



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

# Динамические и ударно-волновые свойства сетчатых изделий из Al сплава АК6, полученных аддитивной технологией

**Кленов Александр Иванович,**

И.Г. Бродова<sup>2</sup>, А.Н. Петрова<sup>2</sup>, Е.Б. Смирнов<sup>1</sup>, Д.Т. Юсупов<sup>1</sup>

*1 - ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина, Россия, Снежинск*

*2 - Институт физики металлов УрО РАН, Россия, Екатеринбург*

# Актуальность работы



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

В настоящее время в космической и оборонной отраслях получили развитие работы по созданию изделий, применяемых как амортизаторы для энергопоглощения, например, в качестве защитных слоев в посадочных системах космических аппаратов или в качестве бронепреград. С развитием аддитивных технологий, позволяющих регулировать формообразование материалов, появилась возможность замены монолитных изделий на сетчатые структуры разной топологии, обладающие достаточно высоким уровнем механических характеристик при более низкой массе. Проведенные ранее авторами эксперименты показали, что среди сетчатых структур из сплава АК6 наилучшими механическими характеристиками обладают образцы с топологией трижды периодической поверхности минимальной энергии типа гироид.

## Цель работы:

изучение динамических и ударно-волновых свойства сетчатых изделий разной топологии (ГЦК, ОЦК и гироид) из сплава АК6 и возможности их использования в качестве преград для ослабления ударных волн.

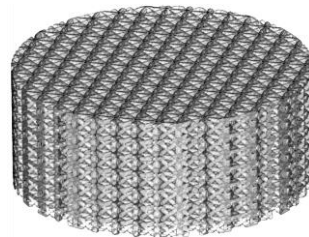
## Задачи:

- Синтезировать сетчатые образцы с разной геометрией поровых каналов;
- Измерить и сравнить динамические свойства сетчатых образцов разной топологии;
- Провести ударно-волновые эксперименты для определения затухания ударной волны в зависимости от плотности объёмно-структурированных образцов разной топологии.

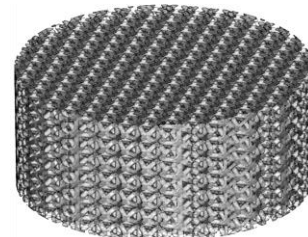
# Макроструктура объёмно-структурированных образцов



Структура гироид



ГЦК



ОЦК



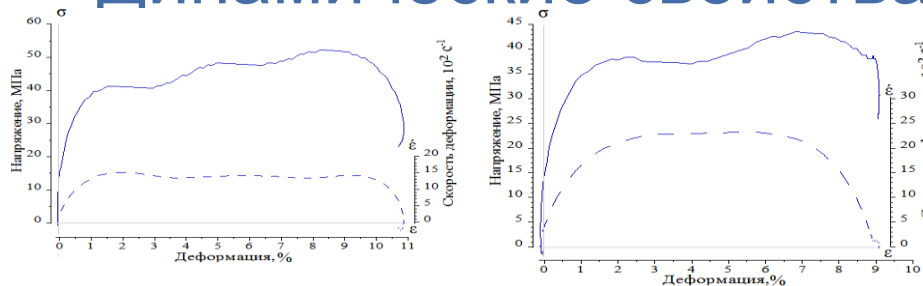
Изделия с топологией ТПМП имеют строгое математическое уравнение, с помощью которого можно варьировать параметры периодичности, а, следовательно, и свойства материалов получаемых аддитивными методами:

$$\cos(x) \times \sin(y) + \cos(y) \times \sin(z) + \cos(z) \times \sin(x) = t$$

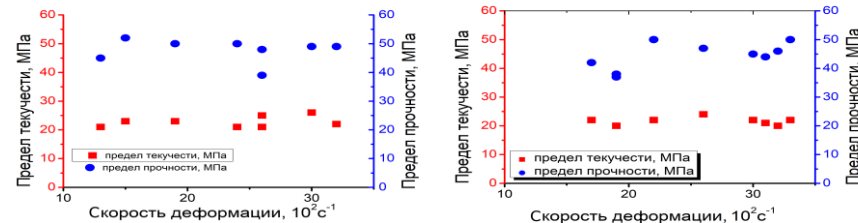
# Динамические свойства ГЦК, ОЦК



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



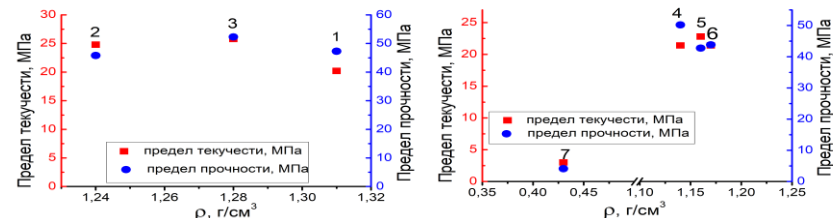
Типичные диаграммы « $\sigma$ - $\epsilon$ » (сплошная линия) и « $\epsilon$ - $\dot{\epsilon}$ » (пунктирная линия) образцов с ГЦК (лев.) и ОЦК (прав.) сетчатыми структурами.



Зависимости механических характеристик образцов с кубической сетчатой структурой от скорости деформации: ГЦК, комплект №1,  $\rho = 1.31 \text{ г/см}^3$ ; ОЦК, комплект №5,  $\rho = 1.16 \text{ г/см}^3$ .

## Средние значения механических характеристик образцов с кубической сетчатой структурой

| № комплекта | Тип сетчатой структуры | Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Интервал скорости деформации $10^2$ , с <sup>-1</sup> | Предел текучести, МПа | Предел прочности, МПа |
|-------------|------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1           | ГЦК                    | 1.31                                 | 13-32                                                 | 20.2                  | 47.3                  |
| 2           | ГЦК                    | 1.24                                 | 13-27                                                 | 24.8                  | 45.8                  |
| 3           | ГЦК                    | 1.28                                 | 15-38                                                 | 25.8                  | 52.3                  |
| 4           | ОЦК                    | 1.14                                 | 19-33                                                 | 21.4                  | 50.2                  |
| 5           | ОЦК                    | 1.16                                 | 16-28                                                 | 22.8                  | 42.8                  |
| 6           | ОЦК                    | 1.17                                 | 17-57                                                 | 21.4                  | 43.8                  |
| 7           | ОЦК                    | 0.43                                 | 16-24                                                 | 3.0                   | 4.1                   |



Зависимости средних механических характеристик образцов с кубической сетчатой структурой от их плотности: ГЦК, ОЦК. (цифрами указаны №№ комплектов).

# Динамические свойства гироидных структур

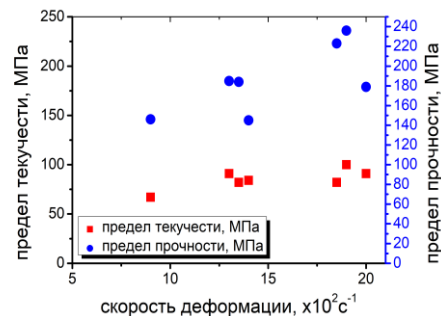
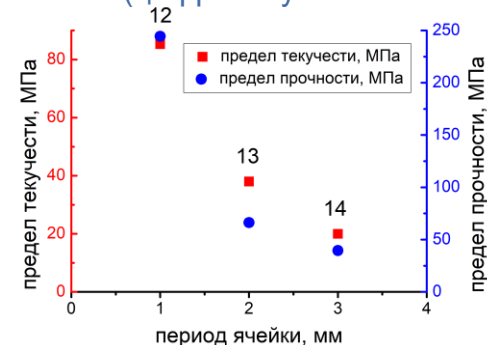


РФАЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

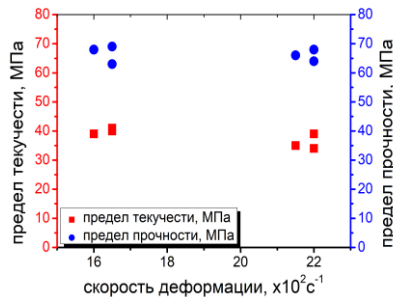
## Средние значения механических свойств гироидов

| № комплекта | Период ячейки, мм | Толщина стенки, мм | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Интервал скоростей деформации $\cdot 10^2$ , с <sup>-1</sup> | Предел текучести, МПа | Предел прочности, МПа |
|-------------|-------------------|--------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 12          | 1                 | 0.2                | 2.4                        | 9.0 – 20                                                     | 87.4                  | 244.4                 |
| 13          | 2                 | 0.2                | 1.3                        | 16.0 – 22                                                    | 38.0                  | 66.3                  |
| 14          | 3                 | 0.2                | 0.9                        | 17.5 – 25                                                    | 20.0                  | 39.5                  |

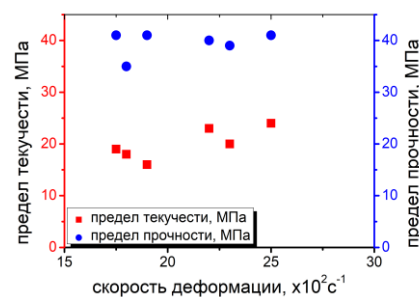
Зависимости средних значений механических характеристик гироидов от периода ячейки комплекты № 12-14 (цифрами указаны номера компл.)



а



б

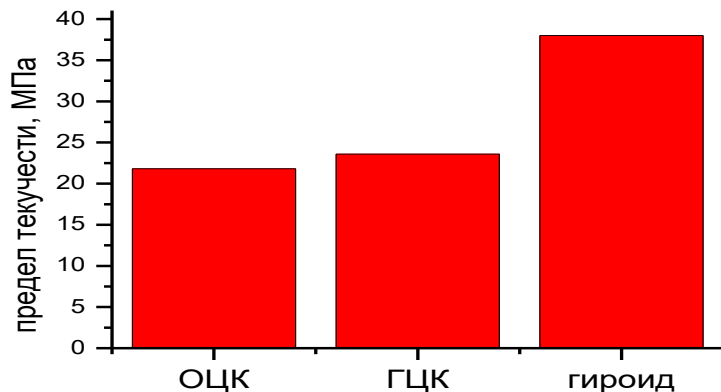


в

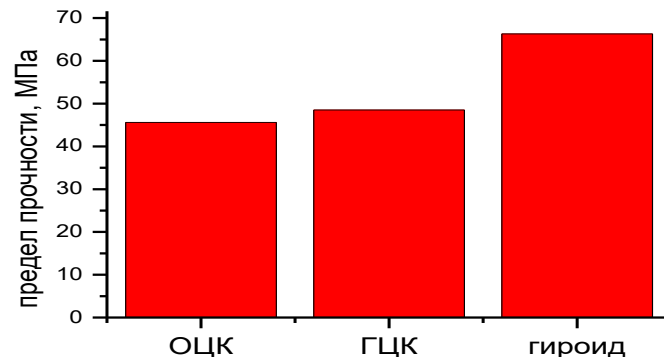
Зависимости механических характеристик гироидов от скорости деформации:  
**а-комплект №12,**  
**б- комплект №13,**  
**в- комплект № 14.**



