тепловыделяющий элемент.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1. Объект и методика исследования.....	8
1.1. Объект исследования.....	8
1.2. Методика исследований.....	8
1.2.1. Термическое испытание.....	8
1.2.2. Визуальный и измерительный контроль в участке термического воздействия.....	8
1.2.3. Определение микротвердости	8
1.2.4. Изготовление испытательных образцов	8
1.2.5. Механические испытания на растяжение.....	8
2. Результаты и обсуждение	9
2.1. Результаты визуального и измерительного контроля в участке термического воздействия	9
2.2. Результаты определение профиля поверхности	10
2.3. Исследование твердости участка термического воздействия	11
2.4. Определение прочностных характеристик.....	12
2.5. Определения зависимости прочностных характеристик от твердости	13
2.6. Анализ и обобщение результатов	15
Заключение.....	17
Список использованных источников	18

ВВЕДЕНИЕ

Особое место в ядерной энергетике и ядерной промышленности занимает проблема создания и модернизации конструкционных материалов с оптимальной микроструктурой и высокими эксплуатационными свойствами [1]. Циркониевые сплавы широко используются в качестве конструкционных материалов изделий активных зон (АЗ) ядерных энергетических установок (ЯЭУ), которые эксплуатируются в жестких условиях воздействия облучения, высоких температур, тепловых и механических нагрузок, теплоносителя и других неблагоприятных факторов [2]. Стойкость к этим воздействиям в значительной степени определяет работоспособность активной зоны в целом.

Параметры эксплуатации компонентов активных зон ядерных реакторов регламентированы в соответствующих паспортах изделий. Вместе с тем продолжается поиск технологических и конструкторских решений по оптимизации параметров работы и повышению безопасности и экономичности энергетических и исследовательских реакторов. В частности, предусматривается существенно увеличить время эксплуатации и выгорание топлива в тепловыделяющих сборках (ТВС) при обеспечении безопасности работы эксплуатируемых ядерных реакторов в целом. Создание экономичных и безопасных ядерных реакторов, а также модернизация действующих ЯЭУ во многом зависят от выявляемых резервов работоспособности циркониевых сплавов, используемых в конструктивных элементах АЗ. Для определения этих резервов необходимо знать свойства изделий из циркониевых сплавов при различных условиях, имитирующих или моделирующих режимы эксплуатации действующих и усовершенствованных активных зон ЯЭУ, главным образом экстремальных температурных воздействиях при аварии с потерей теплоносителя. Авария приводит к нагреву до температур 900-1200°C и окислению, что после последующего резкого охлаждения приводит к охрупчиванию [3-5]. Получение таких сведений о циркониевых материалах при температурно-силовых воздействиях может не только повлиять на изменение регламентированных режимов работы изделий в ЯЭУ, но и в совокупности с другими аспектами реакторостроения инициировать работы по оптимизации технологии производства и конструирования АЗ [6-7]. По этой причине изучение эксплуатационных свойств этих сплавов при воздействии агрессивных сред и высоких температур, а также проблема предотвращения разрушения оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) при условиях аварии с потерей теплоносителя является важнейшей задачей материаловедения в области циркониевых сплавов для атомной энергетики.

Таким образом, исследования прочностных характеристик при температурно-силовых воздействиях на свойства циркониевых сплавов является актуальным направлением исследований. В связи с этим, целью данной работы является оценка изменения прочностных характеристик циркониевого сплава Zr-2,5Nb (марки Э125) после локального термического воздействия.

1. Объект и методика исследования

1.1. Объект исследования

Объектом исследования являются фрагменты листового материала сплава циркония марки Э125.

Для термического испытания были подготовлены образцы размерами 50×24×2 мм в количестве 6 шт. С целью идентификации на каждый образец была нанесена маркировка гравированием с указанием номера серий и порядкового номера. Максимальное отклонение фактических геометрических размеров от заданного не превышает 3 %.

1.2. Методика исследований

1.2.1. Термическое испытание

Суть термических испытаний образцов заключалась в локальном скоростном нагреве до плавления в течение 1÷2 с и охлаждение в различной среде (воздух, аргон и вода). Локальный нагрев осуществлялось с помощью аппарата для аргонодуговой сварки. В таблице 1 приведены параметры термического испытания образцов.

Таблица 1 — Параметры термического испытания образцов сплава Э125

№ образца	Сила тока, А	Время контакта, с	Среда остывания
3.1	200	1	Воздух
3.2	200	1	Аргон
3.3	300	1	Аргон
3.4	300	2	Аргон
3.5	300	2	Вода
3.6	300	1	Вода

1.2.2. Визуальный и измерительный контроль в участке термического воздействия

Фотография внешнего вида образцов после термических испытаний проводилась при помощи цифрового однообъективного зеркального фотоаппарата Canon EOS 1200D. Определение высоты профиля в зоне оплавления проводилось с помощью контактного профилометра Mitutoyo SJ-410 в режиме безопорного измерения.

1. 2.3. Определение микротвердости

Определение микротвердости по Виккерсу проводилось на автоматическом твердомере Q10A+ (Qness) при нагрузке на индентор 9,8 Н. Микротвердость определялась по ширине участка термического воздействия на обратной стороне образца. Количество измеряемых отпечатков на каждом образце составляло более 15 шт.

1. 2.4. Изготовление испытательных образцов

Для испытания на растяжение были подготовлены испытательные образцы в виде полосы номинальным размером (Д×Ш×Т) 50×5×1,5 мм, и отобраны так, чтобы зона оплавления была расположена посередине их рабочей части. С целью формирования равномерного распределения напряжений в образце при растяжении было произведено его утонение шлифовкой с лицевой и обратной сторон на основе данных по профилю высоты. Разделку образца выполняли на электроискровом станке типа 4531 без деформации и нагрева.

