

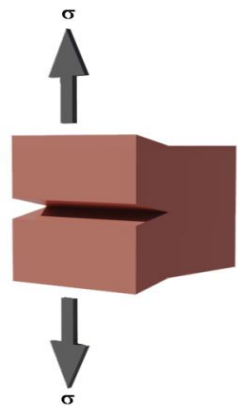


Расчет на прочность и трещиностойкость элементов конструкций

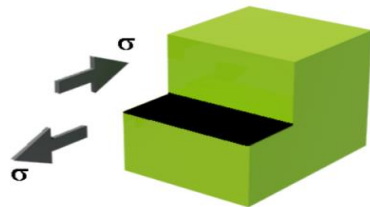
Основные величины ЛУМР:

- коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) K_I , K_{II} , K_{III} ;
- инвариантный J -интеграл;
- интенсивность выделения энергии G (G_I , G_{II} , G_{III});

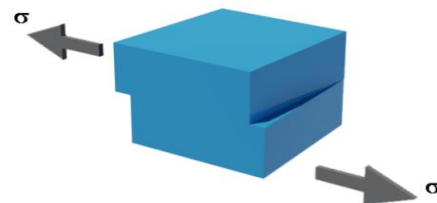
Базовые типы трещин:



Трещина отрыва

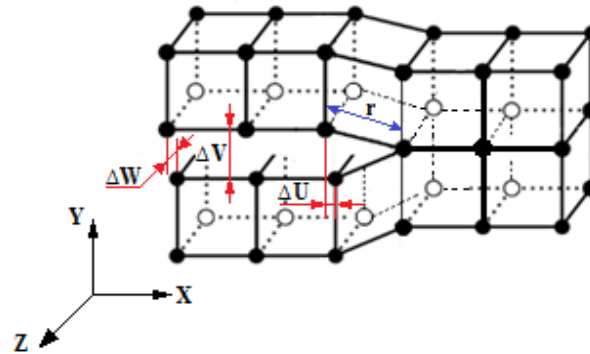


Трещина поперечного сдвига

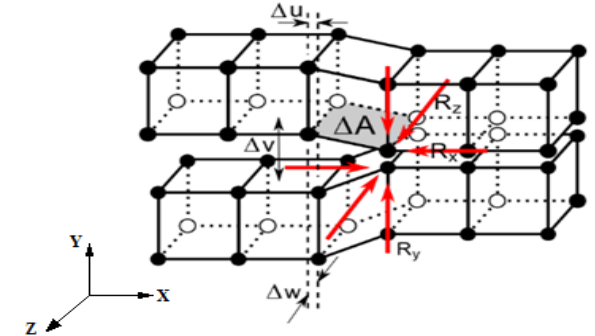


Трещина продольного сдвига

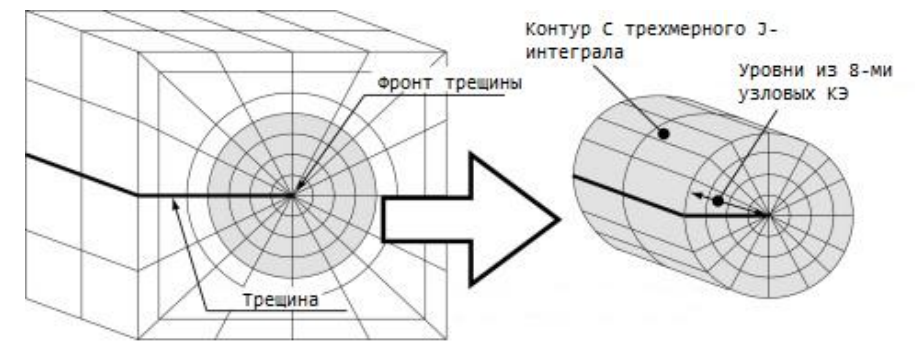
Вычисление K_I , K_{II} , K_{III}

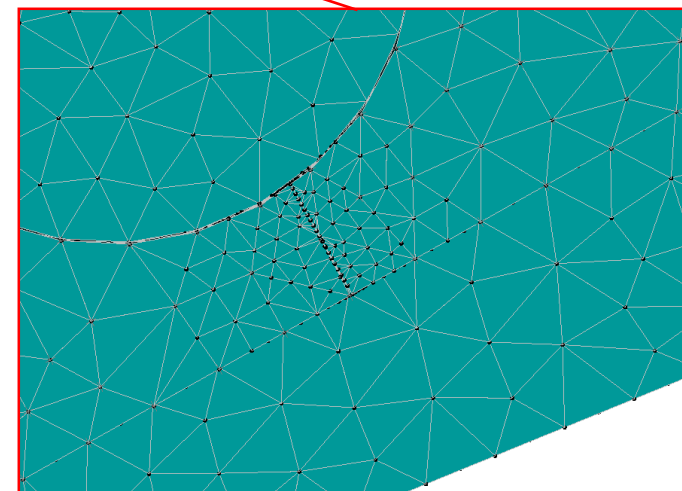
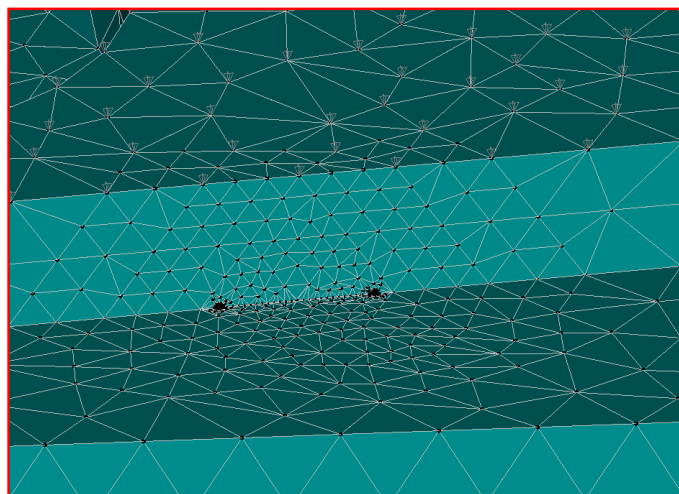
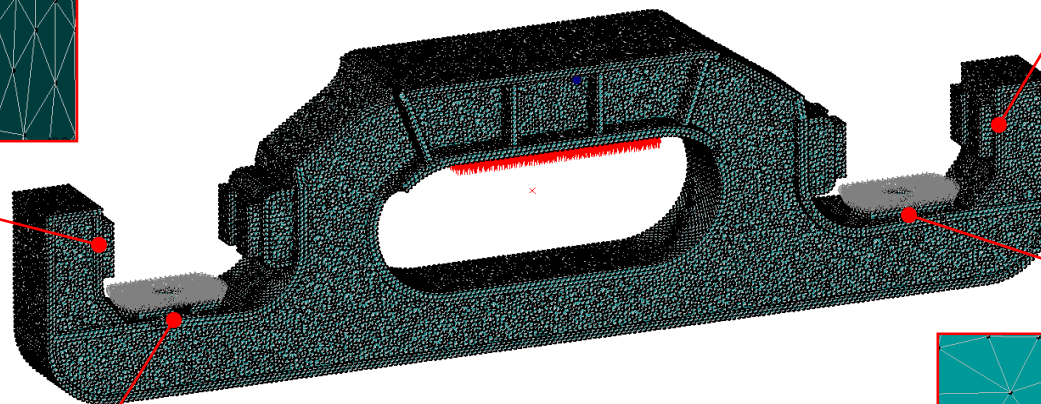
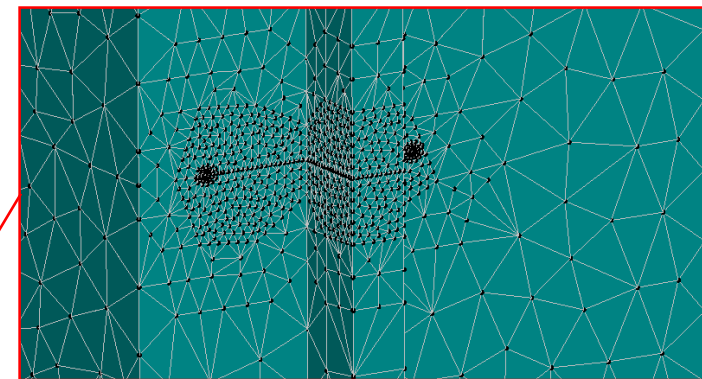
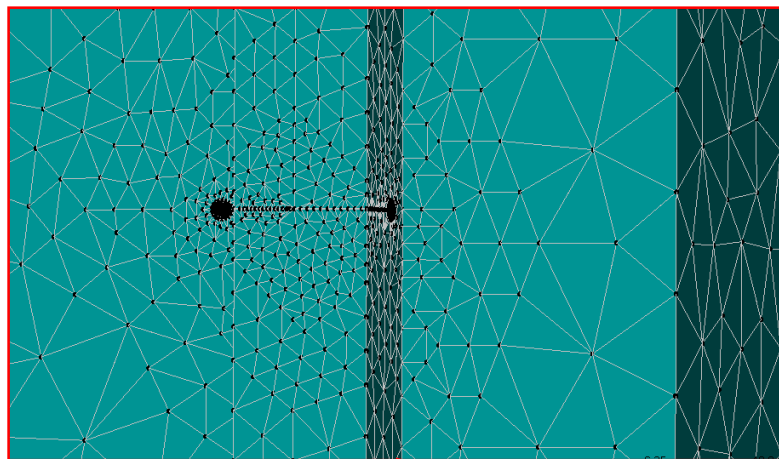


Вычисление G_I , G_{II} , G_{III}



Вычисление J -интеграла





- 1) Какие размеры трещины являются критическими при данной нагрузке;
- 2) Какая нагрузка является критической для текущих размеров трещины;