Плотность  $1.2-1.3 \text{ г/см}^3$



Предел текучести гироида в 1.6 раза выше, чем ГЦК, и в 1.7 раза выше, чем ОЦК

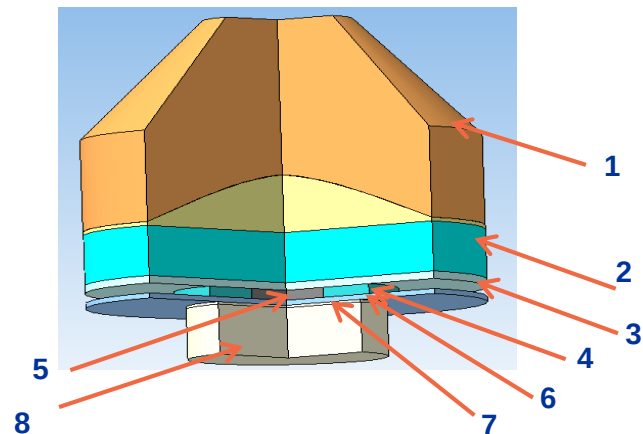


Предел прочности гироида в 1.4 раза выше, чем ГЦК, и в 1.5 раза выше, чем ОЦК

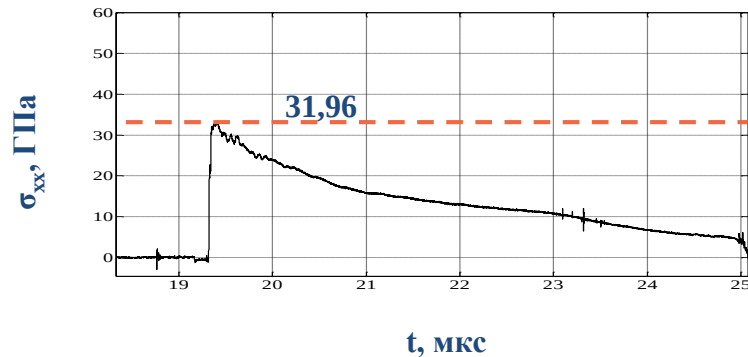
# Ударно-волновые эксперименты



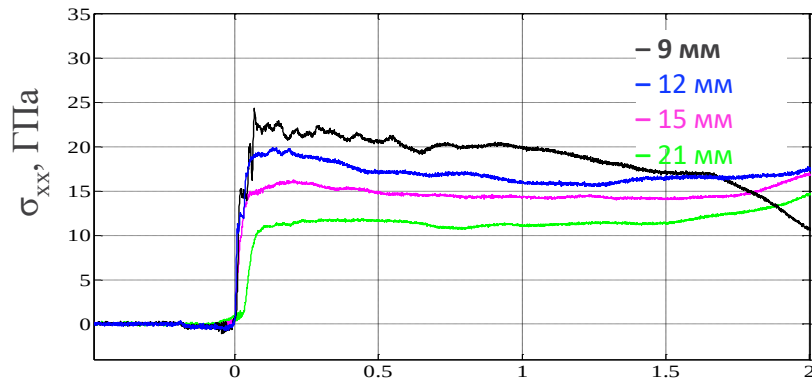
РФАЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



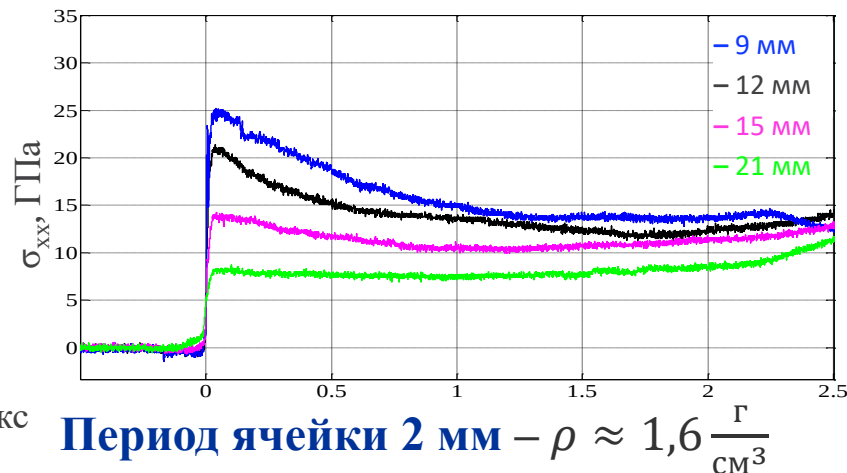
- 1, 2 – заряд ВВ,
- 3 – алюминиевый экран,
- 4 – пенопластовое кольцо,
- 5 – исследуемый образец,
- 6 – алюминиевый экран,
- 7 – экран мраморный,
- 8 – мрамор.



