



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

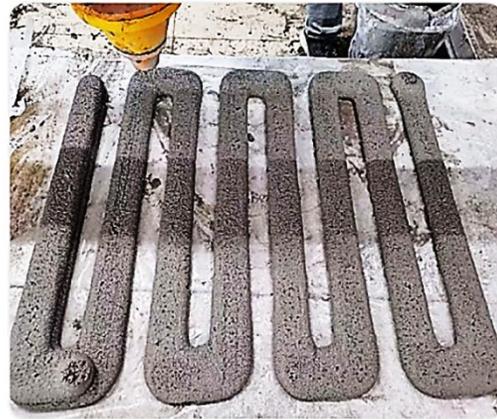
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ФИБРОБЕТОНА, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

Доцент Харун Махмуд

3D-печать строительных конструкций



Процесс подготовки образцов для испытаний



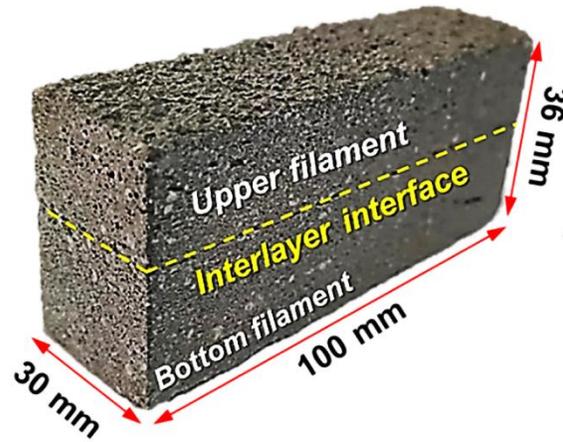
Printing



In-situ curing

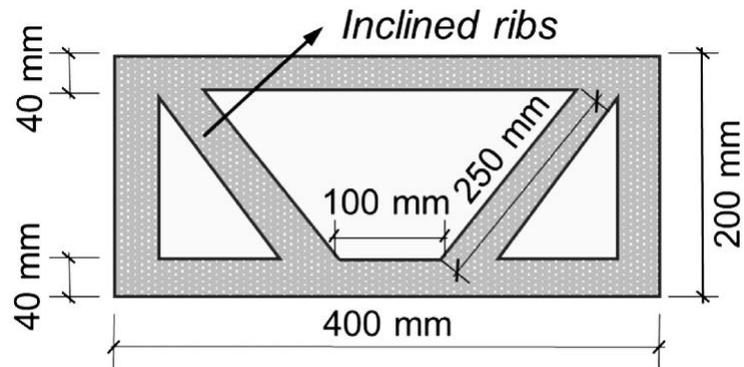
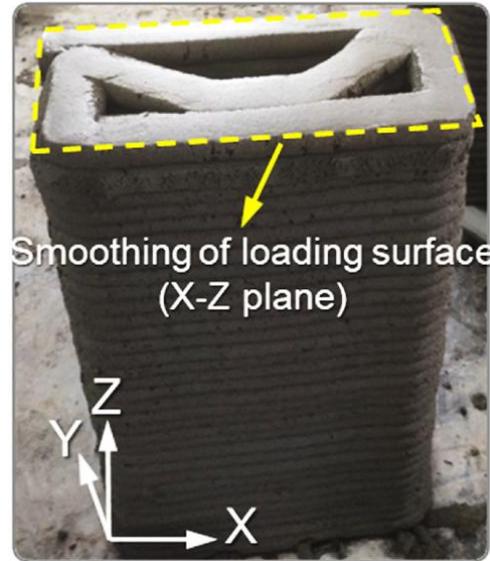


Samples cutting

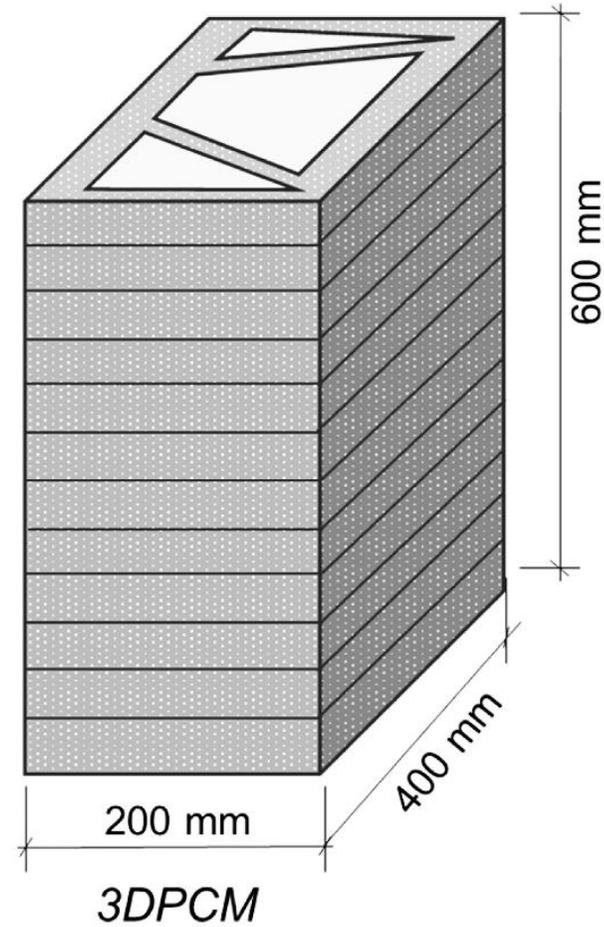


Test specimen
(монолитный образец)