1. 2.5. Механические испытания на растяжение

Испытание на растяжение образцов сплава Э125 выполнялось на универсальной испытательной машине Tinius Olsen 50ST с построением диаграммы растяжения «напряжение-деформация». Испытание проводилось при постоянной скорости перемещения активного захвата 5 мм/мин.

Расчет прочностных и пластических характеристик осуществлялся в программной среде «Horizon» согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытание на растяжение»[8].

Предел прочности при сжатии ($\sigma_{сжi}$) рассчитывали по формуле:

$$\sigma_{растяж.} = \frac{P_i}{S} \quad (1)$$

где P — разрушающая нагрузка на образец, кН;

S — номинальная площадь поперечного сечения, мм².

Площадь поперечного сечения вычисляли по формуле:

$$S = b \times h, \quad (2)$$

где b — ширина образца, м;

h — толщина образца, м.

По результатам серий испытаний определяется погрешность величины предела прочности (доверительный интервал) по следующей формуле:

$$\Delta \overline{\sigma_{растяж.}} = t_{\alpha n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{\sigma_{растяж.}} - \sigma_{растяж.})^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

где, n — число измерений

$t_{\alpha n}$ — коэффициент Стьюдента ($\alpha=0,95$)

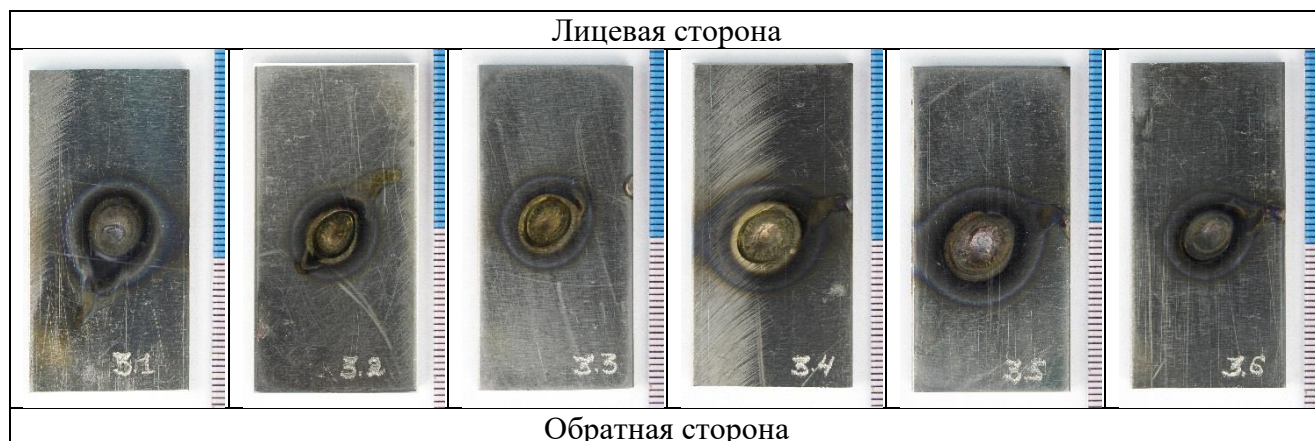
2. Результаты и обсуждение

2.1. Результаты визуального и измерительного контроля в участке термического воздействия

Фотография поверхности образцов и линейные размеры участка термического воздействия представлены на рисунке 1 и в таблице 2. Участок термического воздействия состоит из зоны оплавления и зоны термического влияния. Со стороны аргонодугового воздействия (лицевая сторона) в центре зоне оплавления образуется кратер, а по периферии выступ из вытесненного расплавленного материала. На обратной стороне образца также формируется зона оплавления меньшего размера в основном виде выступа.

К зоне термического влияния относится участок металла, не подвергшийся расплавлению, структура и свойства которого изменились в результате нагрева. На поверхности металла в зоне термического влияния формируются цвета побежалости.

Увеличение силы тока и длительности контакта дуги с поверхностью образцов приводит к увеличению линейных размеров оплавленного участка и зоны термического влияния.