- 3) Возможна ли дальнейшая эксплуатация конструкций с трещиной.

Встроить трещину в модель (4-узловые тетраэдры) Статический расчет

Встроить трещину в модель

Параметры трещины

Номер узла:

Ориентация ЛСК трещины по осям ГСК

Ось Xтр:

Ось Yтр:

Размеры трещины, мм

L: delta: 2a:

Моделирование

☐ Кол-во уровней:

☒ Диаметр, мм:

Зона тетраэдров от начала / конца фронта трещины:

Кол-во контуров J-интеграла:

Номер контура J-интеграла:

Степень сгущения сетки у фронта трещины:

Вычислить параметры

☐ J-интеграл

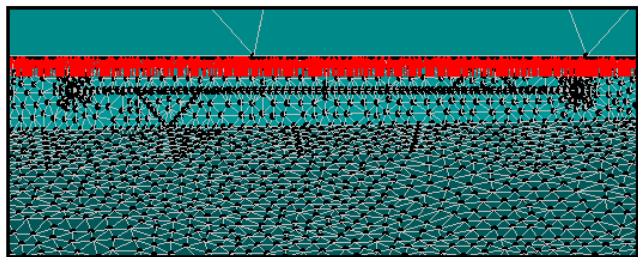
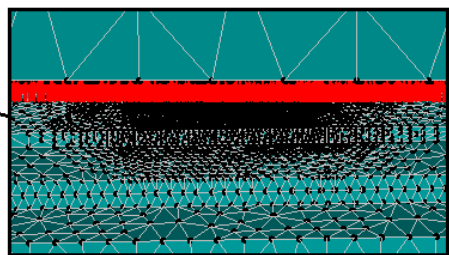
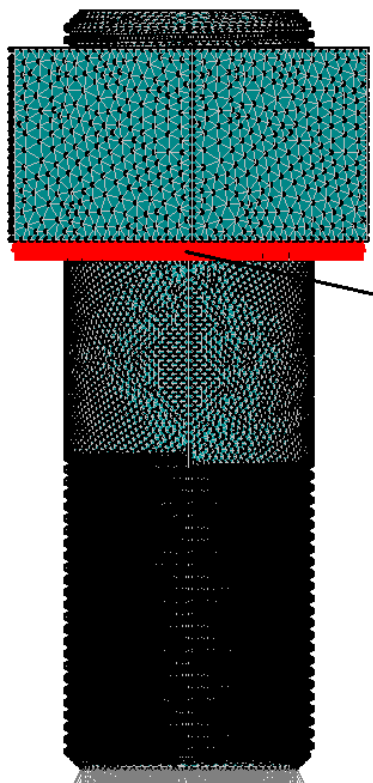
☐ GI, GII, GIII

☐ KI, KII, KIII

Вычислить параметры усталостного расчета

☐ Число циклов до разрушения по Парису (Np)

☐ Коэф. запаса для случайных нагружений



=====

Коэффициент интенсивности напряжений (КИН), МПа*м^{1/2}

Номер узла	KI	KII	KIII
...
882	217.844	-0.101617	0.279851
866	217.988	-0.381671	-0.00498344
868	217.623	0.051964	0.0915563
...