Размеры образцов 3D-печатной стеновой конструкции

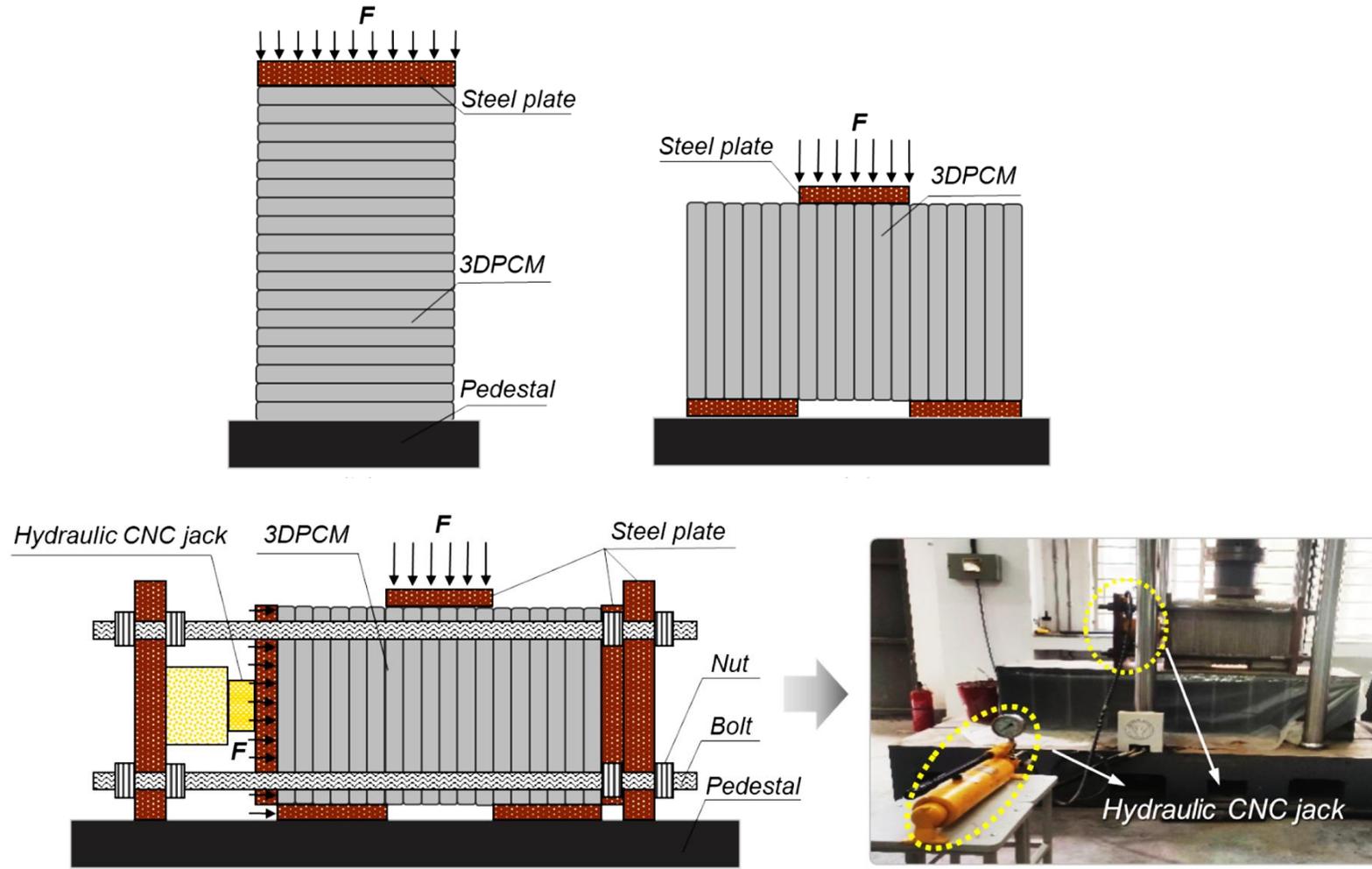


Cross-section of 3DPCM-A



3DPCM

Схема испытания фрагментов 3D-печатной стеновой конструкции: сжатие; сдвиг; комбинированное воздействие; Испытание в гидравлическом домкрате



