



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

# **Структура и динамические свойства алюминиевого сплава АК6, синтезированного селективным лазерным плавлением**

**Клёнов Александр Иванович<sup>1</sup>,**

**А.Н. Петрова<sup>2</sup>, И.Г. Бродова<sup>2</sup>, Е.Б. Смирнов<sup>1</sup>, А. Ю. Гармашев<sup>1</sup>, Д.П. Кучко<sup>1</sup>**

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

**2 - Институт физики металлов УрО РАН, Россия, Екатеринбург<sup>2</sup>**

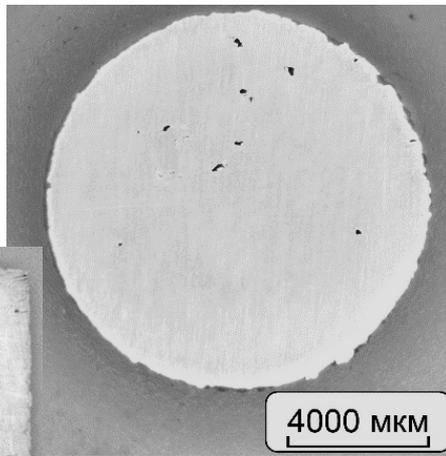
## Цель работы:

исследование структуры и динамических свойств сплошных и объёмно-структурированных сетчатых образцов Al-Mg-Cu-Si сплава АК6, синтезированных методом селективного лазерного сплавления.

## Задачи:

- анализ и возможность изготовления АТ-материалов различной плотности и структуры;
- создание 3-D моделей упорядоченных структур;
- изготовление структуры сплошных и объёмно-структурированных сетчатых образцов;
- исследование реологических свойств АТ-алюминиевого сплава;
- исследование ударно-волновых свойств АТ-алюминиевого сплава;

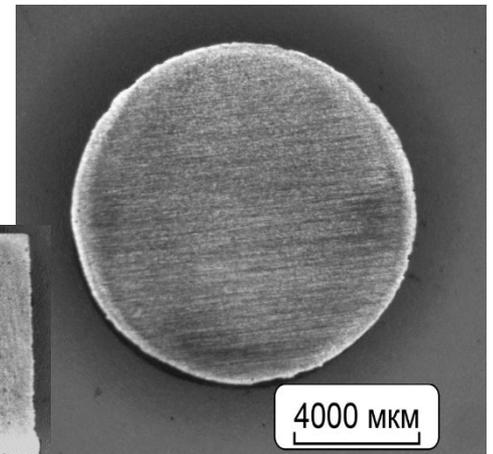
Режим синтеза  
P-100-200 Вт  
V-450-950 мм/с  
S- 120-150 мкм