Максимальное значение, KI_{max}: 217.988 в узле номер: 866

Максимальное значение, KII_{max}: 0.141116 в узле номер: 883

Максимальное значение, KIII_{max}: 0.487984 в узле номер: 823

Интенсивность выделения энергий, МПа*м

Номер узла	GI	GII	GIII
...
882	0.150024	-0.000110492	2.20302e-05
866	0.150128	7.54672e-05	2.50488e-05
868	0.149817	-5.36855e-05	1.20736e-06
...

Максимальное значение, GI_{max}: 0.150128 в узле номер: 866

Максимальное значение, GII_{max}: 0.000483466 в узле номер: 877

Максимальное значение, GIII_{max}: 0.000390791 в узле номер: 809

J - интеграл, МПа*м

Номер узла	Контур № 1	Контур № 2	Контур № 3
...
882	0.0081495	0.0939438	0.0823567
866	0.00750086	0.0904216	0.0796603
868	0.00673259	0.086749	0.0764518
...

Максимальное значение J-интеграла, J_{max}: 0.14354 в узле номер: 30

*** Вывод ***

Критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, KI_c: 2055 МПа*м^{1/2}

KI_c >= KI_{max} - эксплуатация конструкций с трещиной при заданных условиях нагружения считается безопасной

Повторно-переменные (гармонические) нагрузки

Встроить трещину в модель

Параметры трещины

Номер узла: 0

Ориентация ЛСК трещины по осям ГСК

Ось Xтр: 0, 0, 0

Ось Yтр: 0, 0, 0

Ось Zтр: 0, 0, 0

Размеры трещины, мм

L: 0, delta: 0, 2a: 0

Моделирование

☐ Кол-во уровней: 40

☒ Диаметр, мм: 40

Зона тетраэдров от начала / конца фронта трещины: 40

Кол-во контуров J-интеграла: 3

Номер контура J-интеграла: 2

Степень сгущения сетки у фронта трещины: 40

Вычислить параметры

☐ J-интеграл

☐ GI, GII, GIII

☐ KI, KII, KIII

Вычислить параметры усталостного расчета

☐ Число циклов до разрушения по Парису (Np) ☐ Коэф. запаса для случайных нагрузок

Параметры усталостного расчёта

Простейший расчет | Материалы | Асимметрия нагрузки | Параметры разрушения

Статический расчёт соответствует

☐ Минимум (3) Коэф. для макс. точки(1): -1

☒ Максимум (1) Коэф. для мин. точки(3): 0

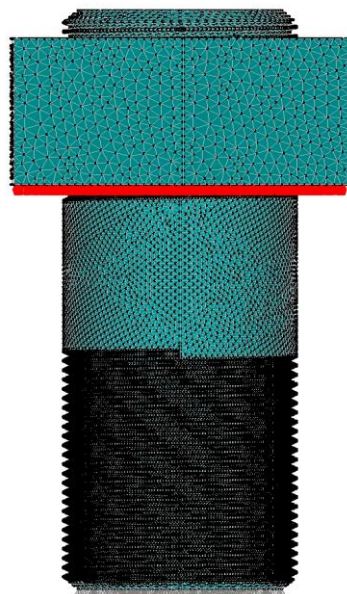
☐ Произв. точка (2)

1 2 3

Кнопка 1 - проведение усталостного расчёта для нагрузки с постоянным значением максимума и минимума по результатам статического расчёта.

Кнопка 2 - проведение усталостного расчёта для случайной нагрузки по результатам статического расчёта.

Кнопка 3 - проведение усталостного расчёта для случайной нагрузки по результатам расчёта вынужденных колебаний.



Коэффициент интенсивности напряжений (КИН), МПа*мм^(1/2)

Номер узла	KI	KII	KIII
...
6010	555.223	-0.459925	0.029687
6011	539.997	-0.429137	0.973412
6012	522.189	-1.28784	1.47825
5993	502.84	-2.44388	0.246429
5990	480.95	-2.12521	-1.19417
5987	456.291	-0.840602	-1.09473

Максимальное значение, KImax: 1638.34 в узле номер: 5882

Максимальное значение, KIImax: 3.2259 в узле номер: 5934

Максимальное значение, KIIImax: 1.61223 в узле номер: 5972

Вывод:

Критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, KIs: 4508 МПа*мм^(1/2)

KIs >= KImax - эксплуатация конструкций с трещиной при заданных условиях нагружения считается безопасной

Число циклов до разрушения по Парису

Номер узла	Число циклов, N
...	...
6010	6920584
6011	7497556
6012	8241214
5993	9154430
5990	10342104
5987	11922521

Максимальное число циклов до разрушения, Nmax: 1.19225e+07 в узле номер: 5987

Минимальное число циклов до разрушения, Nmin: 75423 в узле номер: 5882

Вывод:

Минимальное число циклов до разрушения, Nmin: : 75423

Стохастические нагрузки

Встроить трещину в модель

Параметры трещины

Номер узла:

Ориентация ЛСК трещины по осям ГСК

Ось Хтр:

Ось Yтр:

Размеры трещины, мм

L: delta: 2a:

Моделирование

☐ Кол-во уровней:

☒ Диаметр, мм

Зона тетраэдров от начала / конца фронта трещины:

Кол-во контуров J-интеграла:

Номер контура J-интеграла:

Степень сгущения сетки у фронта трещины:

Вычислить параметры

☐ J-интеграл

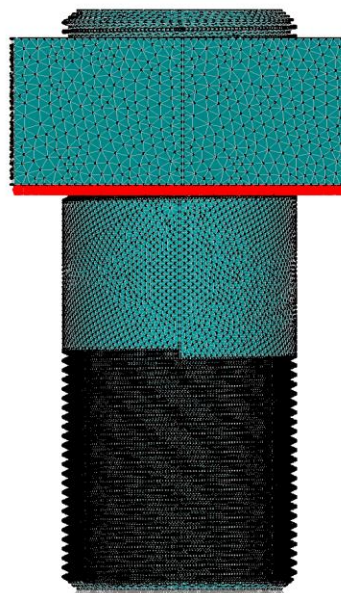
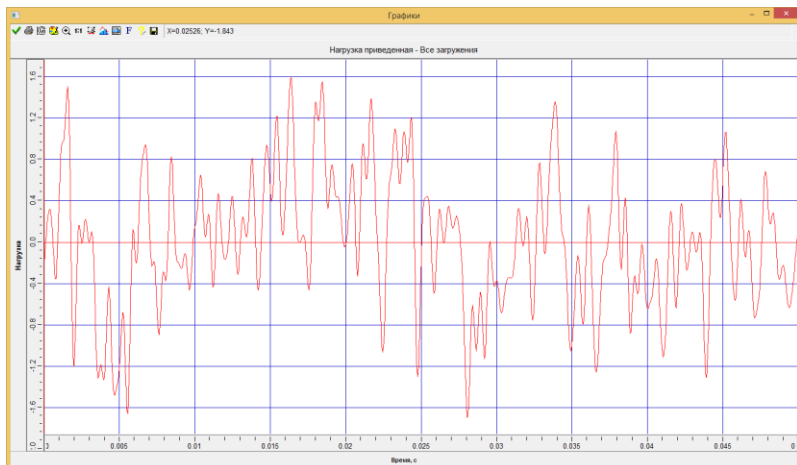
☐ GI, GII, GIII

☐ KI, KII, KIII

Вычислить параметры усталостного расчета

☐ Число циклов до разрушения по Парису (Np)

☒ Коэф. запаса для случайных нагружений



Коэф. запаса по усталостной прочности для случайных нагружений

Номер узла Коэф. запаса

3953	238.34
3957	179.524
3958	140.321
3959	112.575
3961	92.3145
3954	76.8636
3955	64.5006
3890	54.3843
3891	45.8023
3892	38.411
3893	31.8947
3881	25.8788
3894	20.0395
3895	13.8466
3896	6.35763
3887	0.491611
3884	0.490873
3885	0.490153
3897	0.489481
3886	0.488927
3898	0.488521
3899	0.488335
3900	0.488376
3882	0.488589
3883	0.488972
3888	0.489509
3889	0.490146
3930	0.490855
3939	0.491602
3920	6.51504
3903	14.2086
3924	20.4816
3946	26.3816
3923	32.3881
3927	38.8837
3947	46.2541
3948	54.8428
3907	65.1323
3908	77.6876
3909	93.4539
3928	113.971
3951	141.473
3926	179.529
3949	237.205

Максимальное значение коэф. запаса: 238.34 в узле номер: 3953
 Минимальное значение коэф. запаса: 0.488335 в узле номер: 3899

Теории прочности из сопротивления материалов:

- теория максимальных касательных напряжений (для квазихрупких материалов);
- теория формоизменения (для квазихрупких материалов);
- теория Мора (для хрупких материалов);

Критерии из ЛУМР:

- суммарное значение интенсивности выделения энергий ($G_{\text{sum}} = G_I + G_{II} + G_{III}$);
- комбинированный критерий (Гриффицс + энергия формоизменения) ;

Параметры расчета

Армирование

Нормативы

Вынужденные колебания

Статический расчет

Топологическая оптимизация

Нелинейный расчет

Устойчивость

Собственные колебания

Тип расчета

Геометрическая нелинейность

Точность нелинейного расчета

0.0001

Максимальное количество итераций нелинейного расчета

30

Количество шагов по нагрузке

1

☒ Вычислять невязку по усилиям

☐ Вычислять невязку по перемещениям

☐ Следящая нагрузка

☐ Добавлять геометрическую матрицу

☐ Считать разгрузку

Sparse_IDL

OK

Отмена

Применить



?