Характер повреждений от сжатия

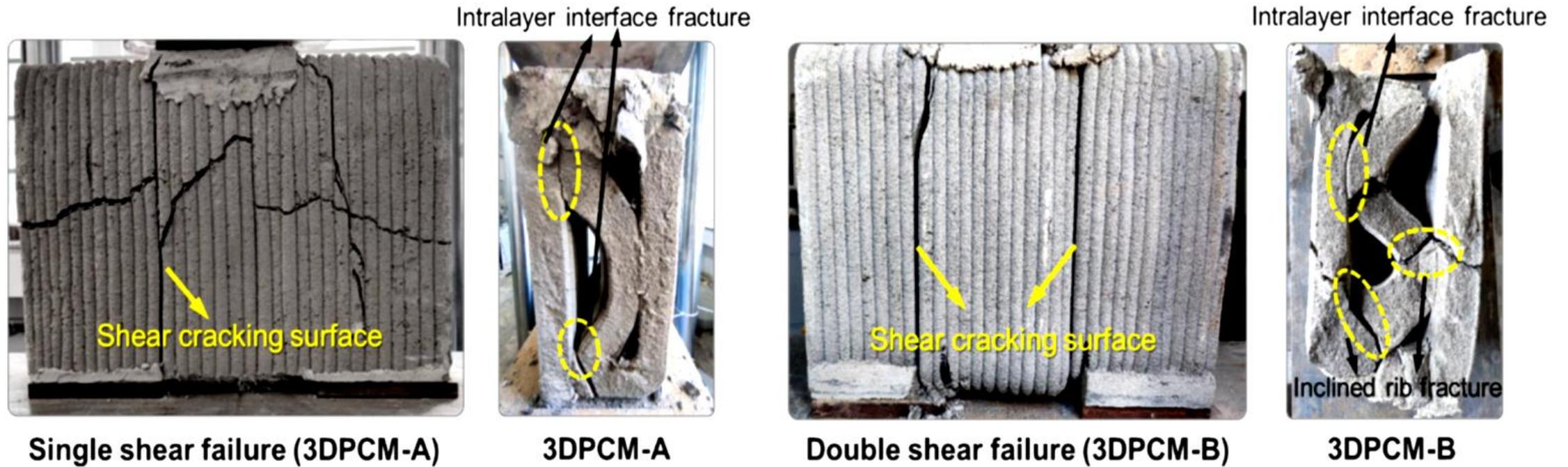


3DPCM-A

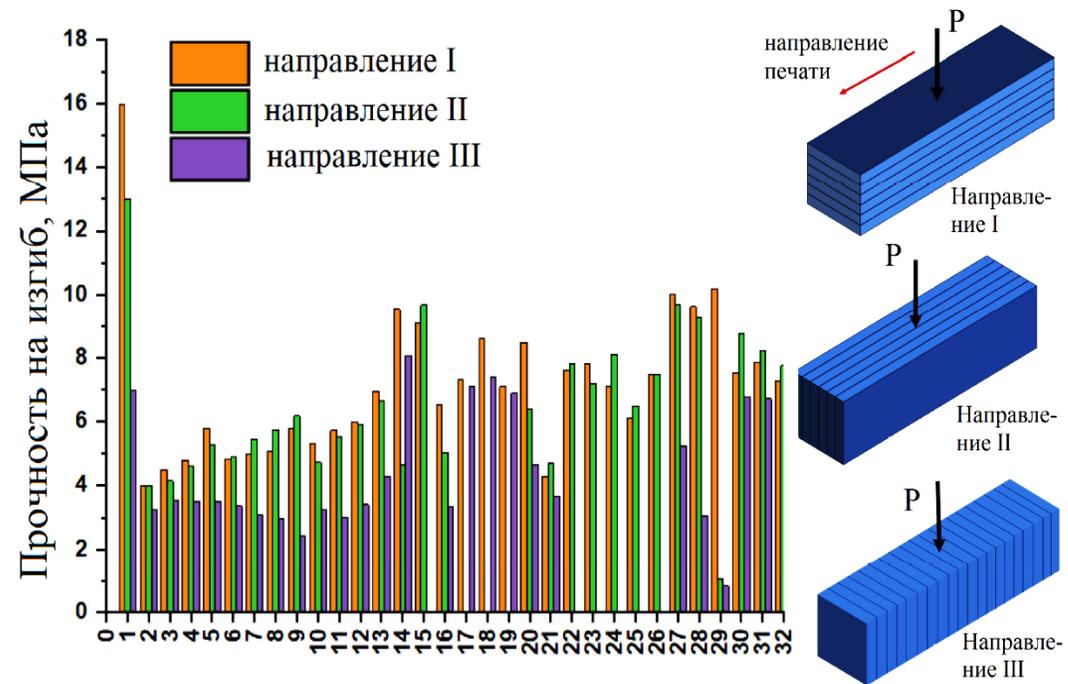
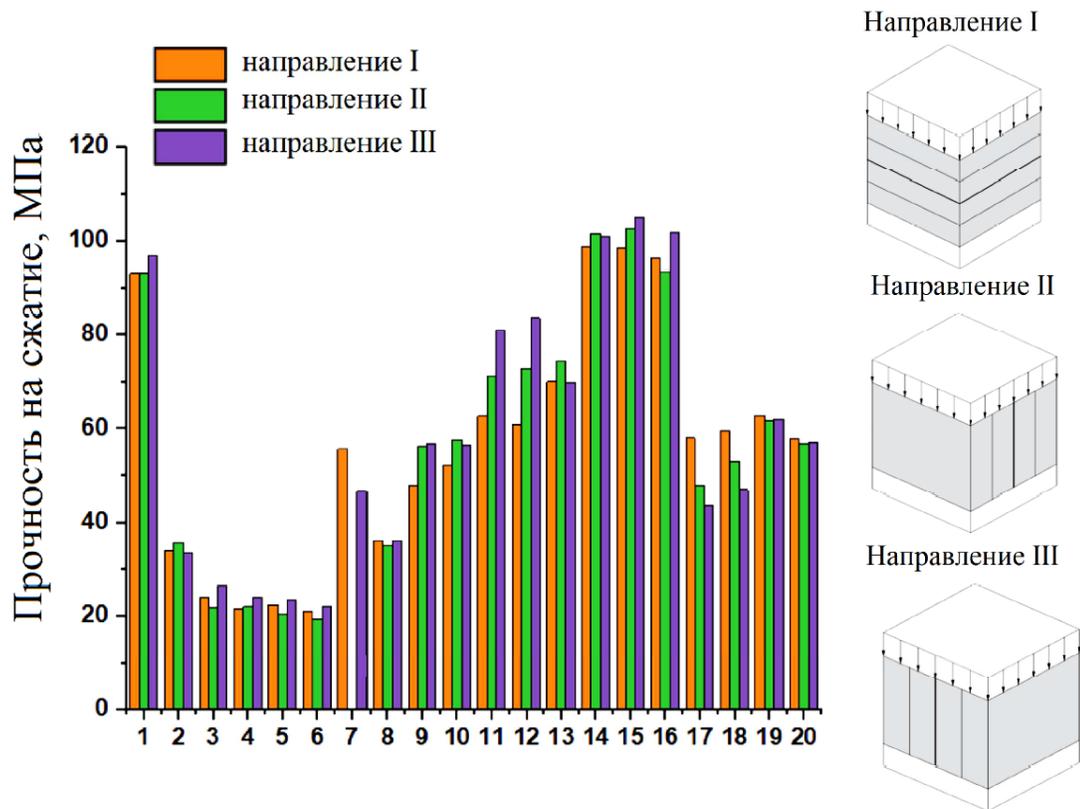


3DPCM-B

Характер повреждений от сдвига



Прочность образцов для разных направлений действия нагрузки



При действии нагрузки вдоль слоев отношение прочности напечатанных слоев к прочности монолитных образцов (R_c), изготовленных из той же смеси, составляет

$$\frac{R_{II,III}}{R_c} = 0.5 \dots 1.1$$

Соответственно, прочность поперек слоев:

$$\frac{R_I}{R_c} = 0.6 \dots 1.1$$

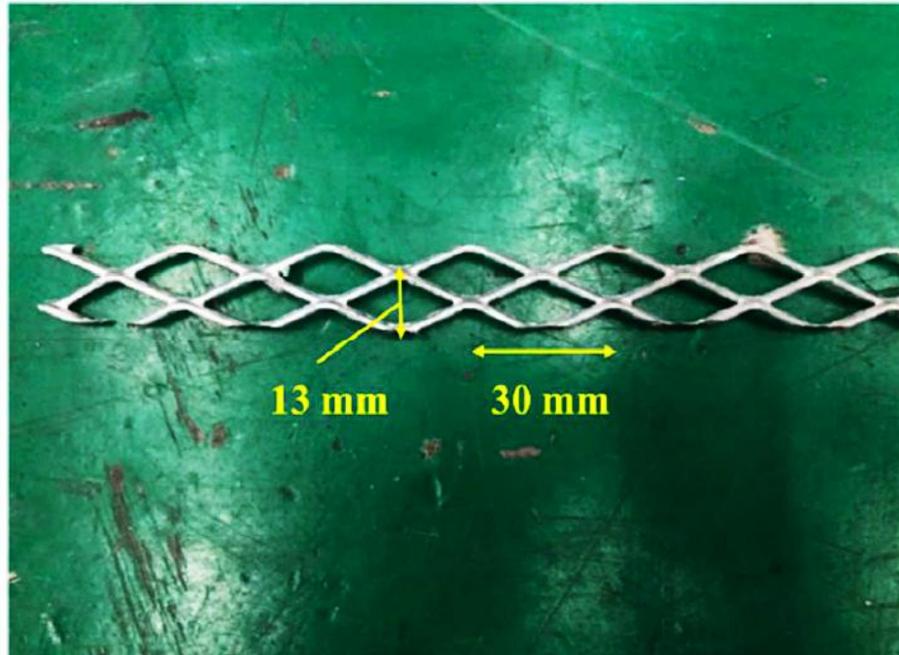
При действии нагрузки вдоль слоев отношение прочности на растяжение при изгибе напечатанных слоев к прочности монолитных образцов изготовленных из той же смеси, составляет

