

**АО «Машиностроительный завод «Армалит»,
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет),
Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин»,
НИИ Механики ННГУ им. Н.А. Лобачевского**

**ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ И ПРОТОЧНОЙ МОРСКОЙ
ВОДЫ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВОЙ
БРОНЗЫ**

Савенков Г.Г., Смаковский М.С. , Коптяев М.С. , Итин Е.А. , Ломунов А.К.

**Забабахинские научные чтения
19 – 23 мая 2025, Снежинск**

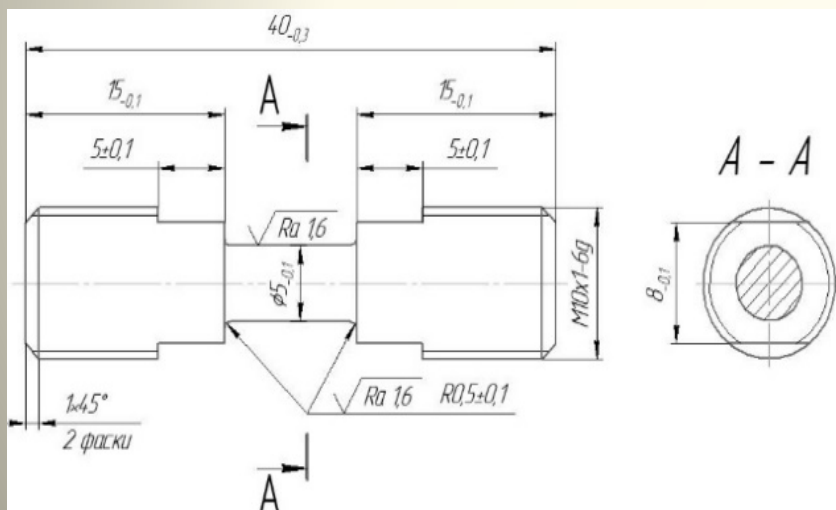
МОТИВАЦИЯ РАБОТЫ

Алюминиевая бронза (и титановые сплавы) являются одними из основных конструкционных материалов при изготовлении корабельной арматуры. Элементы корабельной арматуры являются одним из узких мест в конструкциях надводных и подводных кораблей. С одной стороны, к ним предъявляются повышенные требования по надёжности, что зачастую приводит к их избыточной прочности и, как следствие, к избыточной массе. С другой стороны, корабли пытаются минимизировать массогабаритные параметры и экономические характеристики именно за счёт вспомогательного оборудования (к которому относится корабельная арматура и её элементы). Такой подход приводит к повышенным требованиям к материалам элементов арматуры, которые эксплуатируются в условиях агрессивной морской среды, испытывают ударные динамические и циклические нагрузки и т.д.

Отсюда возникает проблема динамической прочности материалов арматуры после воздействия проточной морской воды. Актуальной задачей является и оценка остаточного ресурса, что приводит к той же проблеме.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБРАЗЦЫ

Алюминиевая бронза марки БрАЖНМц 9–4–4–1 ГОСТ 18175–78, после хранения в неотапливаемом складе 30 лет. Стандартные механические характеристики (по ГОСТ 1497) бронзы в исходном состоянии следующие: $\sigma_{0,2} = 385 \pm 15$ МПа, $\sigma_B = 725 \pm 5$ МПа, $\delta_5 = 35 \pm 1\%$, $\psi = 36 \pm 1\%$.