×

Расчет

☐ Линейный статический расчет

☐ Расчет устойчивости

☐ Собственные частоты

☒ Нелинейный расчет

для загрузки

Загрузка 0

Метод

LDL

Трещины-жизнь/смерть элементов

☐ Следящая нагрузка

Шагов по нагрузке

1

☐ Считать разгрузку

☐ Добавлять геометрическую матрицу

☐ Топологическая оптимизация

☐ Вынужденные колебания

☐ Расчет стационарной теплопроводности

☐ Расчет нестационарной теплопроводности

☐ Расчет постоянных токов

☐ Электростатический расчет

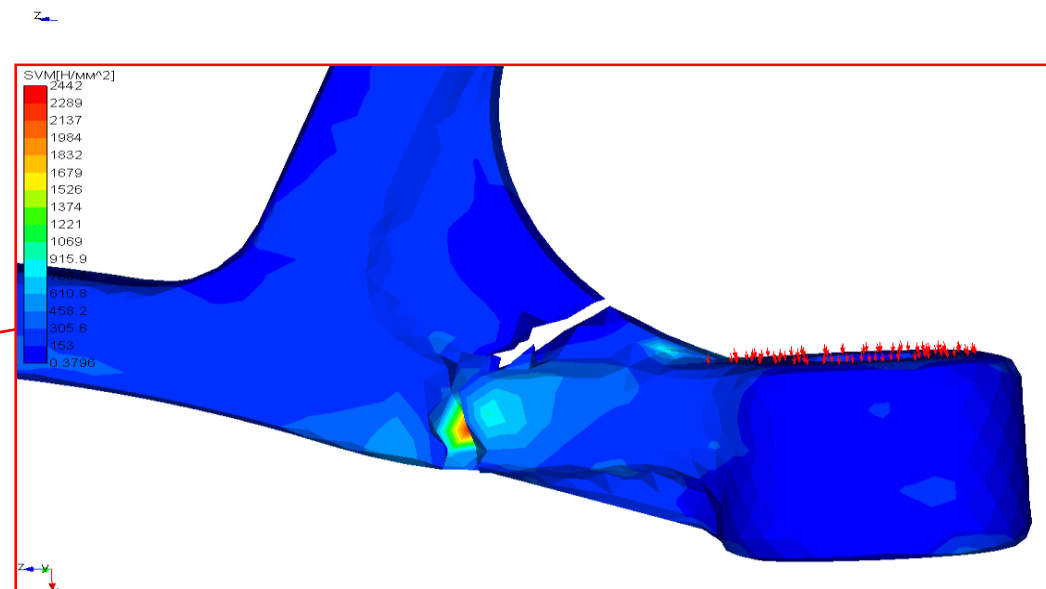
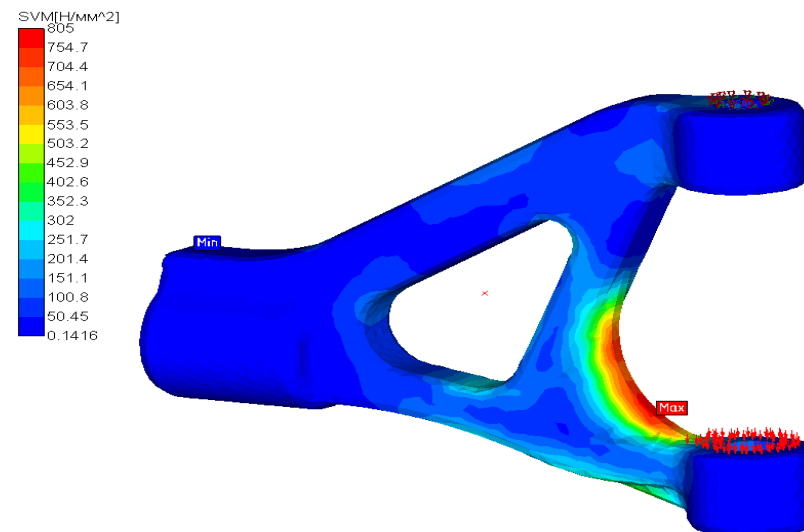
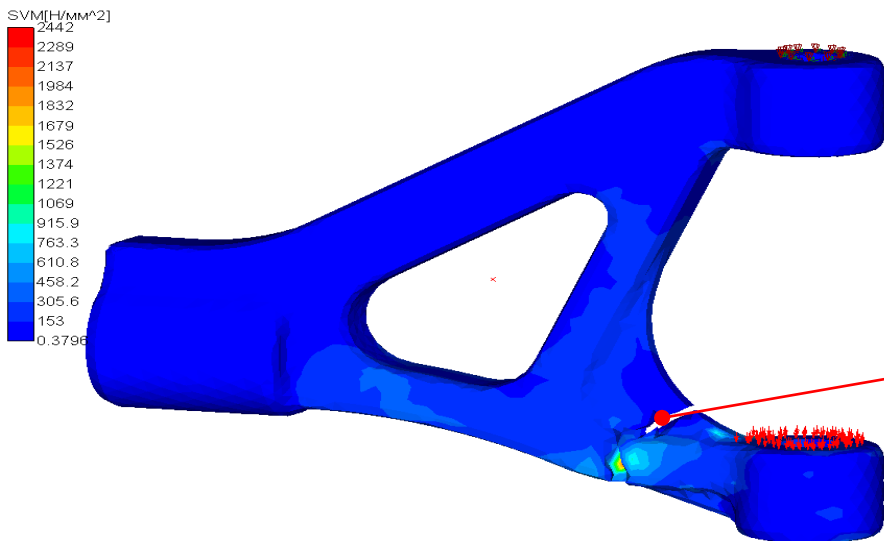
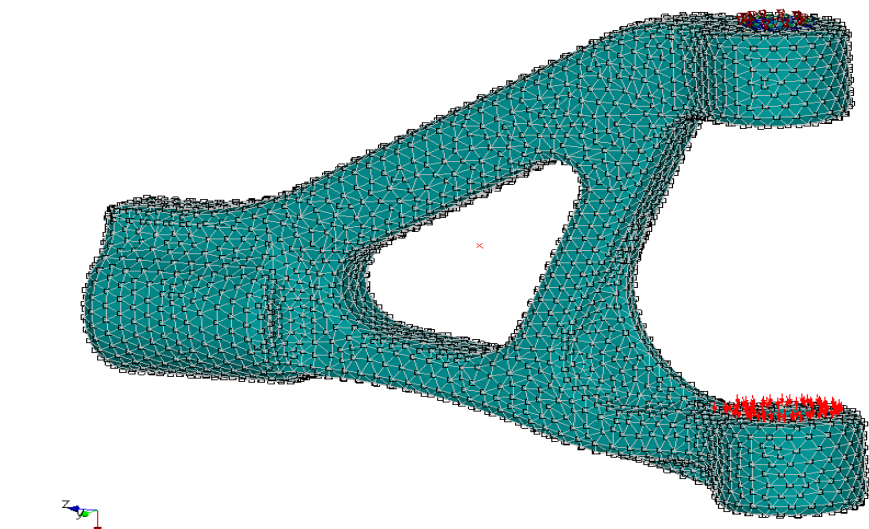
☐ Магнитостатический расчет