$$\frac{R_{fx II, III}}{R_{fc}} = 0.3 \dots 0.9$$

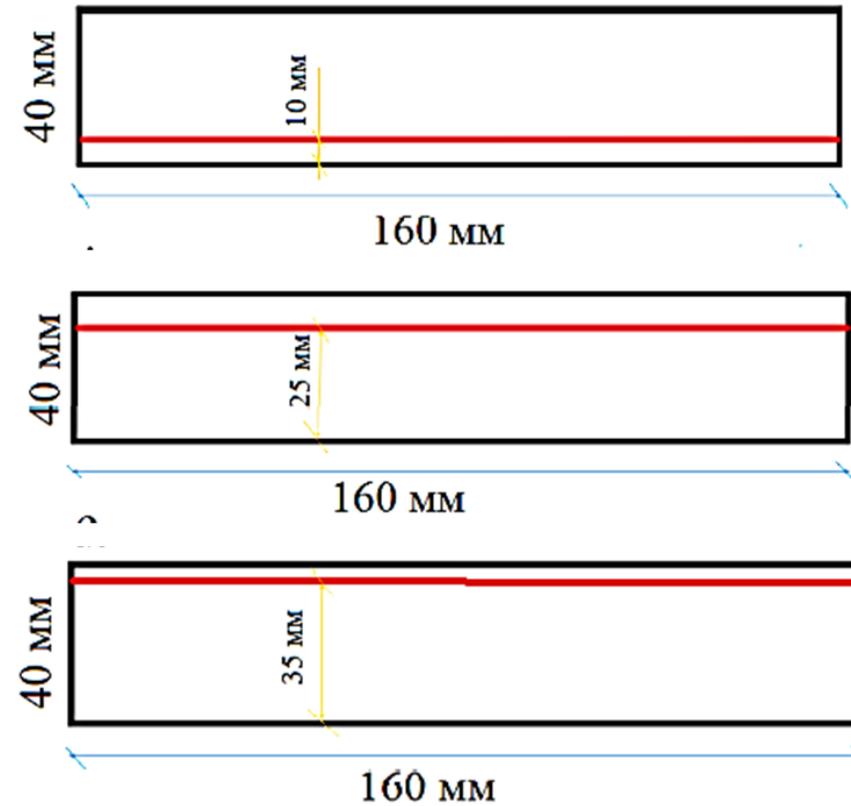
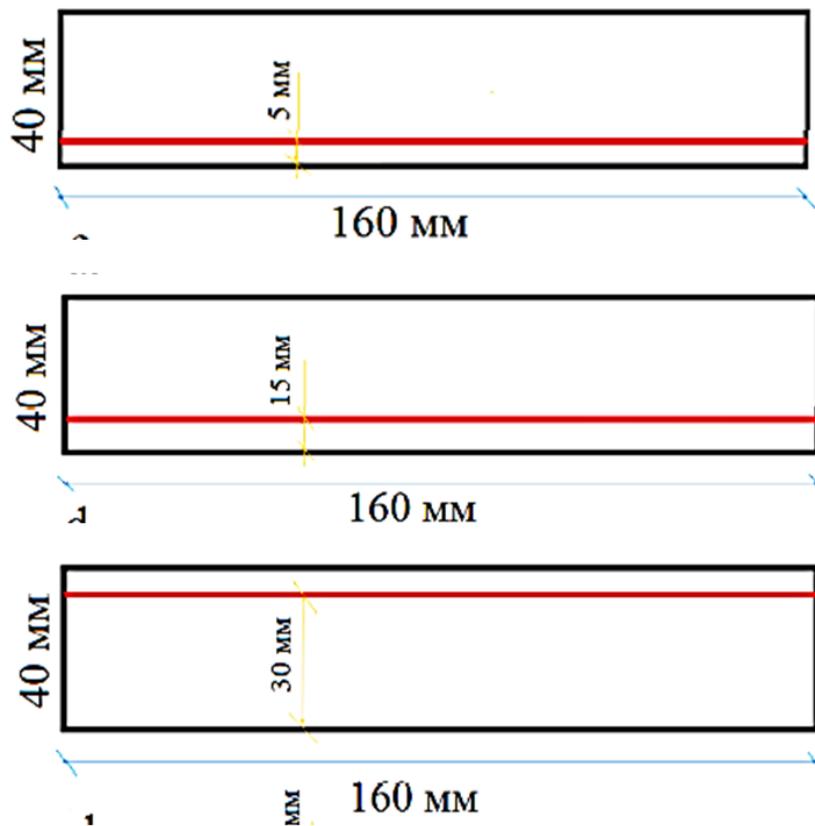
Соответственно, прочность поперек слоев:

$$\frac{R_{fx I}}{R_{fc}} = 0.9 \dots 1.3$$

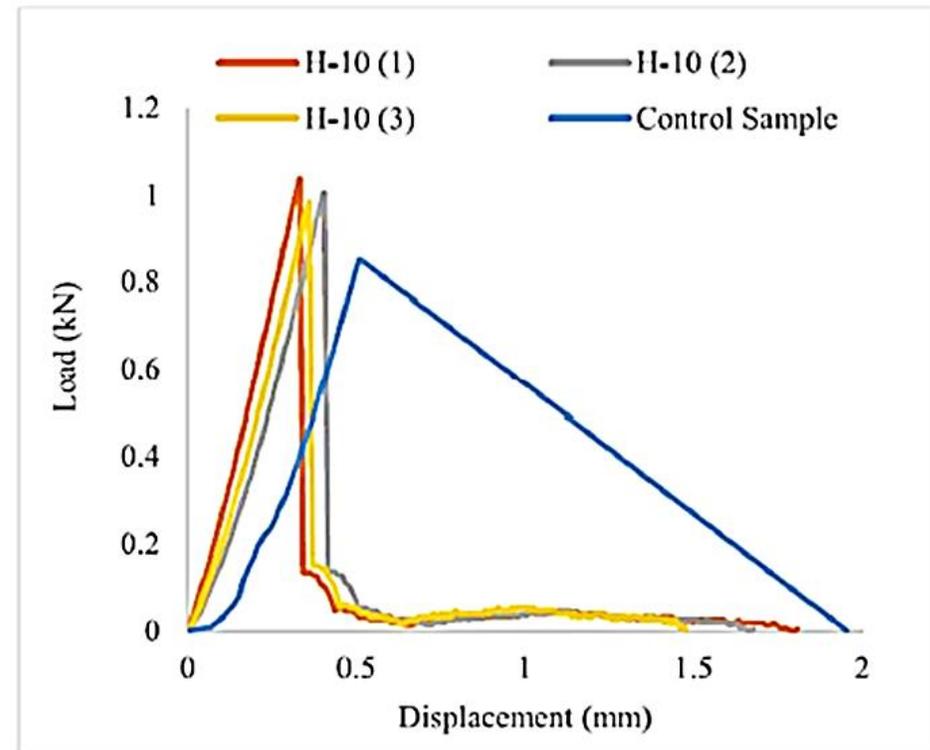
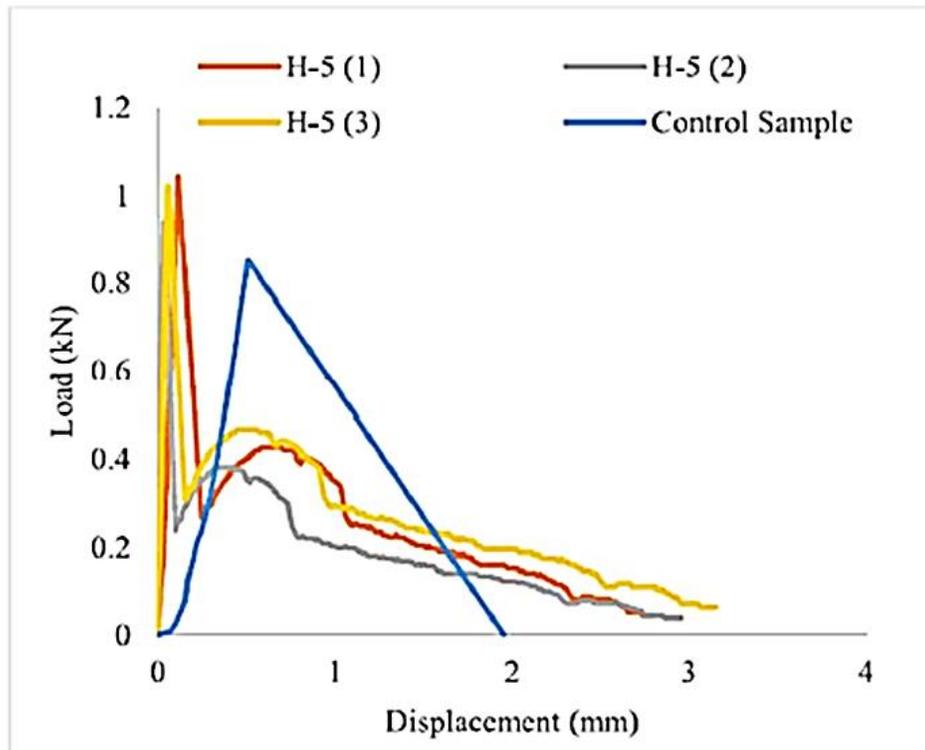
Межслойное армирование алюминиевыми рейками толщиной 2 мм в процессе 3D-печати



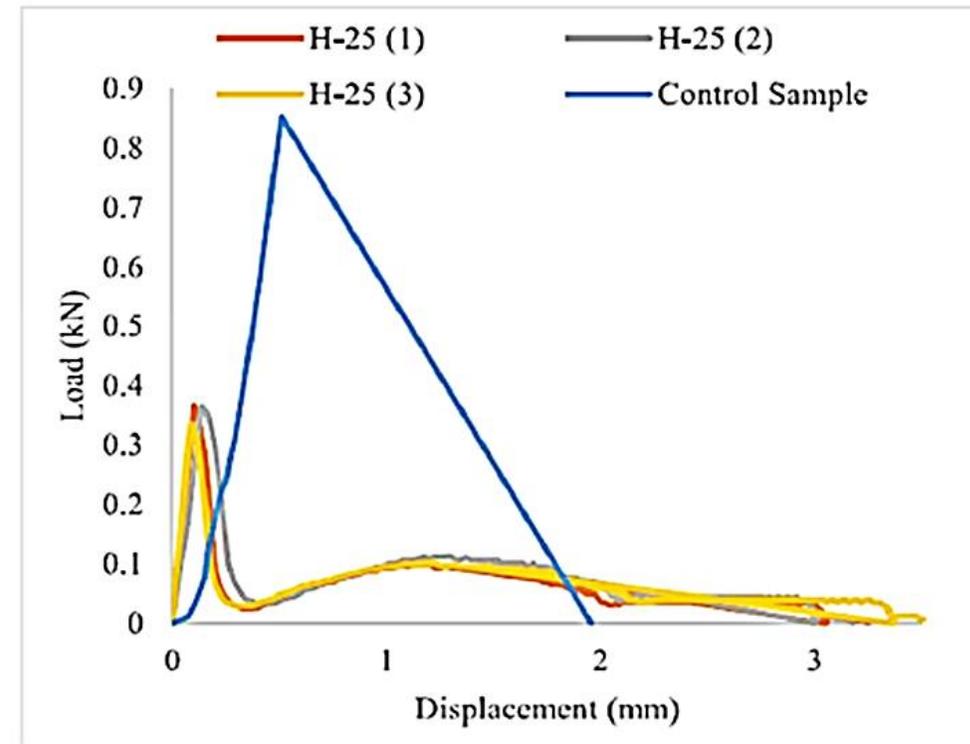
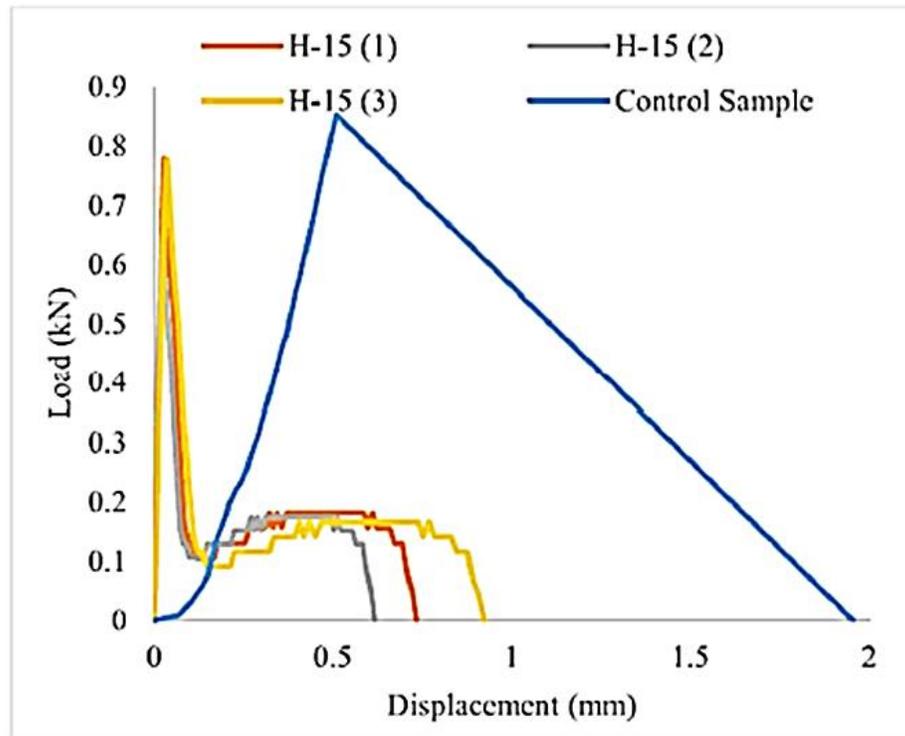
Варианты расположения армирующих реек в образцах