4000 мкм

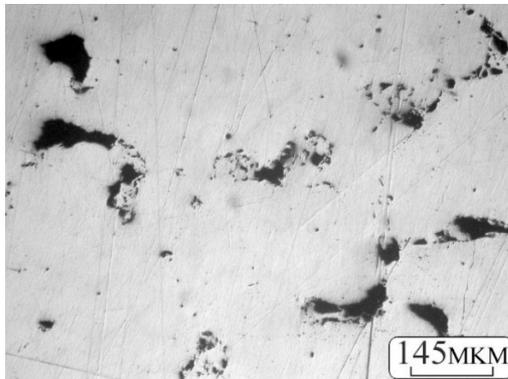
$\rho = 2.34 - 2.59 \text{ г/см}^3$

Режим синтеза  
P-200 Вт  
V-400 мм/с  
S- 30 мкм

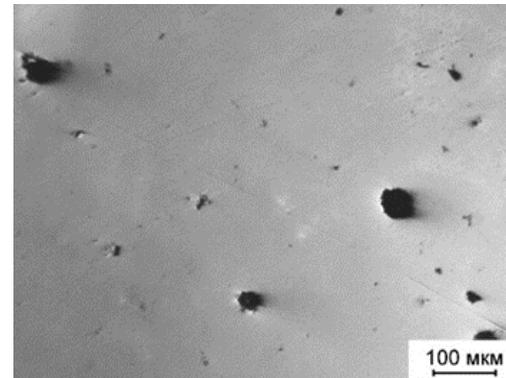


4000 мкм

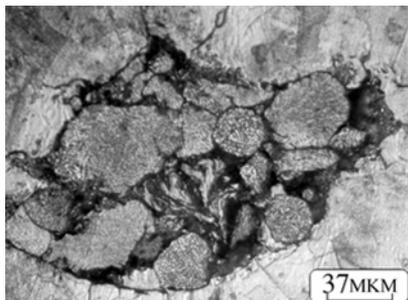
$\rho = 2.79 \text{ г/см}^3 *$



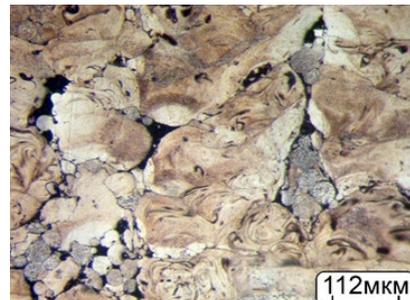
145 мкм



100 мкм



37 мкм

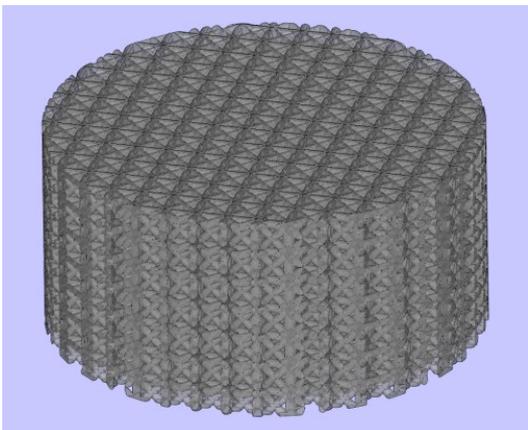


112 мкм

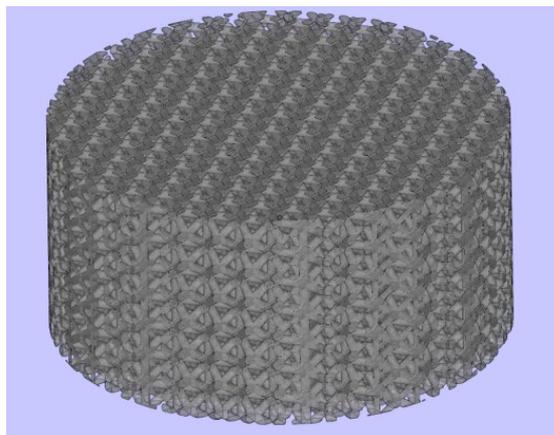
Увеличение мощности, уменьшение скорости сканирования, уменьшение межтрекового расстояния уменьшает макропористость и количество дефектов синтеза таких, как усадочные раковины, непроправленные участки с частицами порошка, горячие трещины.

\* $\rho$  литого сплава АК6 – 2.76 г/см<sup>3</sup>

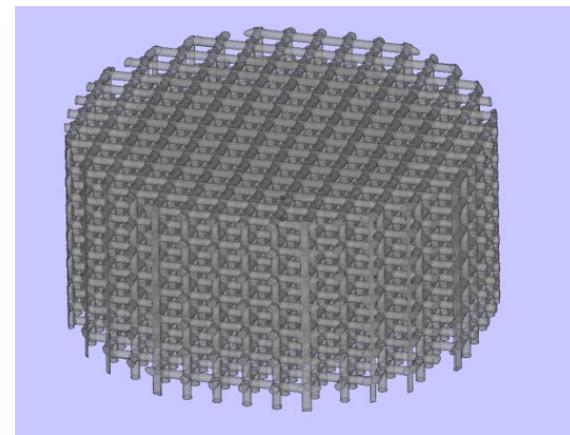
# Сетчатые структуры



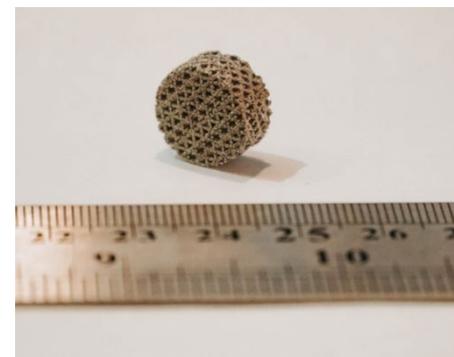
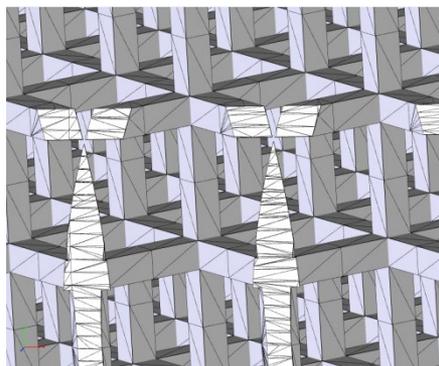
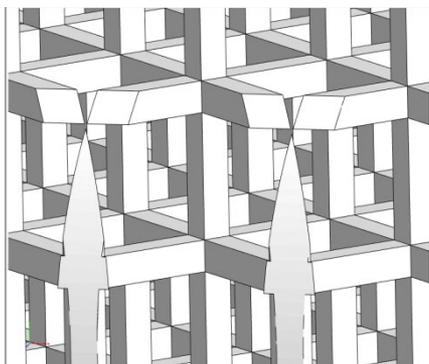
Структура ГЦК