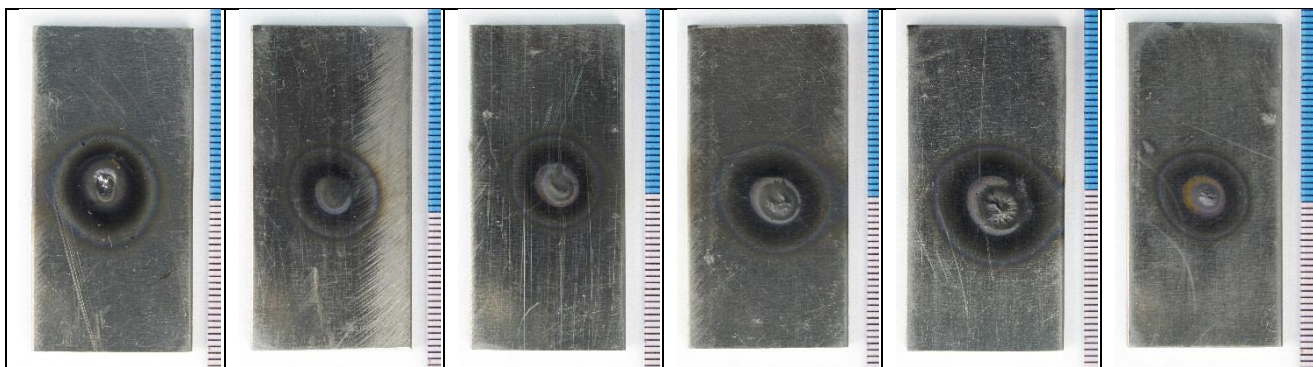


Рисунок 1 — Фотография внешнего вида образцов после термических испытаний

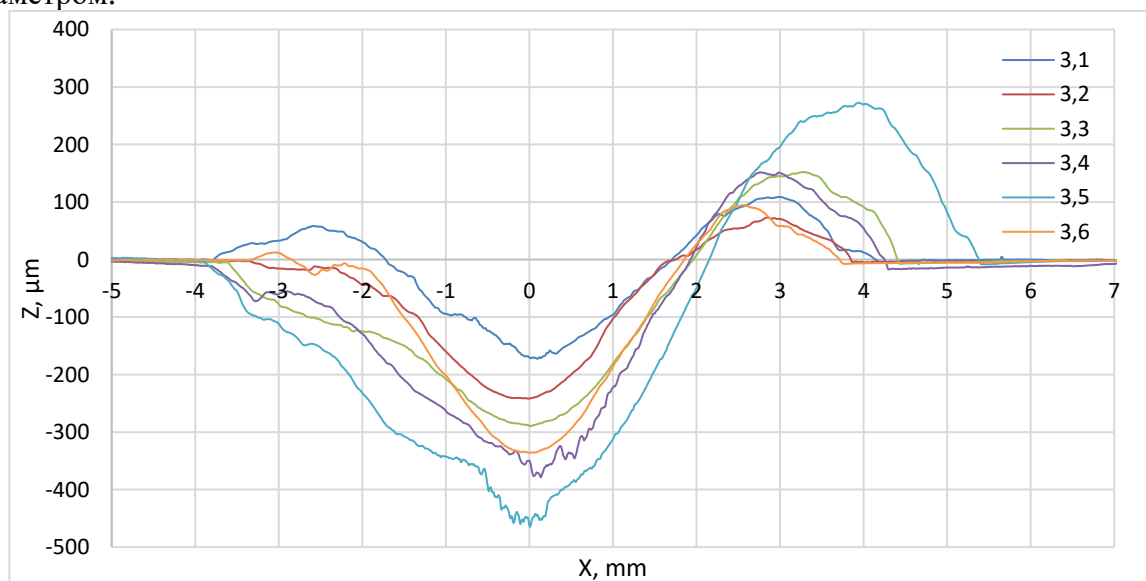
Таблица 2 — Геометрические параметры пятна термического воздействия

№ образца	Лицевая сторона		Обратная сторона	
	Диаметр оплавленного участка, мм	Ширина зоны термического влияния, мм	Диаметр оплавленного участка, мм	Ширина зоны термического влияния, мм
3.1	7,6	18,8	4,3	19,7
3.2	6,9	15,0	-	15,5
3.3	7,7	15,9	2,0	16,2
3.4	8,4	18,6	3,5	19,6
3.5	9,5	20,1	4,7	20,2
3.6	7,3	15,7	2,9	15,1

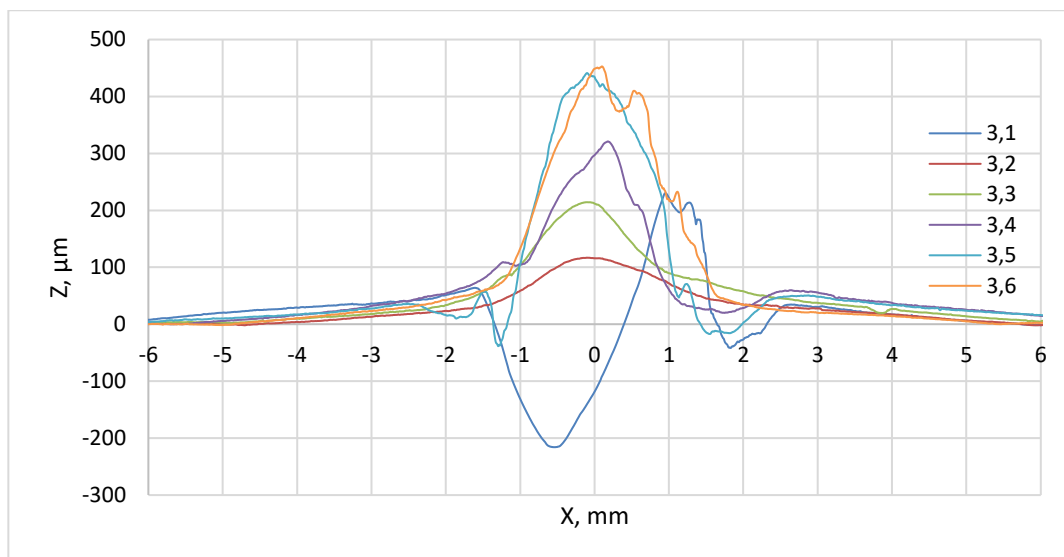
2.2. Результаты определение профиля поверхности

Определение высоты профиля в зоне оплавления проводилось с помощью контактного профилометра Mitutoyo SJ-410 в режиме безопорного измерения.

Распределение высоты профиля в зоне оплавления на лицевой и обратной сторонах образцов представлены на рисунке 2. Как видно из рисунков, с изменением параметров термического испытания изменяется размеры повреждаемых участков. С увеличением силы тока и время контакта, в центре зоне оплавления образуется кратера большей глубиной и диаметром.