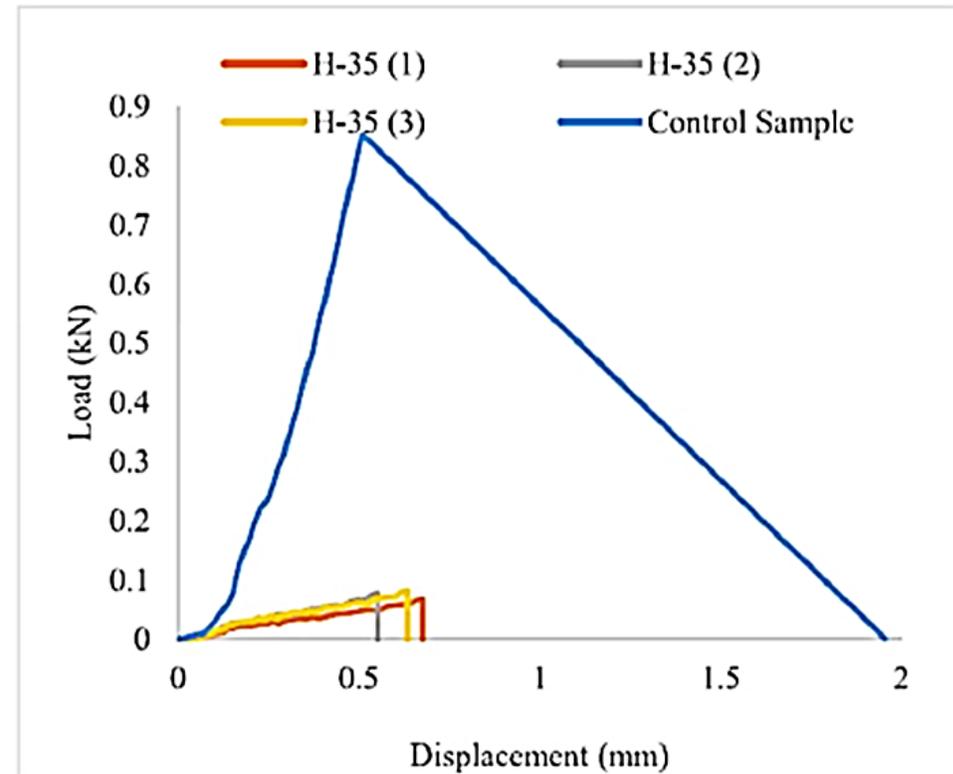
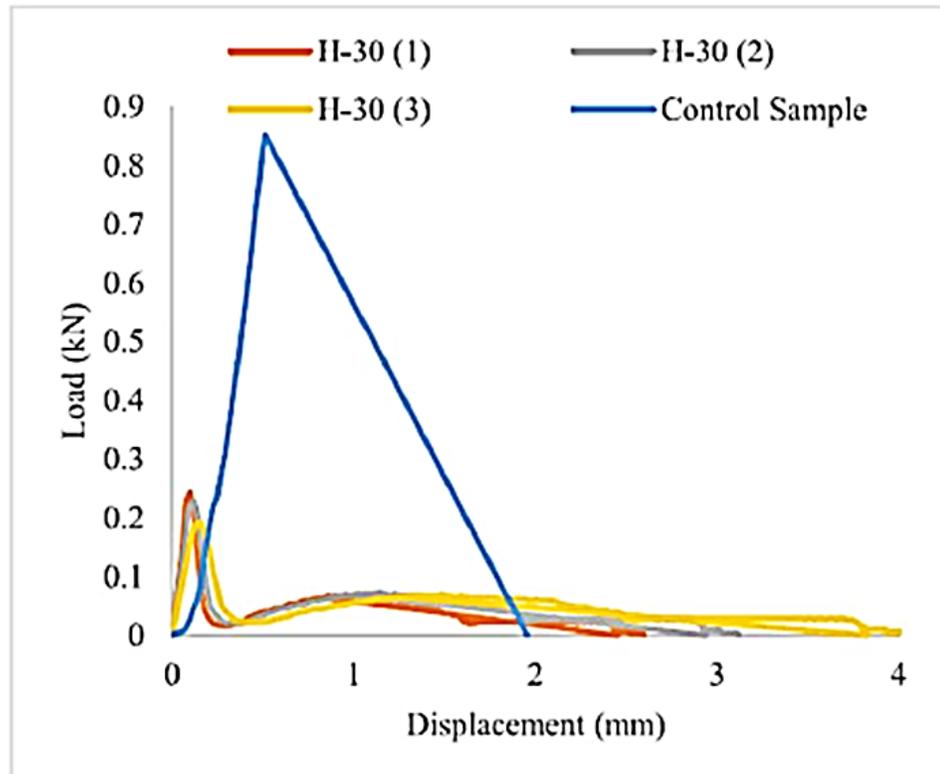
Зависимость «нагрузка-прогиб» с различным расположением армирующих реек