☐ Нестационарный электромагнитный расчет

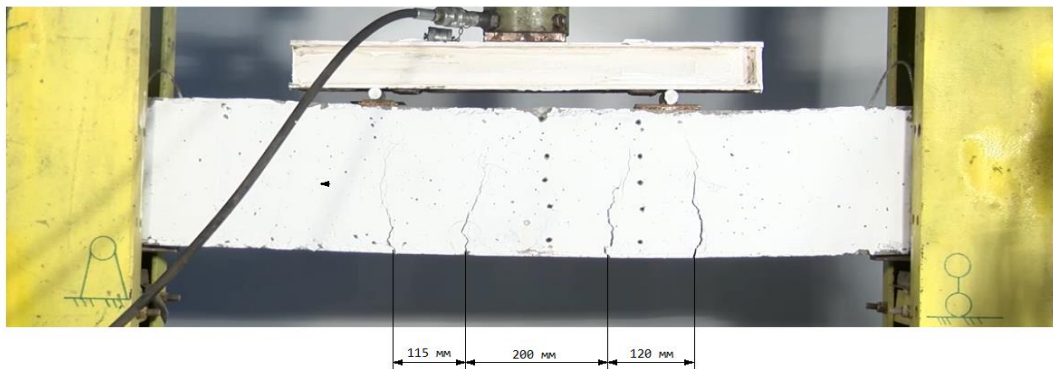
☐ Высокочастотный модальный анализ

OK

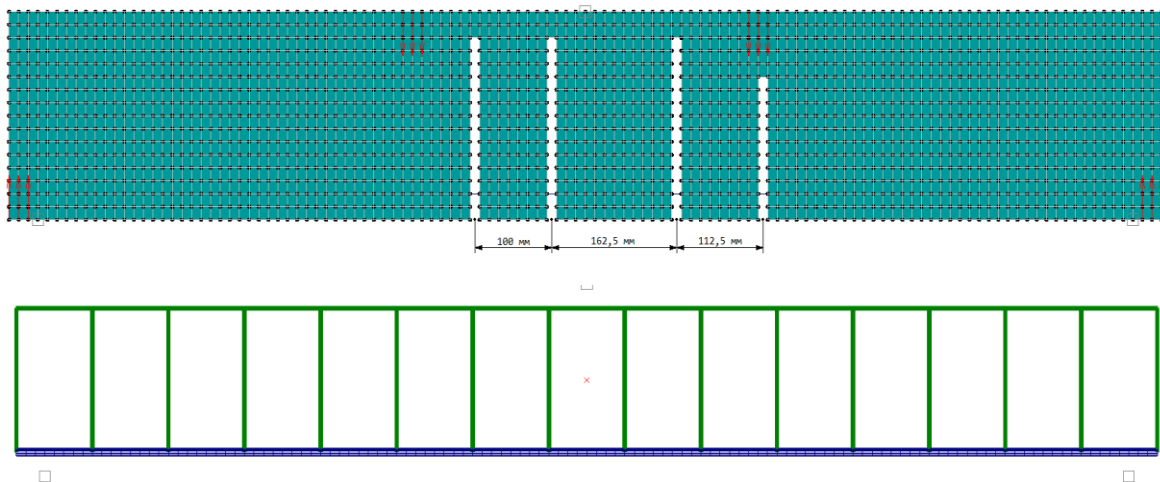
Отмена



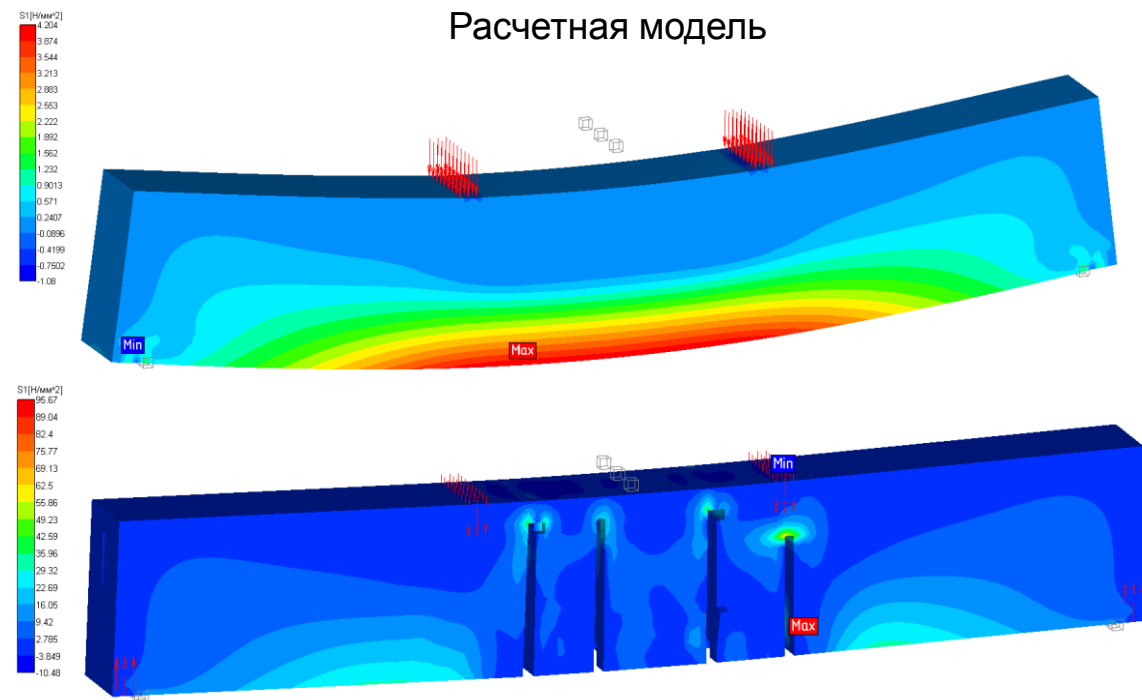
Реальная модель



КЭ-модель (8-узловые и стержневые КЭ)



Расчетная модель



	Реальная модель	КЭ-модель	Относительная погрешность
Длина 1-го участка, мм	115	100	1.15
Длина 2-го участка, мм	200	162.5	1.23
Длина 3-го участка, мм	120	112.5	1.06