а)



б)

Рисунок 2 — Распределение высоты профиля в зоне оплавления на лицевой (а) и обратной (б) сторонах образцов

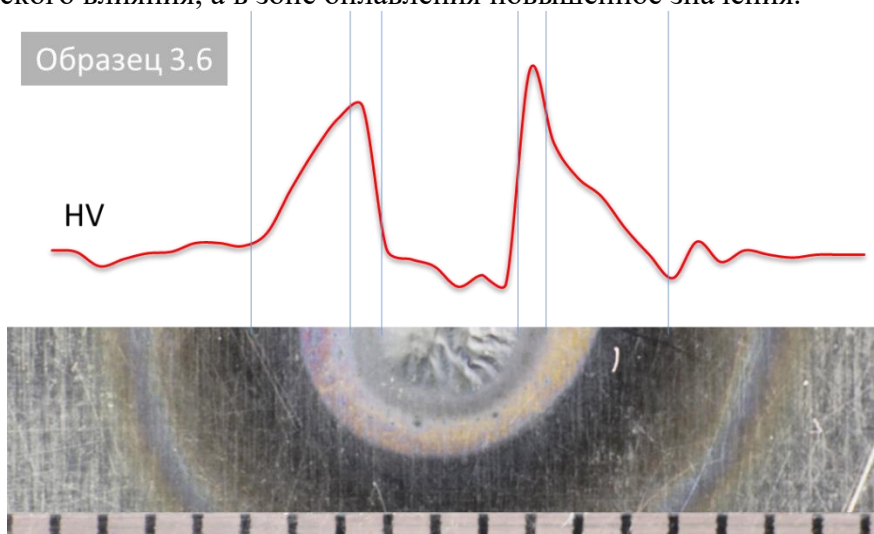
2.3. Исследование твердости участка термического воздействия

Определение твердости по ширине пятна термического воздействия осуществлялось на автоматическом твердомере Qness Q10A+ по методу Виккерса при нагрузке на индентор 9,8 Н. Измерение твердости выполнялось на обратной стороне образца. Перед измерением с поверхности были удалены выступы и слой окалины путем тонкого шлифования.

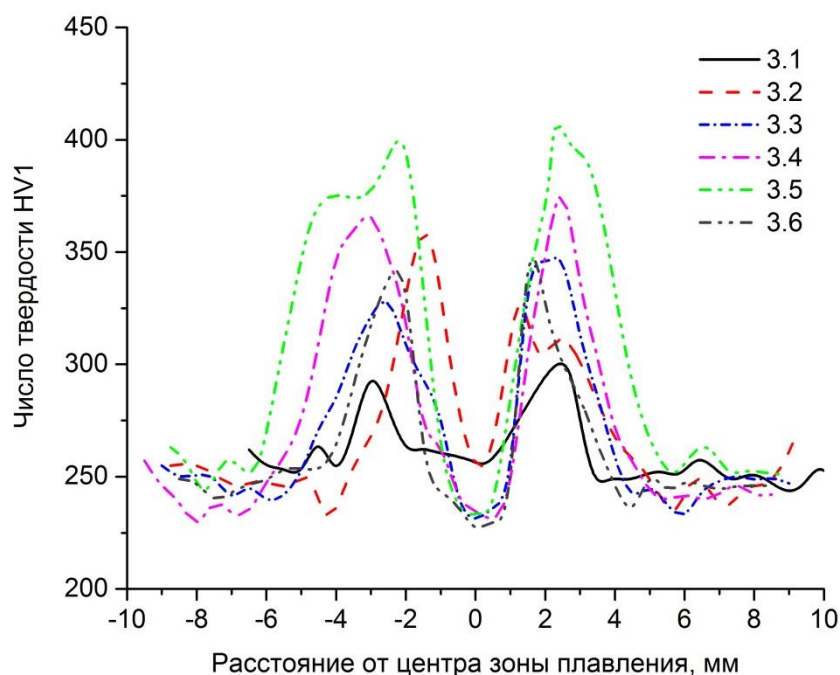
Не зависимо от параметров термического воздействия на всех образцах наблюдается заметное повышение твердости в переходной зоне между зоной оплавления и основным металлом. В образцах (3.4, 3.5), испытанных при повышенной силе тока дуги ($I=300$ А) наблюдается заметное повышение твердости в переходной зоне между зоной оплавления и основным металлом, в зоне оплавления снижение твердости.

Характер распределения твердости коррелирует с линейными параметрами пятна термического воздействия. Охлаждение в воде после термического воздействия способствует повышению максимального значения твердости на 5-10% по сравнению с охлаждением в потоке аргона.

Образец охлажденный (3.1) в воздухе после термического воздействия по сравнению с образцами охлажденными в воде и потоке аргона, имеет заниженное значение твердости в зоне термического влияния, а в зоне оплавления повышенное значения.



а)



б)

Рисунок 3 – Распределение твердости по ширине пятна термического воздействия

2.4. Определение прочностных характеристик

На рисунке 4 и в таблице 3 представлены результаты механических испытаний на растяжение образцов сплава Э125 в исходном и после термических воздействиях. Во всех образцах после термического воздействия разрушение происходит на границе зоны термического воздействия с основным металлом. А пятно термического воздействия практически не деформируется, что подтверждает его высокие прочностные характеристики. Предел прочности образцов практически не изменяется. Лишь относительное удлинение уменьшается на 10-17% по сравнению с исходным материалом.