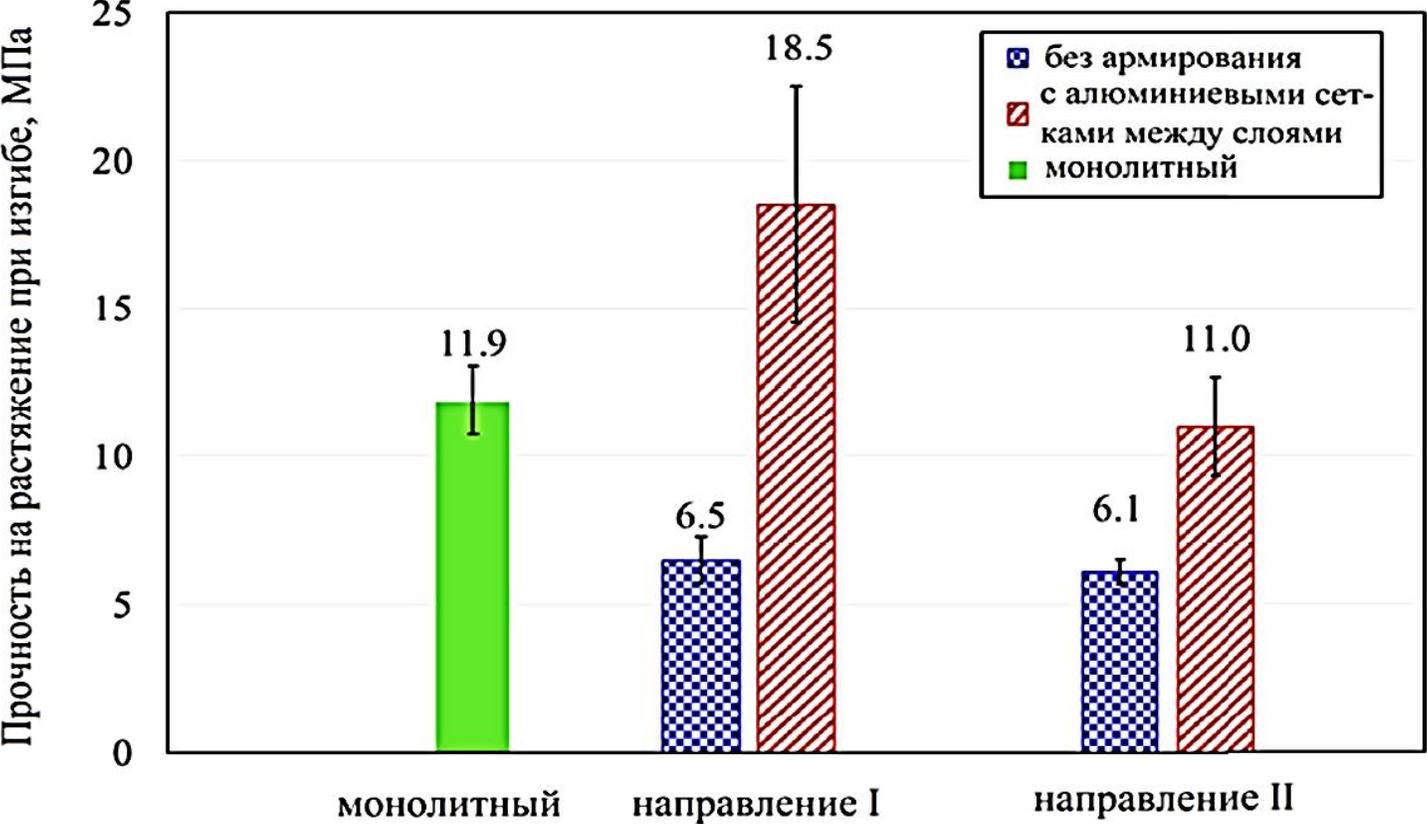
Зависимость «нагрузка-прогиб» с различным расположением армирующих реек



Зависимость «нагрузка-прогиб» с различным расположением армирующих реек



Прочность на растяжение при изгибе монолитных образцов и образцов, вырезанных из 3D-печатной конструкции при нагружении поперек слоев (направление I) и вдоль слоев (направление II)