Эскиз образца

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

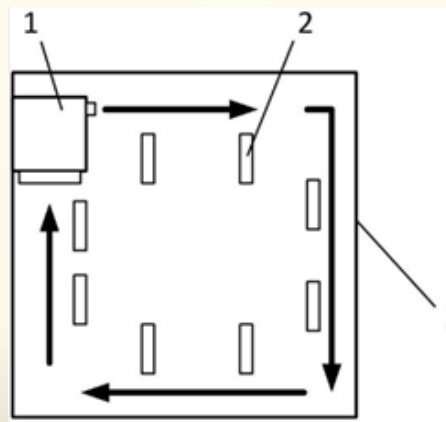
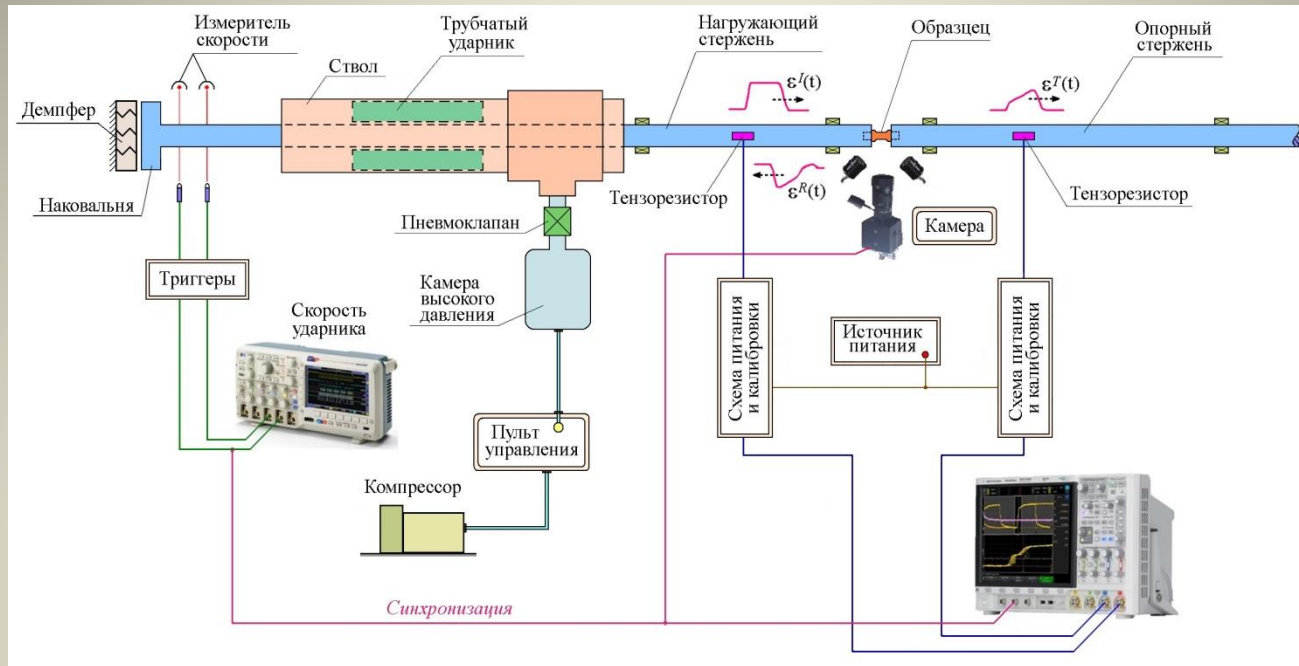
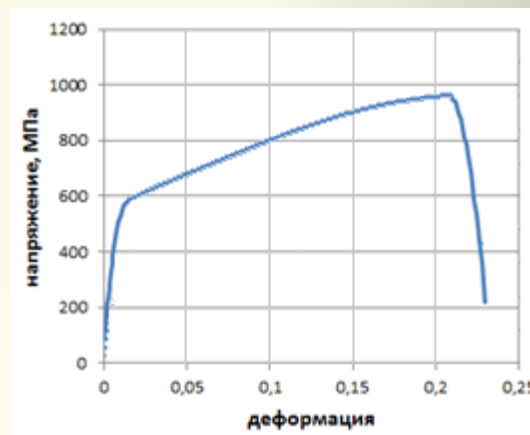
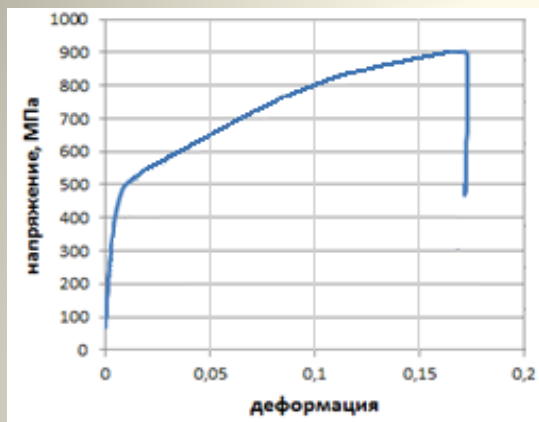