Структура ОЦК



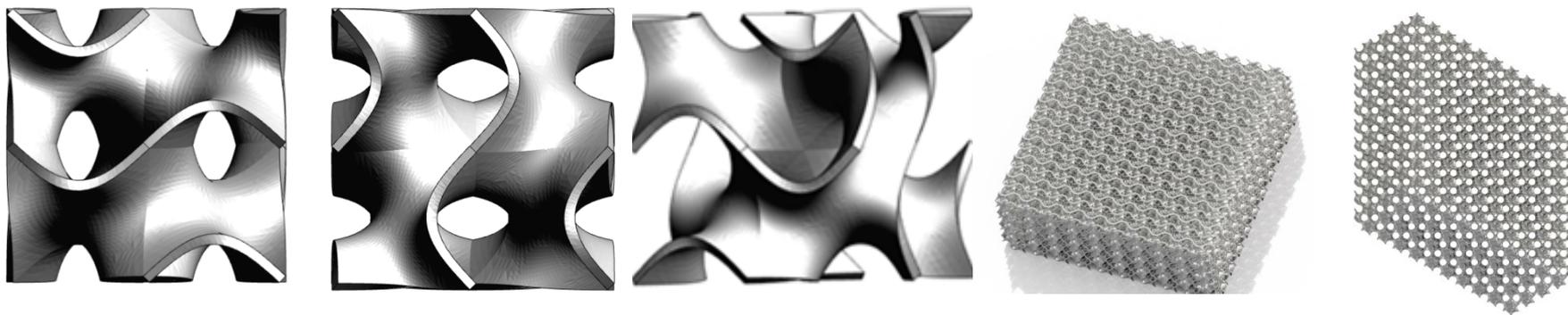
Кубическая структура



# Макроструктура объёмно-структурированных образцов



РФАЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



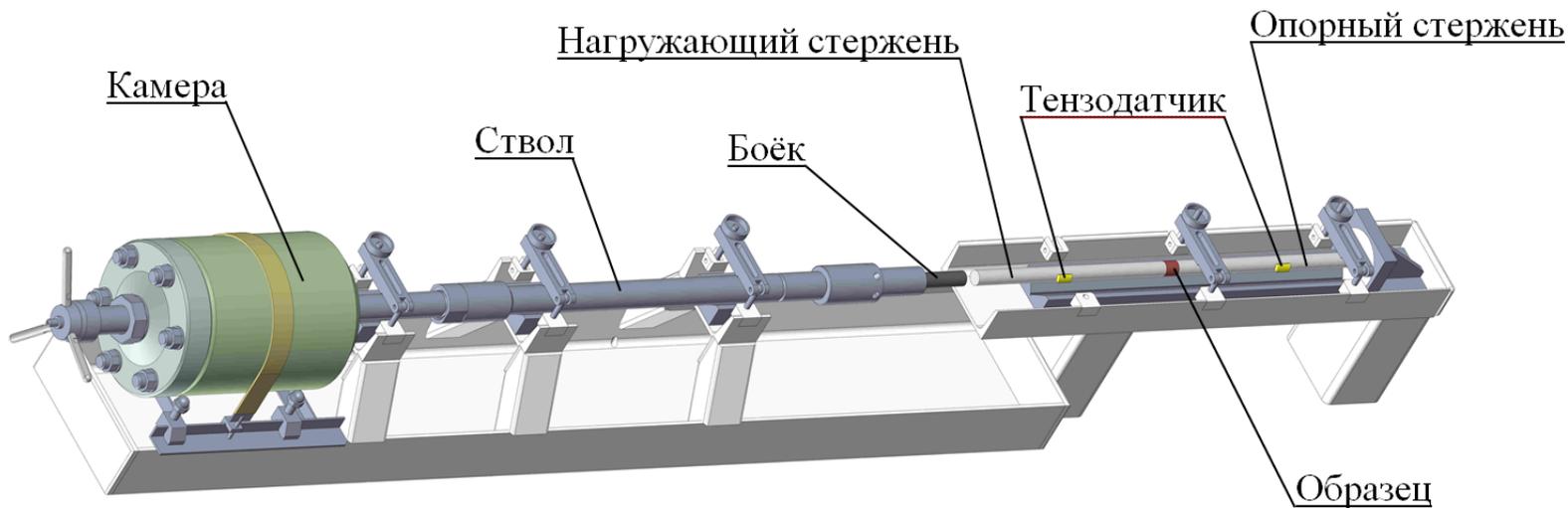
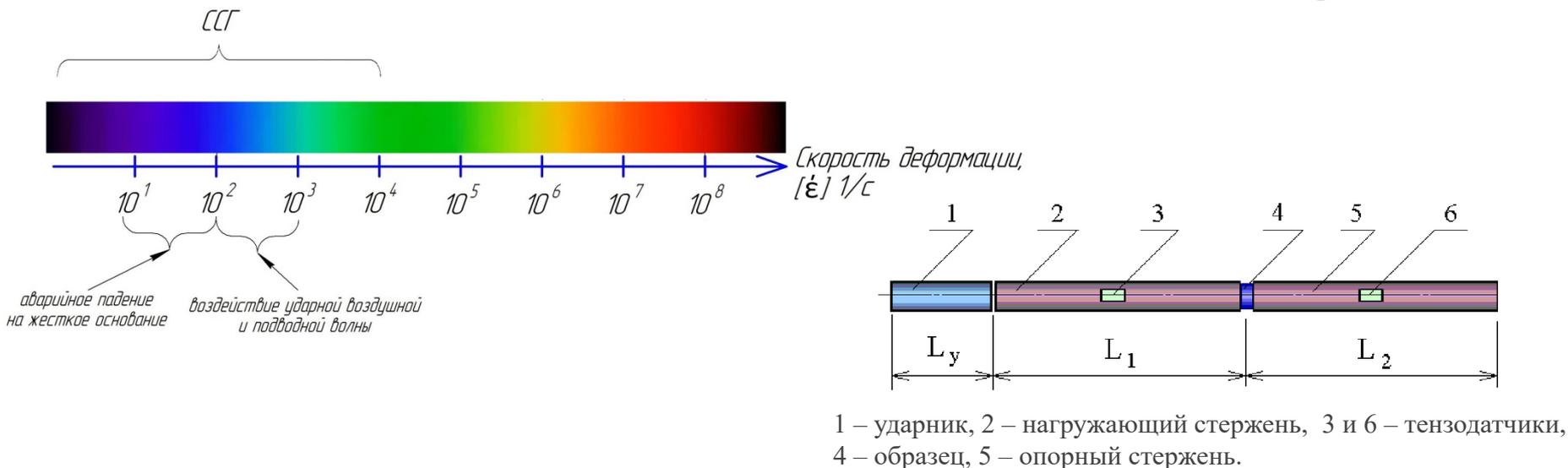
Структура гироид