Калибровочный опыт



Период ячейки 3 мм –  $\rho \approx 0,75 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$

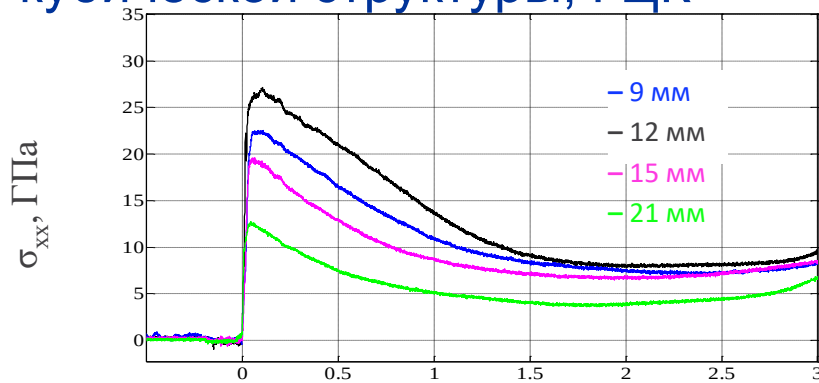


Период ячейки 2 мм –  $\rho \approx 1,6 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$

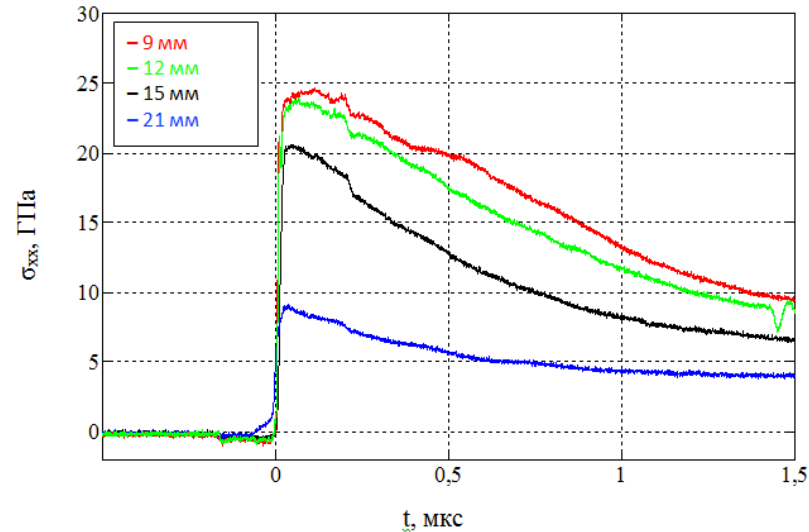
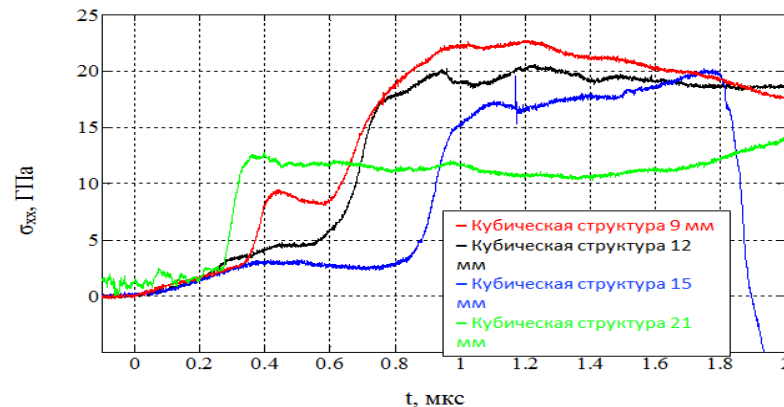
# Профили продольного напряжения гироидной структуры, кубической структуры, ГЦК



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



Период ячейки 1 мм —  $\rho \approx 2,2 \frac{\Gamma}{\text{см}^3} t, \text{ мкс}$