Схема проведения испытаний: 1 – насос Jebao AP – 300, 2 – испытуемые образцы, 3 – корпус контейнера (стрелками указано направление потока воды)

Диаграммы деформирования образцов

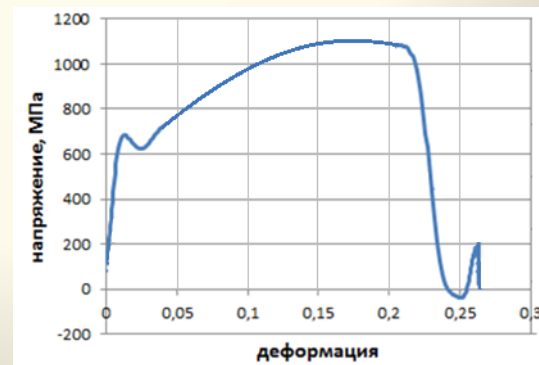
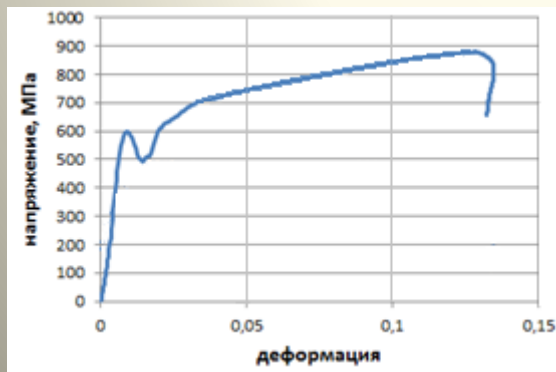
Исходное состояние



$\dot{\epsilon} = 1200 \text{ 1/s}$

Выдержка 75 дней

$\dot{\epsilon} = 1800 \text{ 1/s}$



РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Исходное состояние

Скорость деформации, с ⁻¹	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
1200	525 ± 5,0	850 ± 50	31 ± 1,0	31 ± 1,0
1500	575 ± 15	900 ± 10	31 ± 1,0	33 ± 2,0
1800	600 ± 5,0	950 ± 10	31 ± 0,5	32 ± 0,5

Выдержка в проточной морской воде

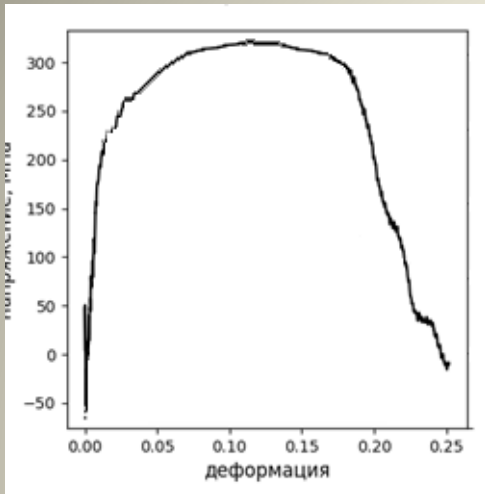
Скорость деформации, с ⁻¹	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
1200	<u>545 ± 25,0</u>	<u>975 ± 25,0</u>	<u>22,5 ± 2,0</u>	<u>33 ± 3,0</u>
	650 ± 20	985 ± 15,0	26,5 ± 2,0	33 ± 3,0
1500	<u>625 ± 75</u>	<u>1050 ± 100</u>	<u>23,5 ± 3,5</u>	<u>33 ± 1,0</u>
	675 ± 25	980 ± 20	25 ± 1,5	31 ± 4,0
1800	<u>660 ± 40,0</u>	<u>1070 ± 20</u>	<u>26,5 ± 1,5</u>	<u>32,5 ± 1,5</u>
	775 ± 75	975 ± 25	26,5 ± 1,5	35 ± 1,0