Таблица 3 – Механические свойства материала сплава Э125 до и после термических испытаний

Усл. название образцов	Предел прочности (σ_B), МПа	Предел текучести ($\sigma_{0,2}$), МПа	Отн. удлинение (δ_5), отн.ед.
Э125 3 Исх.	631	555	0,284
3.1	649	585	0,253
3.2	639	578	0,248
3.3	653	595	0,240
3.4	634	566	0,257
3.5	628	564	0,241
3.6	632	562	0,236

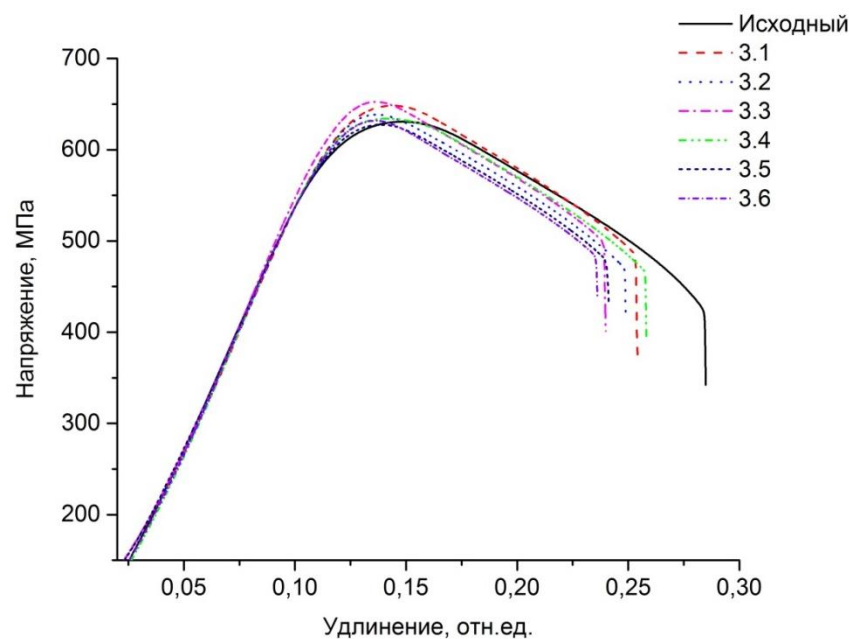


Рисунок 4 – Диаграмма растяжения материала сплава Э125 после термического воздействия

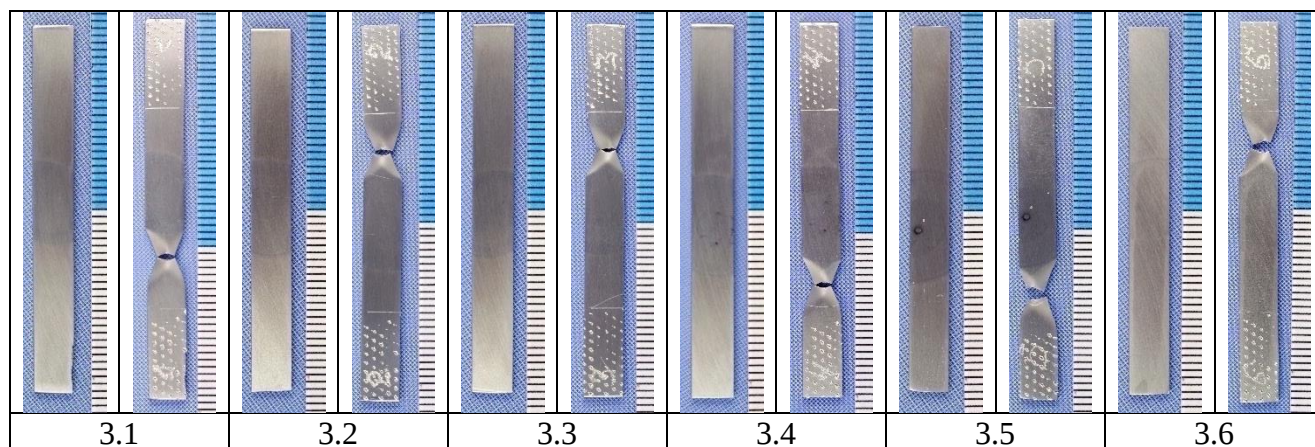


Рисунок 5 – Фотография внешнего вида испытательных образцов до и после разрушения

2.5. Определения зависимости прочностных характеристик от твердости

Так как все образцы при механических испытаниях разрушаются на границах зоны термического влияния с основным материалом, не предоставляется возможным определить прочностные характеристики в зонах оплавления и термического влияния. Поэтому дополнительно были проведены термические испытания в интервале температур от 600 до 1100 °С для определения зависимости прочностных характеристик от твердости.

Из фрагментов листового материала сплава Э125 были изготовлены плоские образцы (тип II по ГОСТ 11701-84) для испытания на растяжение с расчетной длиной 25 мм. Разделка фрагментов осуществлялась на ленточнопильном и электроискровом станках.

Суть термических испытаний образцов заключалась в быстром нагреве, выдержке при заданной температуре в течение 10 минут (от 600°С до 1100°С с шагом 100°С) и охлаждении в воде.

После термических испытаний были определены прочностные характеристики и твердость образцов циркониевого сплава Э125.

Определение твердости после термических воздействии в диапазоне температур от 600 до 1100 °С осуществлялось на автоматическом твердомере Qness Q60A+ по методу Бринелля при нагрузке на индентор 300 Н. В результате термообработки при температуре 600°С

наблюдается резкое снижение твердости по сравнению с исходным (без термического испытания) состоянием. Дальнейшее увеличение температуры испытания приводит к заметному увеличению твердости (см. рис.6).