Схема разрушения балок

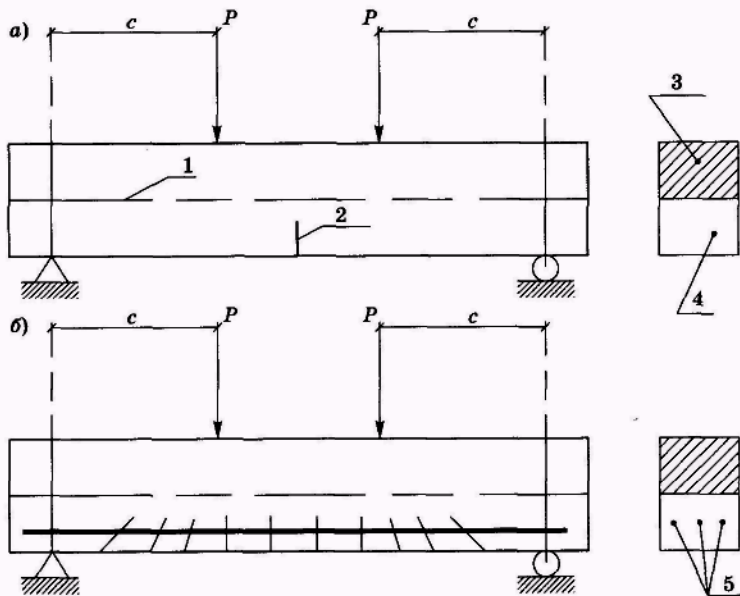
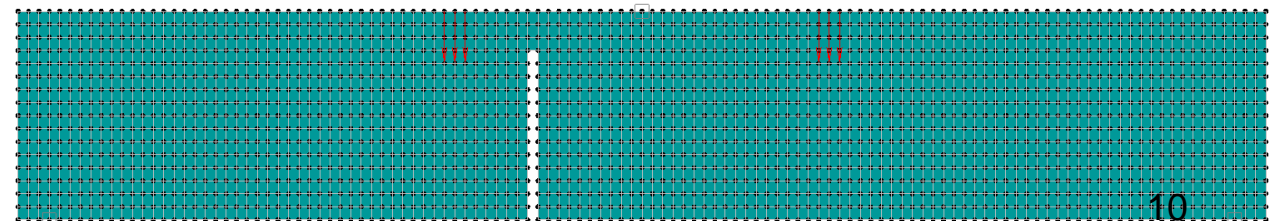
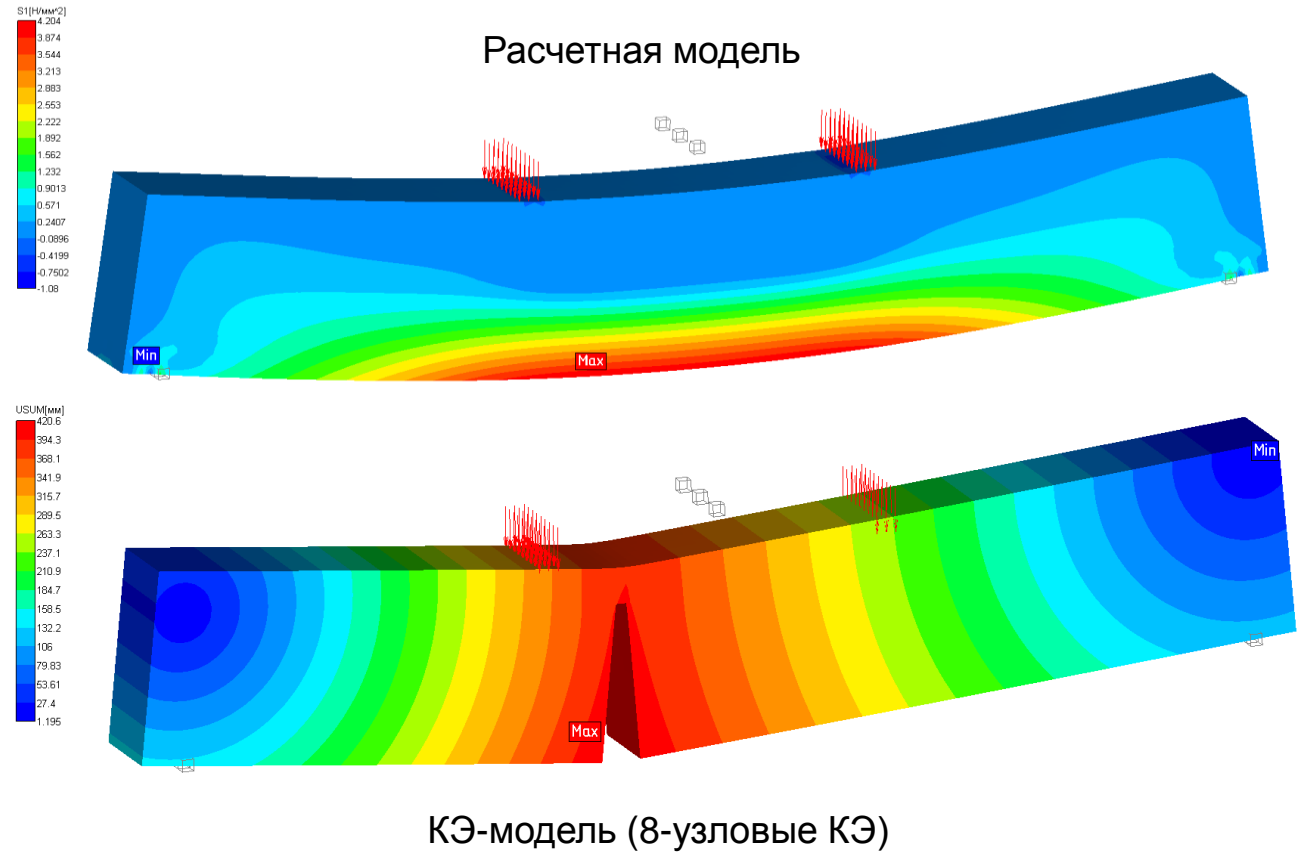
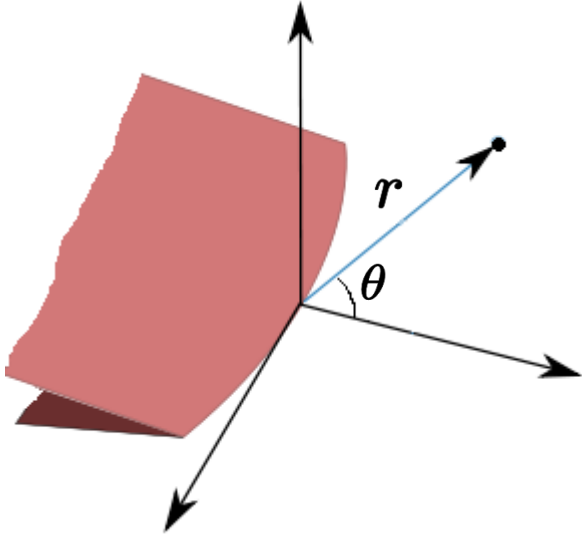
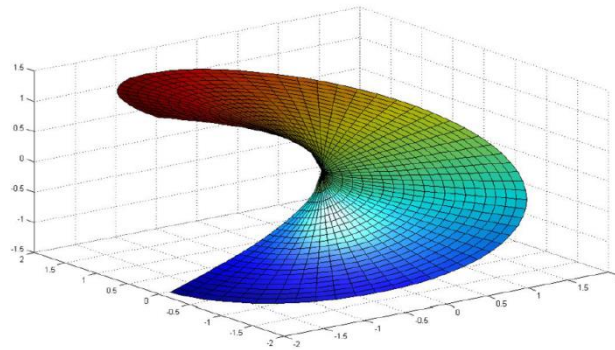