Числитель – 75 дней, знаменатель – 135 дней

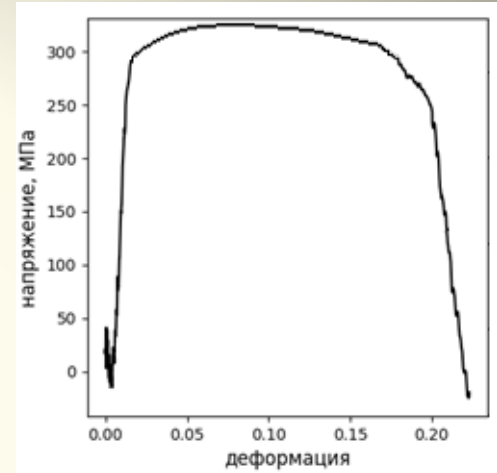
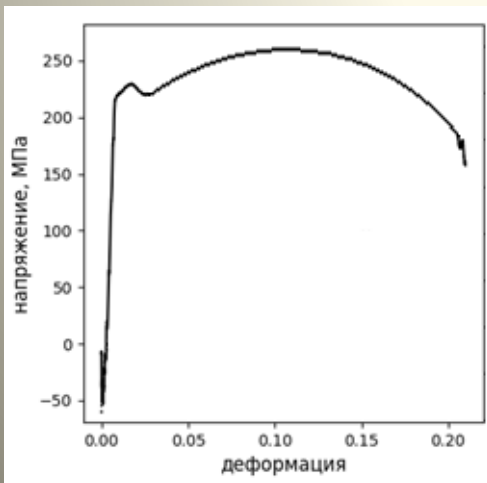
Промежуточные выводы

- 1. Динамический предел текучести «новой» бронзы на 35 – 55% больше статического значения, динамический предел прочности на 20 – 30% выше статического, а оба параметра пластичности уменьшаются на ~10%;**
- 2. После воздействия проточной морской воды, в целом, происходит охрупчивание испытанной бронзы, при этом степень охрупчивания растёт со скоростью деформации;**
- 3. После воздействия проточной морской воды разброс значений характеристик испытанной бронзы существенно выше, чем при испытаниях образцов, не подвергшихся воздействию воды;**
- 4. На диаграммах деформирования образцов после воздействия проточной морской воды появляется зуб текучести;**
- 5. Динамические характеристики прочности испытанной бронзы после выдержки в проточной морской воде выше аналогичных статических характеристик.**

Диаграммы деформирования образцов



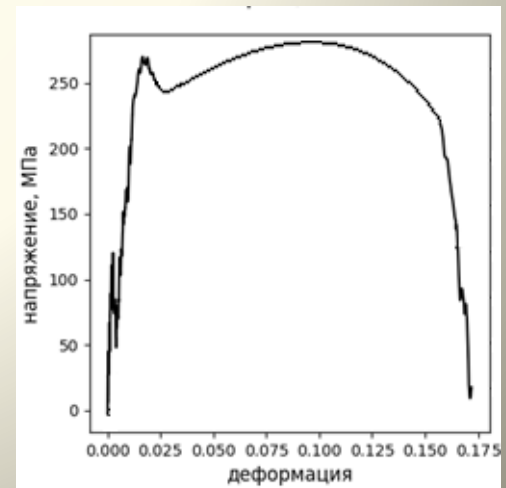
Бронза, 30 лет хранения


$$\dot{\mathcal{E}} = 1900 \text{ 1/c}$$
~~1/c~~
$$\dot{\mathcal{E}} = 1500 \text{ 1/c} \rightarrow$$

**Бронза, 30 лет хранения,
выдержка в морской воде**

75 дней

135 дней



РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты динамических испытаний бронзы после 30 лет хранения