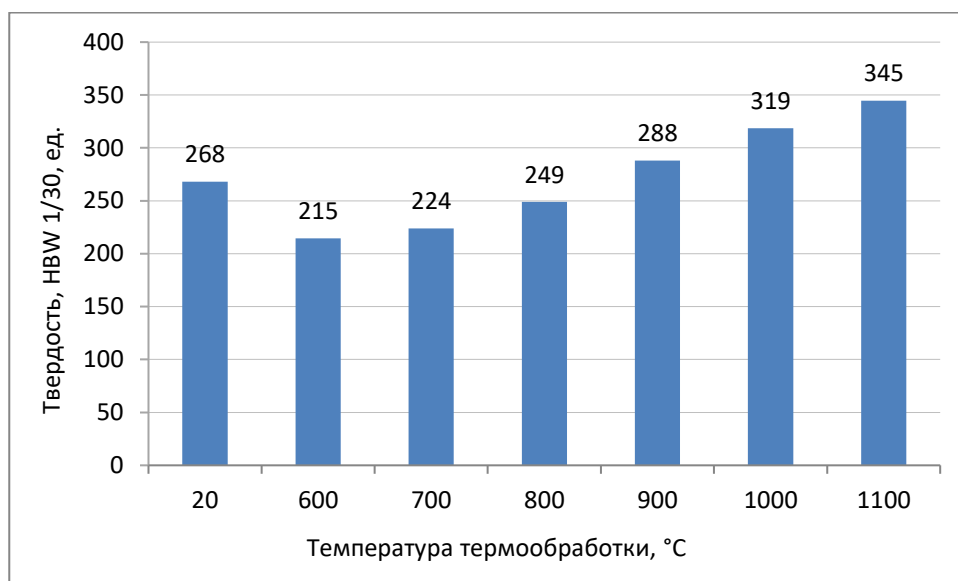


Рисунок 6 – Зависимость изменение твердости от температуры термического испытания

Испытание на растяжение проводилось при постоянной скорости перемещения активного захвата 5 мм/мин. На рисунке 7 представлена условная диаграмма растяжения в исходном состоянии и после термических воздействии при различных температурах.

В исходном состоянии материал листового проката сплава Э125 имеет значительную прочность и низкую пластичность (см. таблицу 4).

В результате нагрева и быстрого охлаждения при температуре 600 °C наблюдается резкое снижение прочности и повышение пластичности по сравнению с исходным (без термического испытания) состоянием. Дальнейшее увеличение температуры испытания до 900 °C приводит к заметному упрочнению и охрупчиванию материала сплава Э125. В интервале температур испытания от 900°C до 1100°C в материале сплава практически сохраняются прочностные и пластические характеристики (см. рис.8).

Таблица 4 – Механические свойства материала сплава Э125 до и после термических испытаний

Усл. название образцов	Температура испытания, °C	Предел прочности (σ_b), МПа	Предел текучести ($\sigma_{0,05}$), МПа	Отн. удлинение (δ_5), %	Отн. сужение (ψ), %
Э125-1, 2	До испытания	654	424	15,7	28
Э125-3	600	425	411	41,1	62
Э125-4	700	498	436	32	51
Э125-5	800	613	399	3,8	28
Э125-6	900	789	553	2,4	9
Э125-7	1000	755	554	1,6	5
Э125-8	1100	744	639	1,3	0

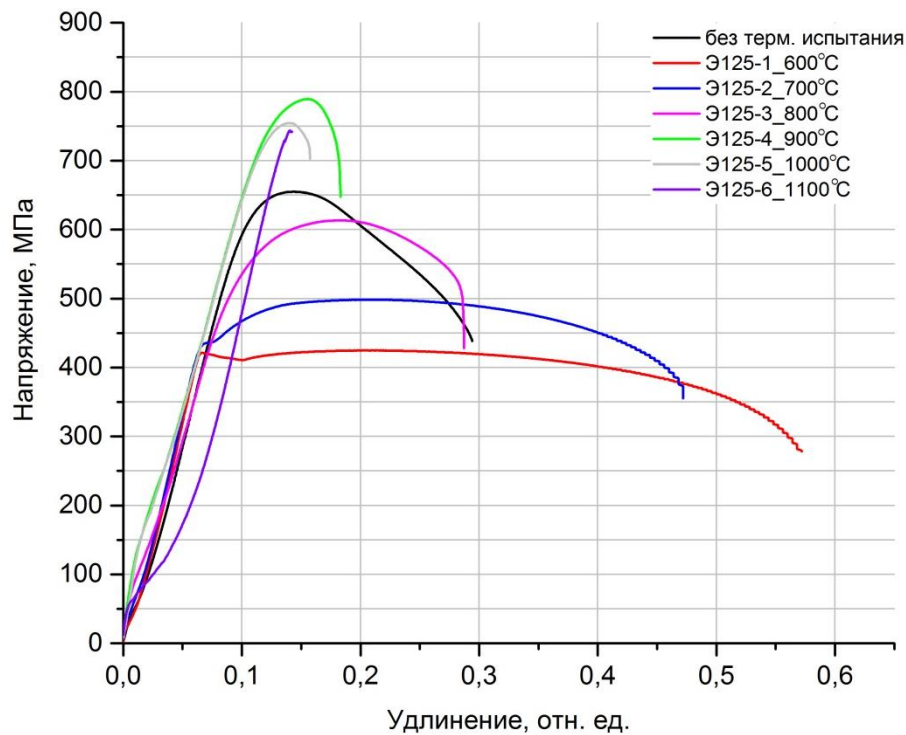


Рисунок 7 – Условная диаграмма растяжения материала сплава Э125 после термического воздействия