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

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

# Метод исследования



# Модель Джонсона-Кука

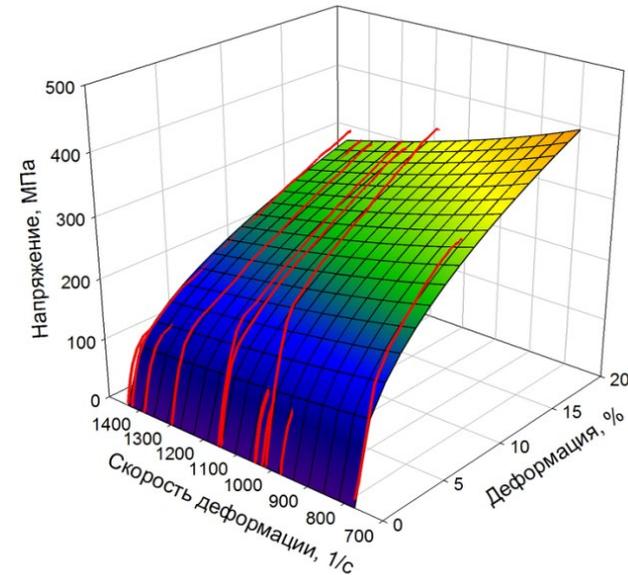
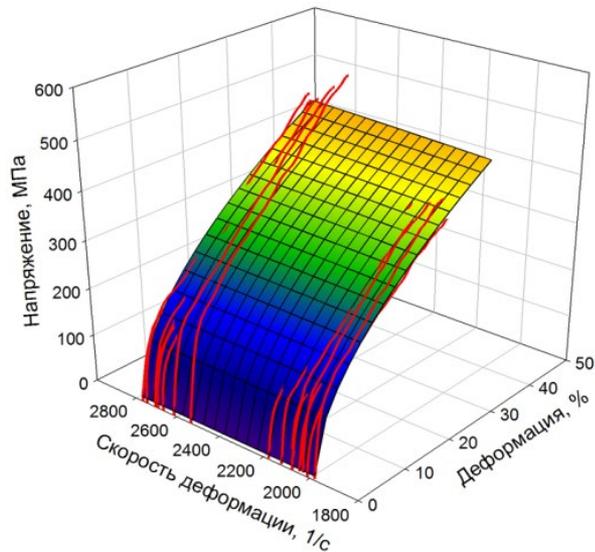
$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + D \ln \dot{\varepsilon}) \left(1 - T^{*m}\right)$$

где  $\sigma$  – напряжение,  $\varepsilon_p$  – пластическая деформация,  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации,  $A$  – предел текучести,  $B$  – характеристика упрочнения,  $D$  – постоянная упрочнения за счёт скорости деформации,  $n$  – показатель упрочнения,  $m$  – коэффициент температурной зависимости,  $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ ,  $T$  – абсолютная мгновенная температура образца, равная сумме начальной абсолютной температуры испытания  $T_{room}$  и приращению температуры образца при его пластическом деформировании (рассчитывается через энергоемкость),  $T_{melt}$  – температура плавления.

# Диаграмма деформирования сплошных образцов АТ-АК6



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



Определены значения пределов прочности и текучести:

$\sigma_{0,2}=108$  МПа и  $\sigma_B=561$  МПа – для плотности  $\rho \approx 2,549 \text{ г/см}^3$ ;

$\sigma_{0,2}=103$  МПа и  $\sigma_B=406$  МПа – для плотности  $\rho \approx 2,384 \text{ г/см}^3$ .

В результате аппроксимации были получены следующие значения аппроксимирующих параметров:

образцы  $\rho \approx 2,549 \text{ г/см}^3$  :  **$A - 109,5$  МПа,  $B - 21,3$  МПа,  $n - 0,81$ ;**

образцы  $\rho \approx 2,384 \text{ г/см}^3$  :  **$A - 121,4$  МПа,  $B - 30,7$  МПа,  $n - 0,74$ .**