ГЦК —  $\rho \approx 2,23 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$

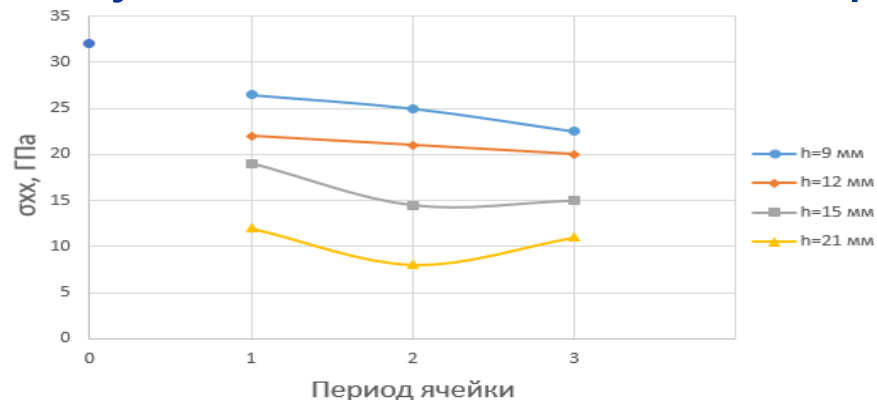
Кубическая структура —  $\rho \approx 0,88 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$



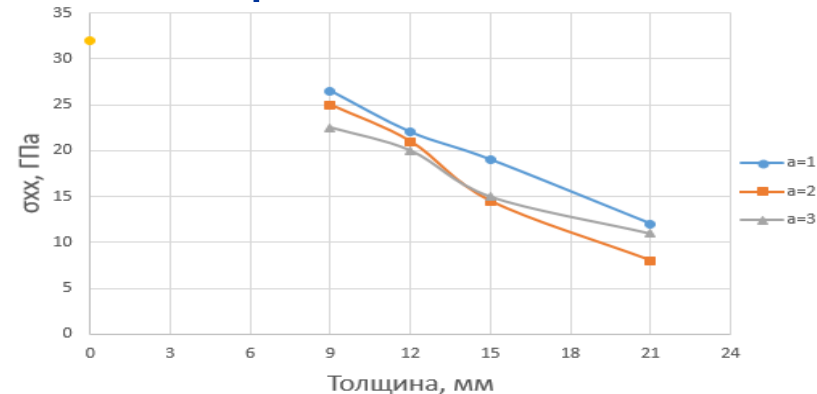
# Затухание плоской УВ для трёх типов giroидов



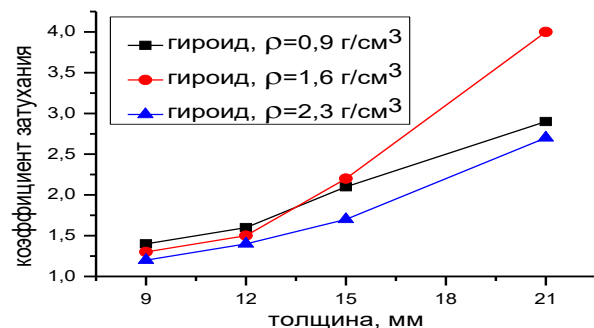
РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