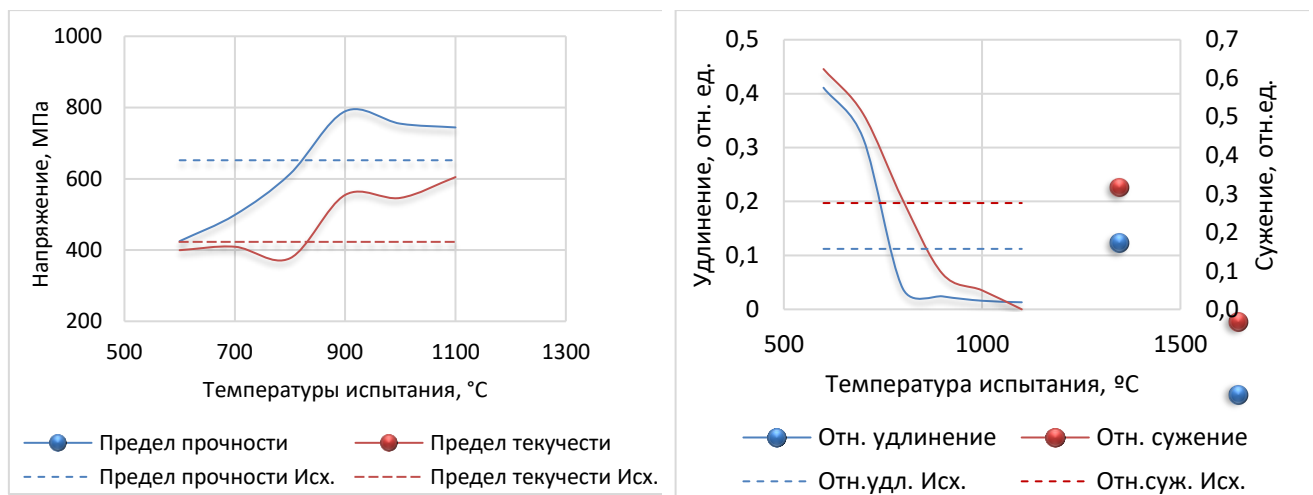


Рисунок 8 – Зависимости изменения механических свойств от температуры термического испытания

2.6. Анализ и обобщение результатов

В результате анализа данных по прочностным характеристикам и твердости сплава Э125 после термообработки в интервале температуры 600-1100°C выявлено хорошее корреляционное соотношение (см. рис. 9) между твердостью (HV) и пределом текучести (σ_T) с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0,82$:

$$\sigma_{0,2} = 1,7551 \cdot HV + 9,784, \quad (4)$$

Также существует линейная зависимость (5) между твердостью и пределом прочностью (σ_B) в узком интервале твердости 220÷290 HV.

$$\sigma_B = 4,5972 \cdot HV - 547,56 \quad (5)$$

При «экстремальных» условиях термического воздействия (образец №3.5) максимальная твердость в зоне термического влияния достигает 417 HV 1, а применяя вышеприведенное соотношение (4) предел текучести может составить 742 МПа. При этом,

минимальное значение твердости 224 HV1 зафиксировано в зоне оплавления образца № 3.6, где прочностные характеристики соответствуют $\sigma_{0,2}=403$ МПа и $\sigma_B=517$ МПа. Также применяя выше приведенную формулу (5) были определены прочностные характеристики по характерным зонам после термического воздействия (см. рис.10). Как видно из рисунка, прочность оплавленной зоны по сравнению зоной термического влияния имеет пониженное значение. Зона термического влияния обладает более высокие прочностные характеристики, так как при нагреве и охлаждении на этом участке образуется мелкозернистая структура.

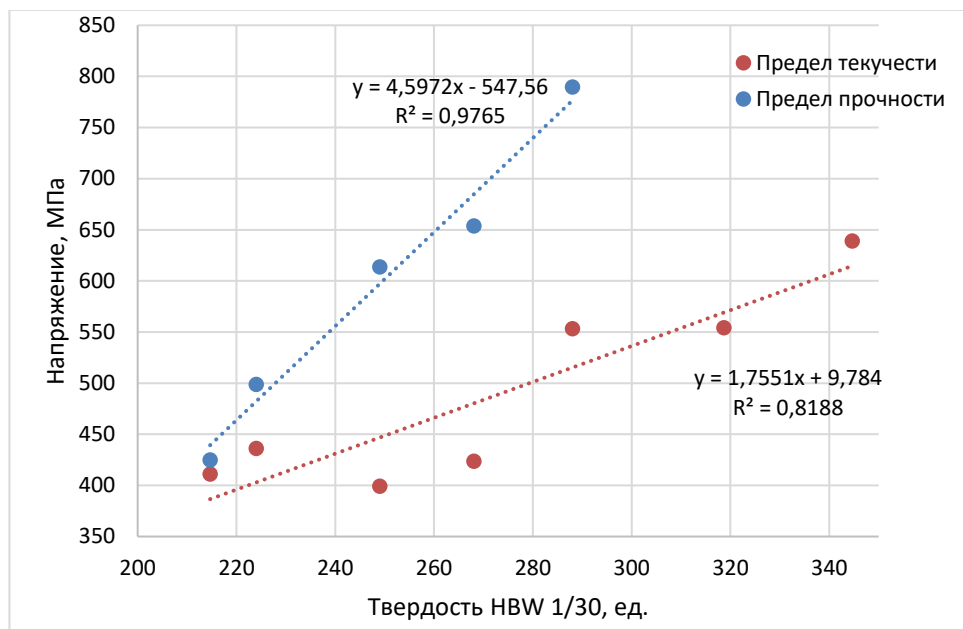


Рисунок 9 – Соотношение между твердостью и пределом текучести сплава циркония Э125 в термообработанном состоянии