# Диаграмма деформирования образцов АТ-алюминия АК6 (структура гироид)

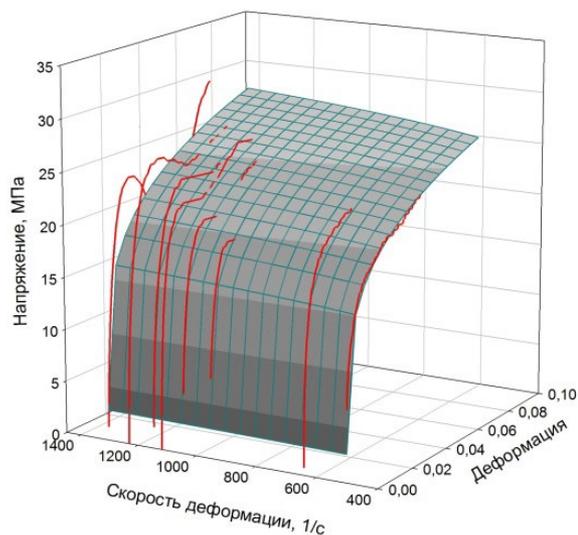


РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

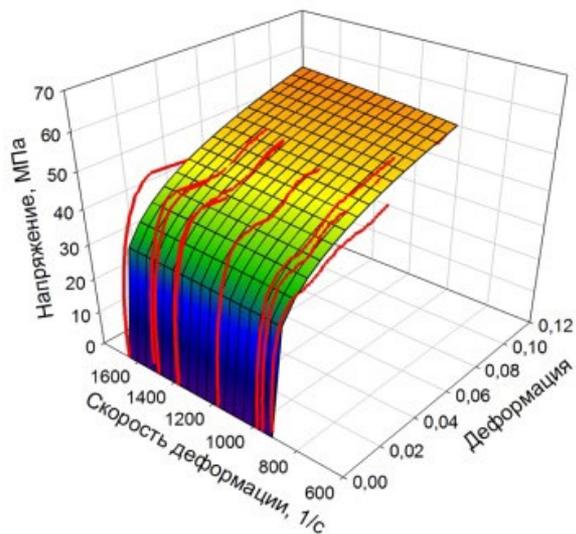
группа №1 –  $\rho \approx 0,7 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$  ;

группа №2 –  $\rho \approx 1,2 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$  ;