Скорость деформации, с ⁻¹	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Предельное удлинение, %	Относительное сужение, %
1200	225±25	360 ± 60	21,5 ± 6,5	22,5 ± 1,5
1500	300 ± 20	365 ± 50	22,5 ± 4,5	23,5 ± 5,5
1900	290 ± 10	345 ± 30	19,5 ± 0,5	15,5 ± 2,5

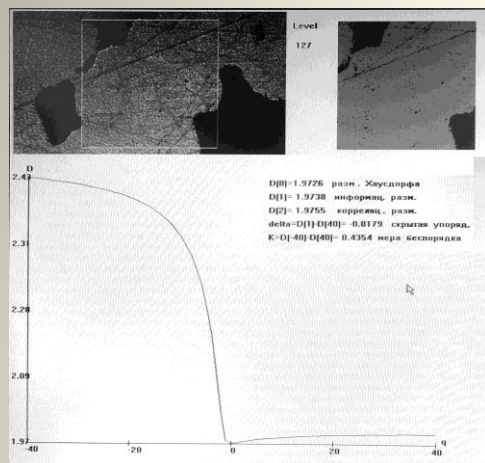
Результаты испытаний после выдержки бронзы в проточной морской воде

Скорость деформации, с ⁻¹	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Предельное удлинение, %	Относительное сужение, %
1000	<u>200 ± 20</u>	<u>240 ± 5</u>	<u>22,5 ± 2,5</u>	<u>22,5 ± 2,5</u>
	190 ± 40	245 ± 25	21,5 ± 4,5	22 ± 2,5
1200	<u>190 ± 25</u>	<u>265 ± 15</u>	<u>21,5 ± 3,5</u>	<u>20,5 ± 3,5</u>
	175 ± 30	240 ± 5	19 ± 1,0	15,5 ± 2,0
1500	<u>245 ± 25</u>	<u>290 ± 25</u>	<u>20,5 ± 3,</u>	<u>18,5 ± 2,5</u>
	195 ± 15	245 ± 5	17,5 ± 5,0	12,5 ± 3,5

В числителе – результаты после выдержки 75 дней, в знаменателе – после 135 дней

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ

== 1/c

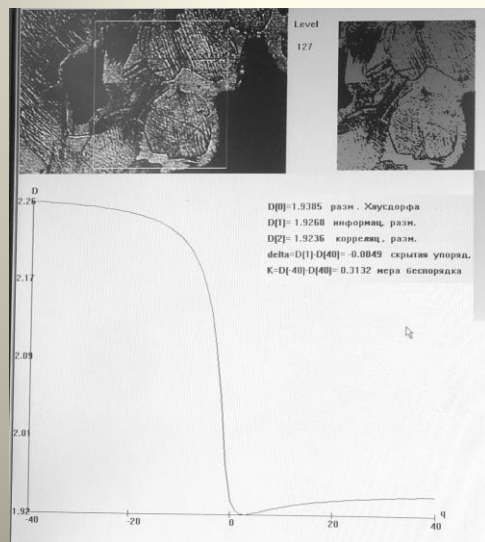


$D(0)=1.9348$ размерность Хаусдорфа
 $D(1)=1.9226$ информационная
 $D(2)=1.9142$ корреляционная
 $\text{delta}=D(1)-D(40)=0.0202$ скрытая упорядоченность
 $K=D(-40)-D(40)=0.0426$ мера беспорядка



$D(0)=1.9385$ размерность Хаусдорфа
 $D(1)=1.9268$ информационная
 $D(2)=1.9236$ корреляционная
 $\text{delta}=D(1)-D(40)=-0.0049$ скрытая упорядоченность
 $K=D(-40)-D(40)=0.3132$ мера беспорядка

30 лет, без
воздействия
морской
воды



$D(0)=1.7860$ размерность Хаусдорфа
 $D(1)=1.8319$ информационная
 $D(2)=1.8230$ корреляционная
 $\text{delta}=D(1)-D(40)=-0.0426$ скрытая упорядоченность
 $K=D(-40)-D(40)=-1.2060$ мера беспорядка