Зависимость напряжения сжатия от периода ячейки giroидов разной толщины



Зависимость напряжения сжатия от толщины giroидов с разным периодом ячейки



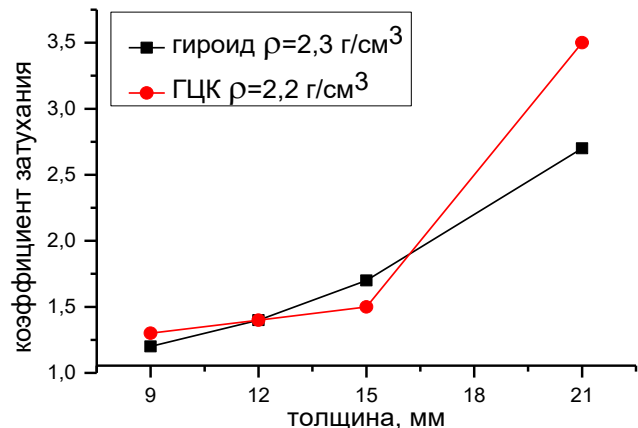
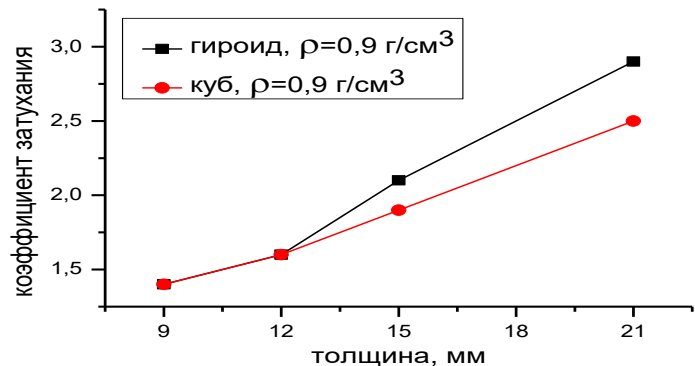
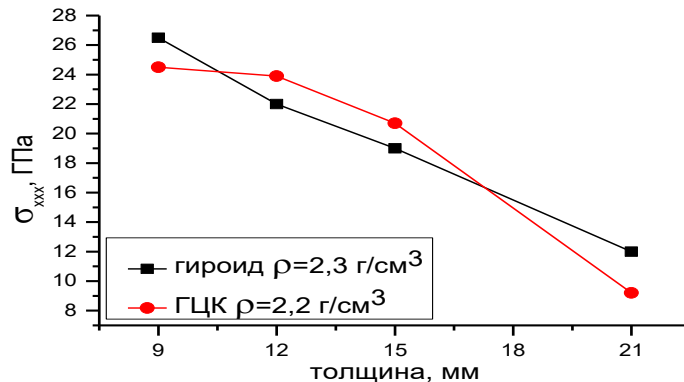
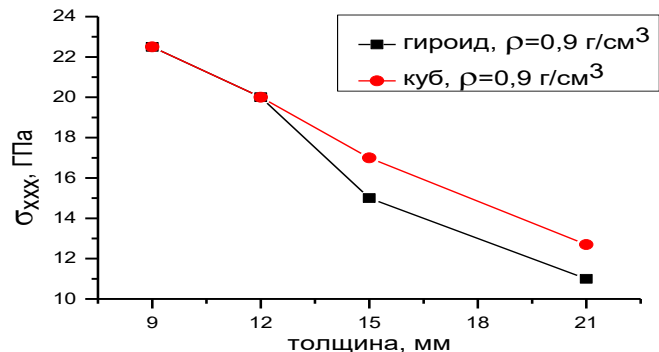
Коэффициент затухания ударных волн для разных giroидов

Наилучший эффект ослабления ударной волны при  $K=4$  наблюдается в преградах толщиной **21 мм**, изготовленных из giroидов с периодом ячейки **2 мм** и толщиной стенки **0.2 мм** (плотность  $1.6 \text{ г/см}^3$ )

# Сравнение затухания ударной волны для преград разной топологии в зависимости от их толщины



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



Коэффициент ослабления ударных волн в преградах топологии гироид выше на 15%

# Заключение



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

Проведено сравнение динамических, механических свойств образцов с разной кубической сетчатой структурой (кубическая, ГЦК, ОЦК) и топологией гироид.

Установлено, что предел прочности гироидов превышает свойства ГЦК и ОЦК структур соответственно в **1.4** и **1.5** раза.

Выполнено более 20 ударно-волновых экспериментов по затуханию плоских ударных волн в преградах с разной топологией построения.

Построены зависимости напряжения сжатия и коэффициента затухания УВ для преград разной толщины из гироидов с различным периодом ячейки. Показано, что для преград, толщиной менее 12 мм, влияние геометрических параметров гироидов незначительно. При большей толщине преград ослабление ударных волн зависит от периода ячейки. Наилучший эффект ослабления ударной волны при  **$K=4$**  наблюдается в преградах толщиной **21 мм**, изготовленных из гироидов с периодом ячейки **2 мм** и толщиной стенки **0.2 мм**.

Проведено сравнение эффекта затухания УВ в зависимости от топологии построения 3D преград одинаковой толщины и одинаковой плотности. Установлено, что коэффициент ослабления УВ в преградах типа гироид толщиной 21 мм выше на 15 %, чем в преградах с кубической структурой.

Таким образом, использование гироидов из сплава АК6 в качестве преград позволяет эффективно ослаблять ударные волны.