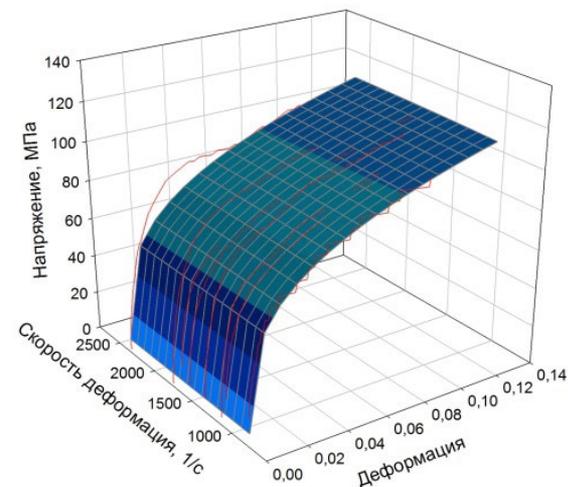
группа №3 –  $\rho \approx 1,8 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$  ;



Группа 1



Группа 2



Группа 3

Определены значения предела прочности и текучести:

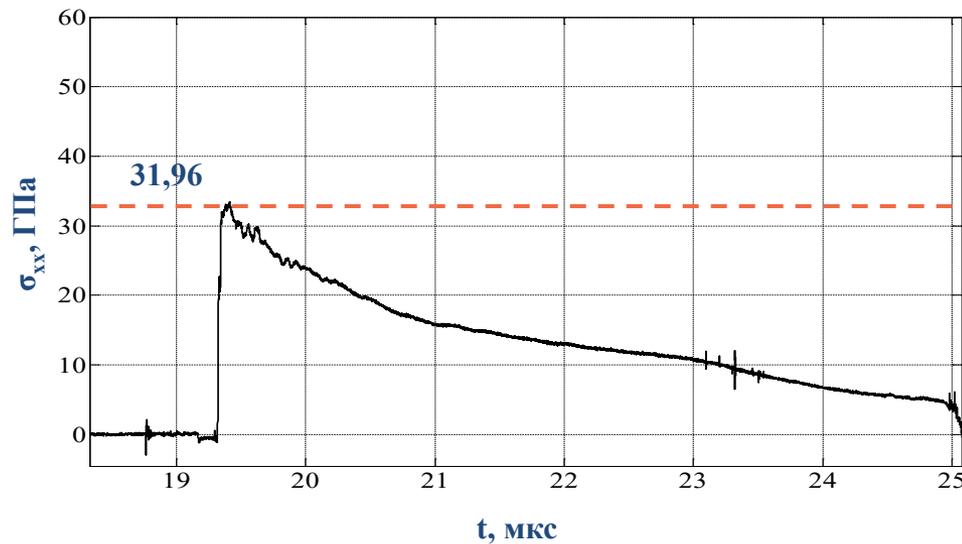
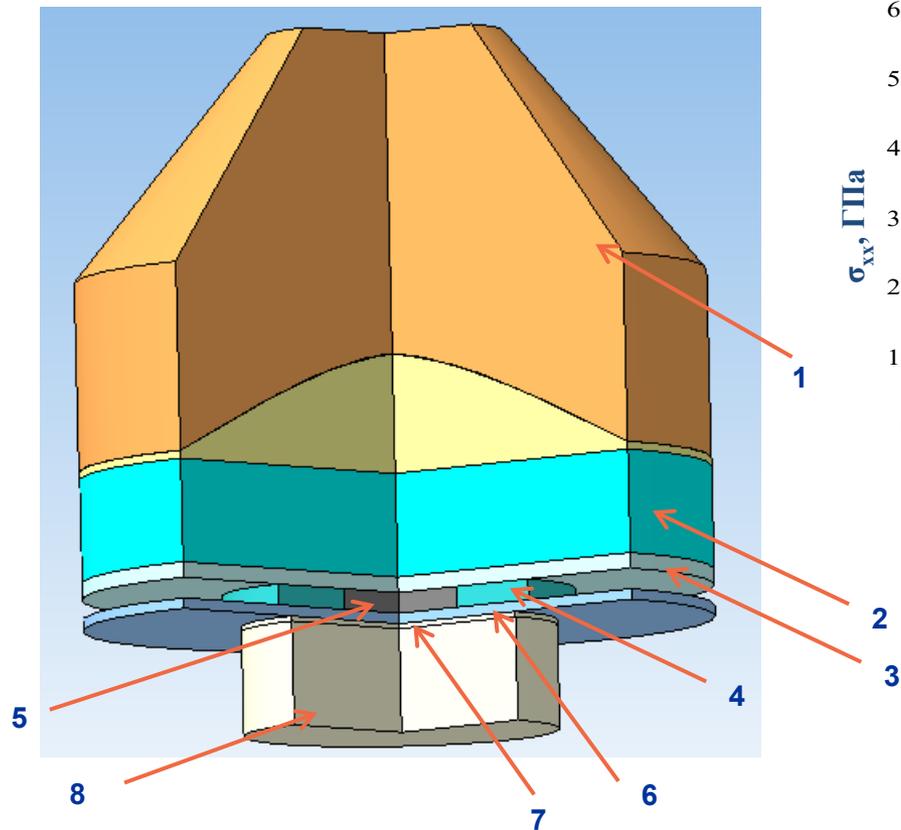
$\sigma_{0,2}=17$  МПа и  $\sigma_{\epsilon}=26$  МПа – группа №1;