$D(0)=1.5896$ размерность Хаусдорфа
 $D(1)=1.7564$ информационная
 $D(2)=1.7642$ корреляционная
 $\text{delta}=D(1)-D(40)=-0.1669$ скрытая упорядоченность
 $K=D(-40)-D(40)=-1.6177$ мера беспорядка

30 лет,
воздействие
морской
воды

Структурное состояние становится более устойчивым, на что указывают рост абсолютных значений delta и K

ВЫВОДЫ

1. После хранения резко упали как динамические характеристики прочности (пределы текучести и прочности) – в 2 раза, так и динамические характеристики пластичности (предельное удлинение и относительное сужение) – 1,5 раза;
2. Воздействие проточной морской воды привело к незначительному снижению динамических характеристик прочности, практически не изменились значения предельного удлинения и на 10 – 20% снизились значения динамического относительного удлинения;
3. Воздействие проточной морской воды привело к стабилизации свойств исследуемой бронзы (разброс значений характеристик стал значительно меньше), что подтверждается мультифрактальным анализом - структурное состояние становится более устойчивым, на что указывают рост абсолютных значений δ и K
4. На диаграммах деформирования образцов после воздействия проточной морской воды появляется зуб текучести.

ВЛИЯНИЕ ПРОТОЧНОЙ МОРСКОЙ ВОДЫ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

**Г.Г. Савенков, М.С. Смаковский, Е.В.
Коптяев, Е.А. Итин, А.М. Брагов**

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

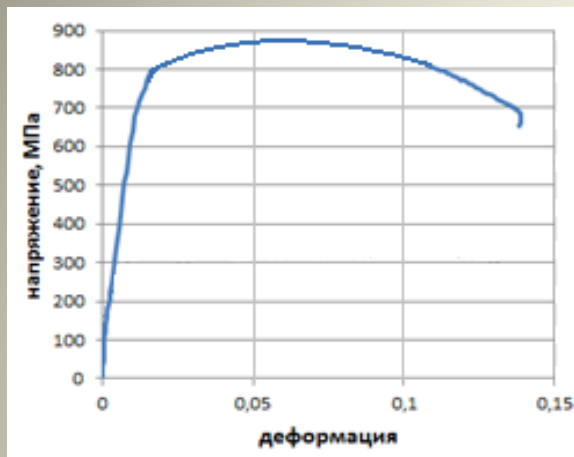
Химический состав в % материала 3М
ОСТ 1-92077 - 91

Fe	C	Si	N	Ti	Al	Zr	O
<0.25	<0.1	< 0.12	< 0.04	93.89 - 96.2	3.5 - 5	< 0.3	< 0.15

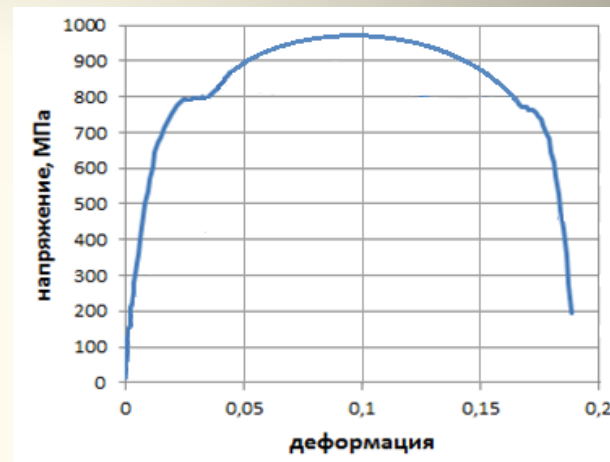
Стандартные механические характеристики (по ГОСТ 1497) исследуемого сплава:

$$\sigma_{0,2} = 660 \pm 10 \text{ МПа}, \sigma_B = 715 \pm 10 \text{ МПа}, \epsilon = 22 \pm 1\%, \psi = 36 \pm 1\%.$$