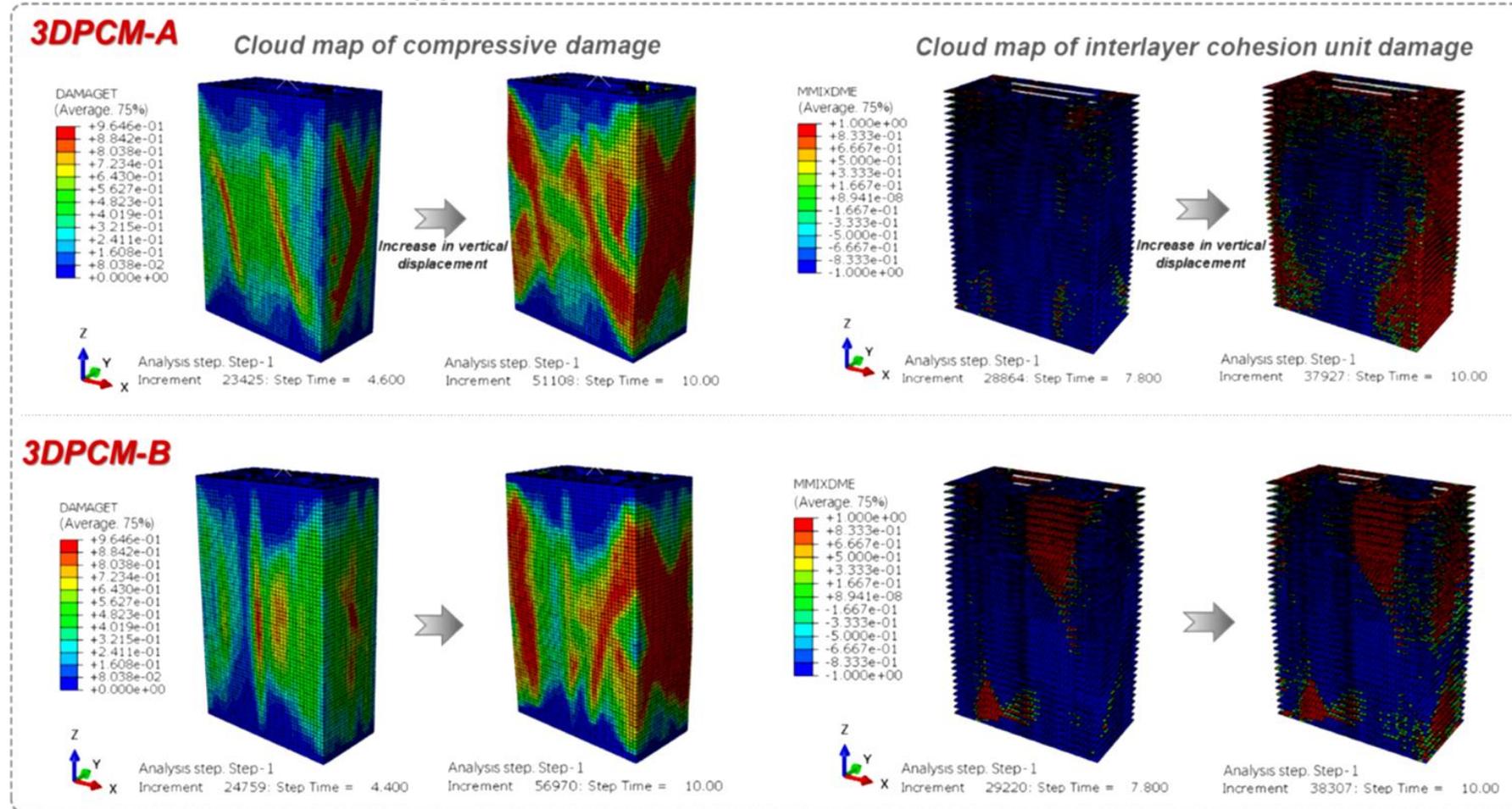


Проведенное исследование позволило сделать следующие выводы:

1. Согласно полученным результатам, использование армирующих элементов дает наибольшее увеличение прочности и жесткости на изгиб.
2. Разрушение 3D-печатных стеновых конструкций под действием внешней нагрузки начинается преимущественно в межслойных областях, что напоминает картину разрушения при сдвиге, наблюдаемую в швах традиционных каменных конструкций.
3. Можно использовать результаты испытаний для оценки точности расчетов аналогичных конструкций методом конечных элементов.

Карта распределения напряжений при нагружении

(a) Numerical simulation of compressive loading



Метод определения прочности 3D-печатных конструкций

Нормативное значение прочности на сжатие 3D-печатных конструкций:

$$f_{3D,k} = f_{3D,m} \cdot (1 - 1.645 \cdot \delta_f)$$

где δ_f – коэффициент вариации для прочности на сжатие;

$f_{3D,m}$ – среднее значение прочности на сжатие напечатанного фибробетона, определяемое по формуле:

$$f_{3D,m} = \beta \cdot k \cdot f_{3D}^\alpha$$

где $\beta = 0.8$ – коэффициент, учитывающий слабое взаимодействие между слоями и рядами 3D-печати;

$k = 0.77$ – параметр, зависящий от технологии печати;

$\alpha = 0.9$ – коэффициент влияния;

f – среднее значение прочности на сжатие смеси в МПа.

Метод определения прочности 3D-печатных конструкций

Для получения расчетного значения прочности на сжатие 3D-печатных конструкций нормативное значение делится на коэффициент $\gamma_f = 1.6$.

$$f = \frac{f_{3D,k}}{\gamma_f}$$

Поскольку при 3D-печати в бетоне возникают дефекты в зоне контакта слоев и рядов, а также зоны повышенной пористости бетона, метод расчета прочности на сдвиг таких конструкций отличается от метода расчета прочности на сдвиг обычной каменной кладки.

Для учета всех этих дефектов вводится коэффициент α .

Тогда выражение для расчета прочности на сдвиг (в МПа) будет:

$$f_{sD,v,m} = \alpha \cdot k_5 \cdot \sqrt{f_{3D}}$$

k_5 – параметр, который в Китайских нормах по расчету каменной кладки рекомендуется принимать равным 0.652.

Метод определения прочности 3D-печатных конструкций

Нормативное значение прочности на сдвиг:

$$f_{3D,v,k} = f_{3D,v,m} \cdot (1 - 1.645 \cdot \delta_f)$$

δ_f – коэффициент вариации для прочности на сдвиг.

Расчетное значение прочности на сдвиг:

$$f_{3D,v} = \frac{f_{3D,v,k}}{\gamma_f} = \frac{f_{3D,v,k}}{1.6}$$

Метод определения прочности 3D-печатных конструкций

Уравнение для расчета прочности 3D-печатных конструкций при совместном действии сжатия со сдвигом получено на основе теории трения при сдвиге с переменным коэффициентом трения.

В зависимости от отношения величины сжимающего осевого давления σ_0 к средней прочности на сжатие f_m предложены следующие зависимости для определения значения средней прочности

на сдвиг при сжатии со сдвигом при $0 < \frac{\sigma_0}{f_m} \leq 0.1$ (разрушение от сжатия):

$$f_{v,m} = f_{v0,m} + \mu_1 \cdot \sigma_0 = 0.135 \cdot f_m + 1.85 \cdot \sigma_0$$

где μ_1 – коэффициент трения, $\mu_1 = 1.85$.

Метод определения прочности 3D-печатных конструкций

при $0.1 < \frac{\sigma_0}{f_m} \leq 0.6$ (разрушение от сдвига):

$$f_{v,m} = f_{v0,m} + \mu_2 \cdot \sigma_0 = 0.135 \cdot f_m + \mu_2 \cdot \sigma_0$$

μ_2 – коэффициент трения

$$\mu_2 = 0.183 \cdot \frac{f_m}{\sigma_0} - 0.073 + 1.075 \cdot \frac{\sigma_0}{f_m} - 1.417 \cdot \frac{\sigma_0^2}{f_m^2}$$

где $f_{v0,m} = 0.135 \cdot f_m$ – средняя прочность на сдвиг кладки без вертикальных нормальных напряжений.



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

THANK YOU FOR YOUR ATTENTION