$\sigma_{0,2}=28$  МПа и  $\sigma_{\epsilon}=52$  МПа – группа №2;

$\sigma_{0,2}=42$  МПа и  $\sigma_{\epsilon}=110$  МПа – группа №3;

В результате аппроксимации были получены следующие значения аппроксимирующих параметров:

Группа 1:  $A - 19,2$  МПа,  $B - 38$  МПа,  $n - 0,49$ . Группа 2:  $A - 37,1$  МПа,  $B - 87,7$  МПа,  $n - 0,65$ . Группа 3:  $A - 55,2$  МПа,  $B - 133,7$  МПа,  $n - 0,4$



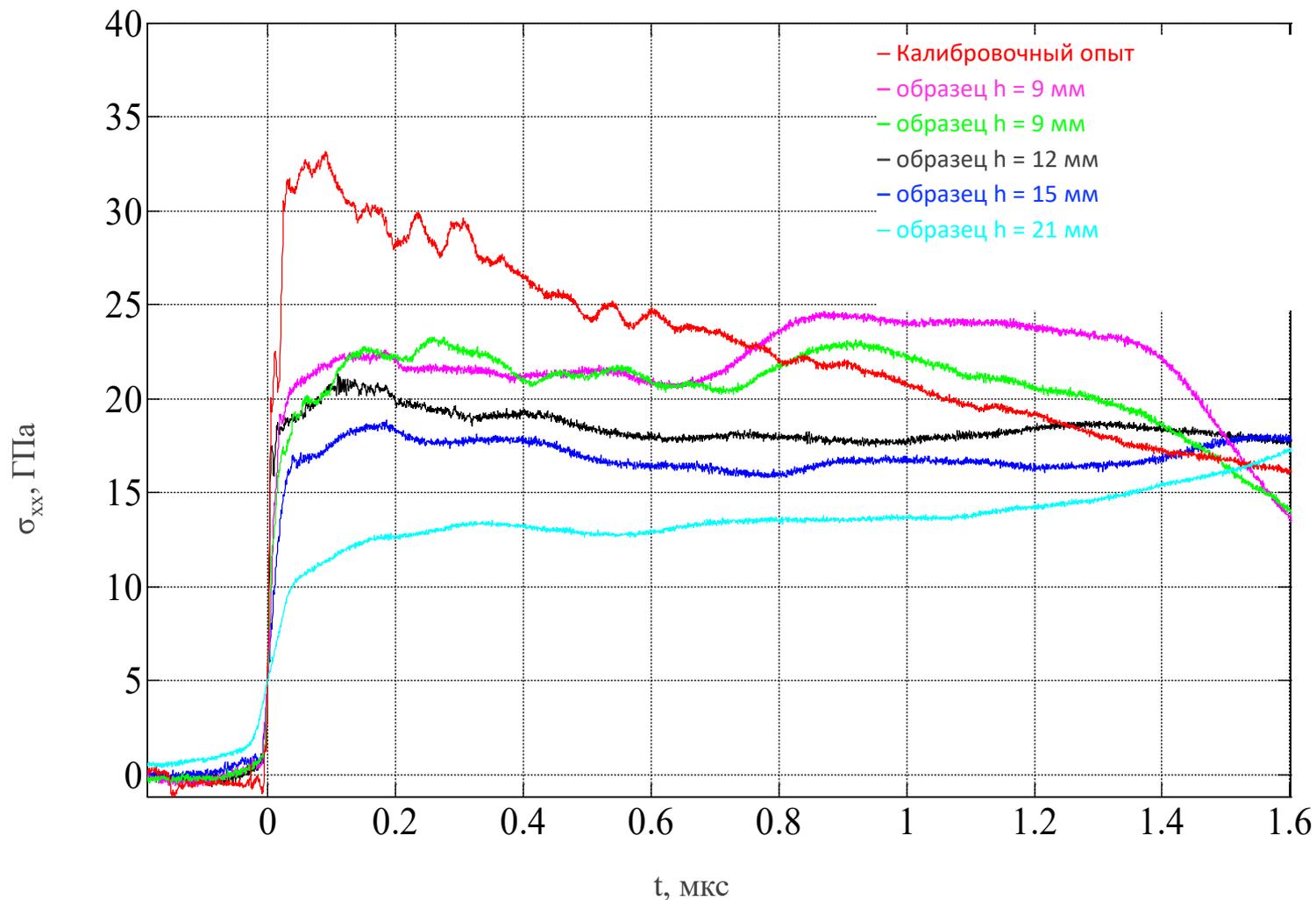
Калибровочный опыт

1,2 – заряд ВВ, 3 – алюминиевый экран  $\text{Ø} 120 \times 3$  мм,  
4 – пенопластовое кольцо  $\text{Ø} 67$  мм, толщиной 4 мм,  
5 – исследуемый образец  $30 \times 30 \times 4$  мм,  
6 – алюминиевый экран  $\text{Ø} 120 \times 2$  мм, 7 – экран  
мраморный  $\text{Ø} 60 \times 1$  мм, 8 – мрамор  $\text{Ø} 60 \times 20$  мм

# Ударно-волновые эксперименты с образцами АТ-АК6 топологии гироид



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



Объёмно-структурированный образец с периодом ячейки 3 мм —  $\rho \approx 0,7 \frac{\text{Г}}{\text{см}^3}$

# Заключение



В ходе исследований проведено более 170 экспериментов. Получены диаграммы напряжение-деформация и скорости деформации-деформация в диапазоне скоростей ударника от 7,14 до 31,2 м/с, при этом собственные скорости деформации образцов составили от  $8 \times 10^2$  до  $37 \times 10^2$  с<sup>-1</sup>. Получены коэффициенты аппроксимации по модели Джонсона-Кука как для сплошных, так и для объемно-структурированных образцов.

Изучено влияние режимов 3D печати на структуру, твердость и дефектность деталей. Показано, что при мощности лазера  $P = 100 - 200$  Вт и скорости сканирования более 400 мм/с в структуре сохраняются не проплавленные частицы порошка и присутствуют горячие трещины и поры. Для устранения этих дефектов и повышения качества деталей предложено изменение режима печати за счет снижения скорости сканирования лазерного пучка.

В результате выполненной работы исследованы образцы 3D алюминия марки АК6, имеющие, как сплошную, так и объемно-периодическую структуру. Эксперименты по нагружению методом ССГ позволили получить динамические диаграммы сжатия и растяжения в диапазоне скоростей деформации от  $10^2 - 10^3$  с<sup>-1</sup>. В ударно-волновых экспериментах получено значение затухания ударной волны в зависимости от периода решетки. По результатам опытов была проведена оценка коэффициента ослабления ударной волны в зависимости от толщины образца. При толщине образца 9 мм исходная ударная волна ослабляется в 1,5 раза, при толщине 12 мм – в 1,8 раза, при толщине 15 мм – в 2,1 раза и при толщине образца 21 мм – в 3 раза.



Спасибо за внимание