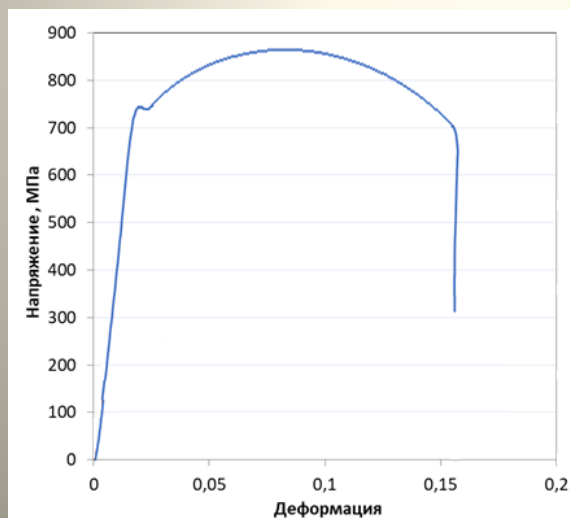
Диаграммы деформирования образцов



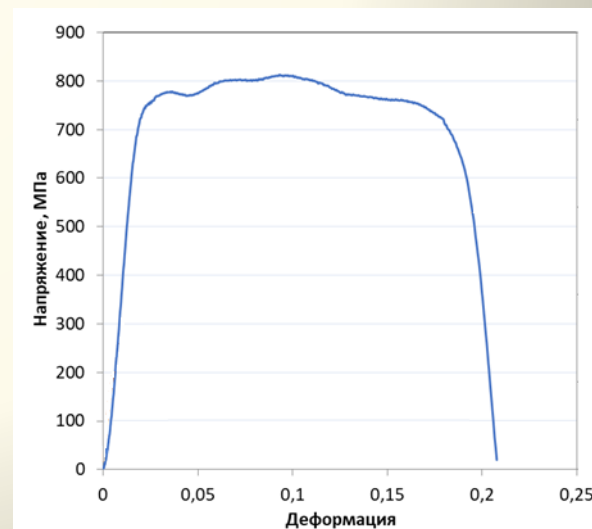
$$\dot{\varepsilon} = 900 \text{ 1/с}$$



$$\dot{\varepsilon} = 1800 \text{ 1/с}$$



**135 дней в
проточной
морской
воде**



РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Исходное состояние

Скорость деформации, с ⁻¹	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
900	865 ± 15	925 ± 25	20 ± 2,5	36 ± 1,0
1200	875 ± 25	950 ± 10	21,5 ± 0,5	37,5 ± 0,5
1800	910 ± 10	980 ± 20	22,5 ± 0,5	38 ± 1,0

Выдержка в проточной морской воде

Скорость деформации, с ⁻¹	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
900	<u>830 ± 20</u>	<u>870 ± 25</u>	<u>18,5 ± 1,5</u>	<u>36 ± 1,0</u>
	850 ± 25	900 ± 35	17,5 ± 1,5	31 ± 0,5
1300	<u>850 ± 35</u>	<u>900 ± 30</u>	<u>21 ± 1,0</u>	<u>34,5 ± 1,5</u>
	880 ± 20	920 ± 35	20 ± 2,0	30 ± 3,0
1800	<u>860 ± 30</u>	<u>890 ± 40</u>	<u>20,5 ± 1,5</u>	<u>30 ± 2,0</u>
	900 ± 30	940 ± 35	19,5 ± 1,0	25,5 ± 3,5

В числителе – результаты после выдержки 90 дней, в знаменателе – после 135 дней

ВЫВОДЫ

- 1. После воздействия проточной морской воды на титановый сплав ЗМ, в целом, происходит его охрупчивание (характеристики пластичности (относительные удлинение и сужение) уменьшаются);**
- 2. Степень охрупчивания растёт со скоростью деформации;**
- 3. После коррозионных испытаний разброс значений существенно выше, чем при испытаниях образцов в исходном состоянии;**
- 4. На диаграммах деформирования образцов после воздействия проточной морской воды появляется зуб текучести.**

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!