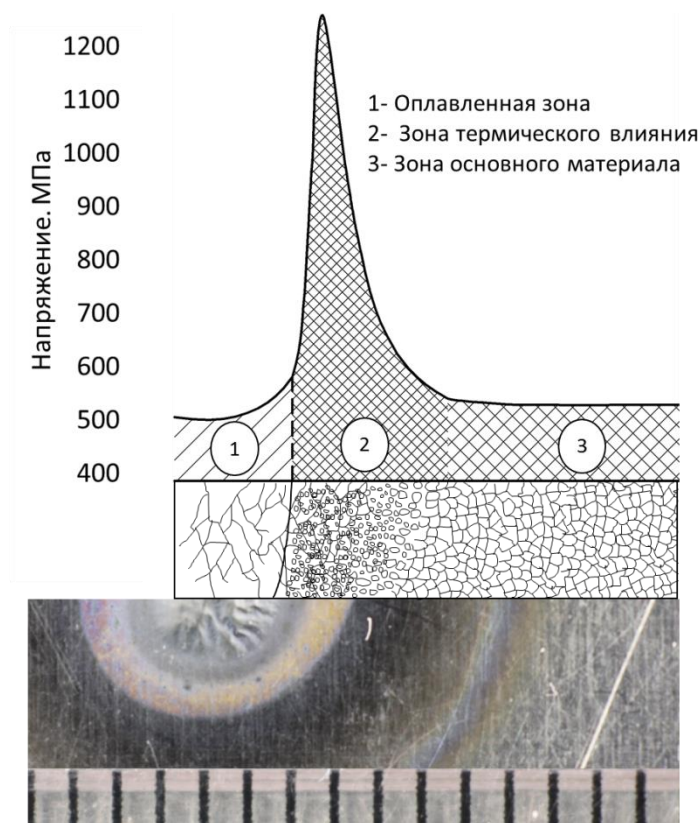


Рисунок 10 – Изменения прочности по характерным зонам термического воздействия

Заключение

В результате определения прочностных характеристик циркониевого сплава Э125 после термического воздействия при различных режимах можно сделать следующие выводы:

- Обнаружено что, после локального термического воздействия при различных параметрах испытания формируется зона оплавления и зоны термического воздействия.

- Не зависимо от параметров термического воздействия на всех образцах наблюдается заметное повышение твердости в переходной зоне, между зоной оплавления и основным металлом, тогда как в зоне оплавления зафиксирована снижение твердости по сравнению с твердостью основного материала.

- Установлена линейная зависимость прочностных характеристик основного материала от числа твердости.

- В результате установленной зависимости прочностных характеристик от твердости, были определены прочностные характеристики по характерным зонам термического воздействия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Булышко Д.Ю. Механические свойства и деформационное поведение циркониевых сплавов ZR-1Nb и ZR-2,5Nb в ультрамелкозернистом состоянии // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: эл. сб. ст. по мат. XXVII междунар. студ. науч.-практ. конф. № 12(26). URL: [http://sibac.info/archive/technic/12\(26\).pdf](http://sibac.info/archive/technic/12(26).pdf) (дата обращения: 27.03.2020).
2. Займовский, А.С. Циркониевые сплавы в атомной энергетике / А.С. Займовский, А.В. Никулина, Н.Г. Решетников // М.: Энергоиздат.- 1981.
3. Mardon, J.P. Influence of Composition and Fabrication Process on Out-of-Pile Properties of M5 Alloy / J.P. Mardon, D. Charquet and J. Senevat // Zirconium in the Nuclear Industry: 12th Int. Symp. ASTM STP 1354. - 2000. -P. 505-524.
4. Влияние импульсного лазерного облучения на структуру поверхностных слоев циркониевых сплавов / [Кириченко В. Г., Кирдин А. И., Коваленко Т. А., Остапов А. В.] // Вісник Харківського національного університету. Сер. фізична «Ядра, частинки, поля». — 2007. — № 777. — Вип. 2/34/. — С. 41—50
5. Shcherbakov E.N., Averin S.A., Sinelnikov L.P., Kozlov A.V., Asiptsov O.I., Shikhalev V.S., Panchenko V.L., Tsygvintsev V.A. EXPERIMENTAL STUDIES OF Э-125 ALLOY PHYSICAL PROPERTIES AFTER LONG-TERM USE IN RBMK // ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ. СЕРИЯ: МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ // № 1 (68-69), 2007 С. 322-334
6. Foster, J.P. ZIRLOTM. Cladding Improvement / J.P. Foster, K. Yueh and R.J. Comstock // Zirconium in the Nuclear Industry: 15th Int. Symp. ASTM STP 1505. - 2009. - P. 457 -469 (Journal of ASTM International, Vol. 5, No. 7, paper ID JAI101188)
7. Kobylyansky, G.P. Irradiation-Induced Growth and Microstructure of Recrystallized, Cold Worked and Quenched Zircaloy-2, NSF, and E635 Alloys / G.P. Kobylyansky, A.E. Novoselov, Z.E. Ostrovsky et al. // Zirconium in the Nuclear Industry: 15th Int. Symp. ASTM STP 1505. -2009. - P. 564-582 (Journal of ASTM International. Vol. 5, No. 4, Paper ID JAI101115).
8. ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытание на растяжение»././ Юридическая фирма "Интернет и Право" URL: <https://www.internet-law.ru/gosts/gost/4616/> (дата обращения: 2.04.2020).
9. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения // АО Консорциум "Кодекс" URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200060184> (дата обращения: 2.04.2020).