Рис. 1. Схемы разрушения балок: а — бетонная балка; б — железобетонная балка; 1 — нейтральная ось; 2 — трещина; 3 — сжатая зона; 4 — растянутая зона; 5 — стальные стержни (арматура)





Для перемещений:



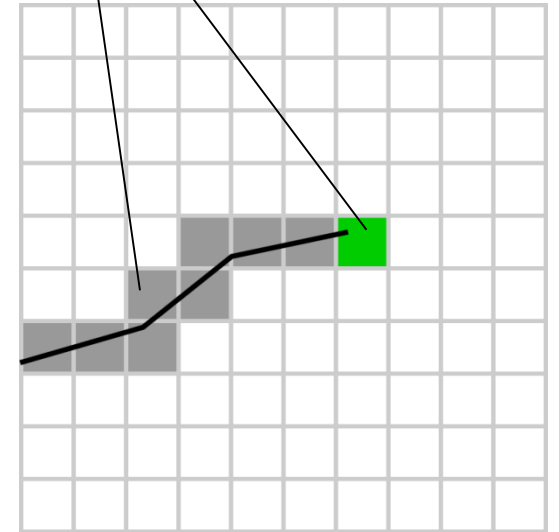
$$r^{1/2} \sin(\theta/2)$$



$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{f_{ij}(\theta)}{\sqrt{2\pi r}} + \dots$$

К набору базисных функций МКЭ добавляются:

- сингулярные
- разрывные



XFEM \longrightarrow

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}(r, 0)$$

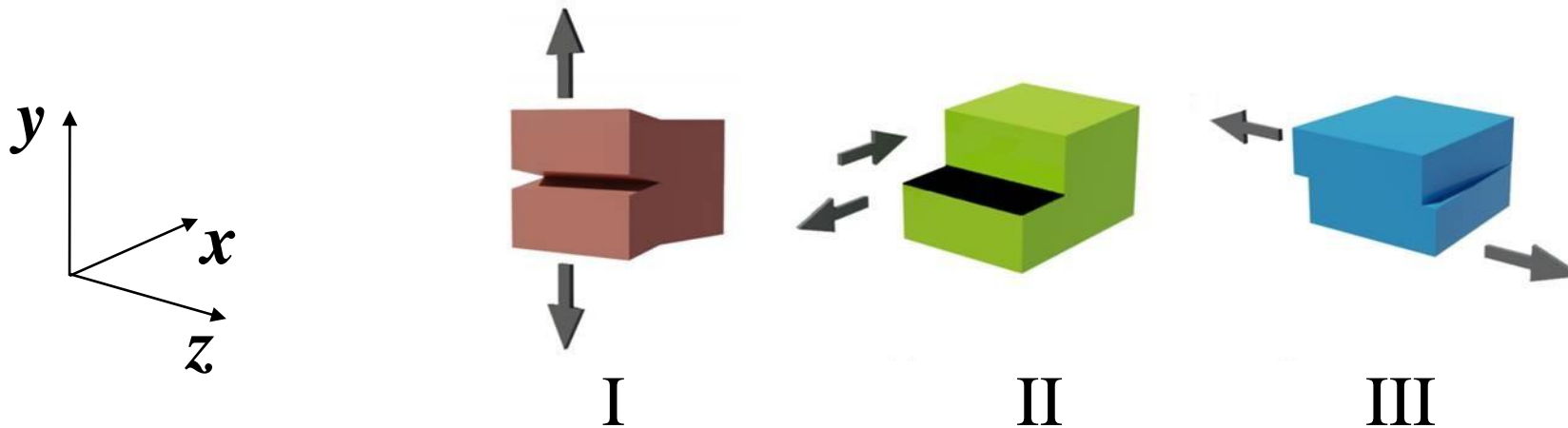
$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yx}(r, 0)$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yz}(r, 0)$$

\longrightarrow

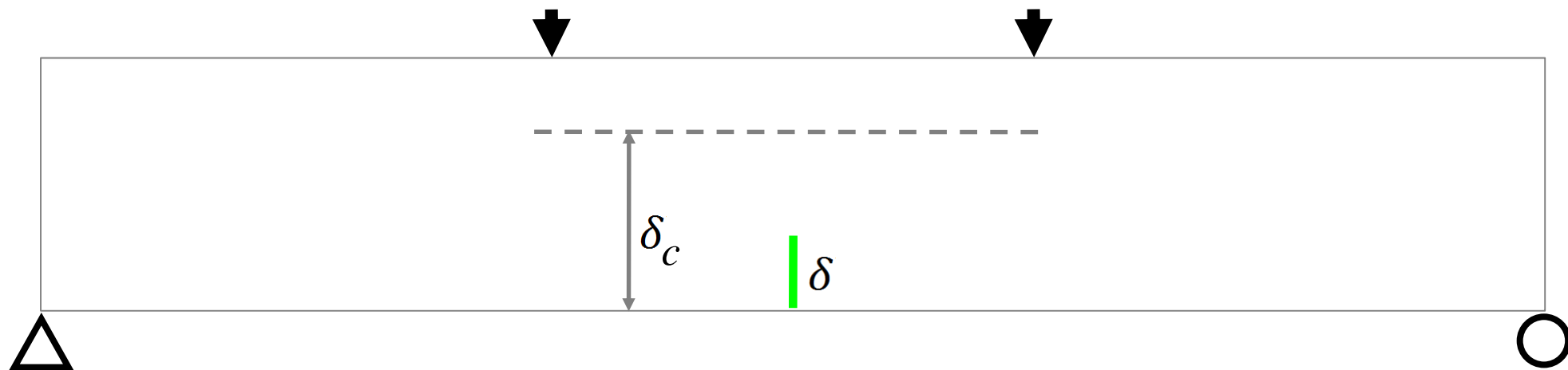
Будет ли расти ?
 $K(K_I, K_{II}, K_{III}) > K_c$

Направление роста



$$K(\delta) \uparrow$$

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} K(\delta) = 0$$



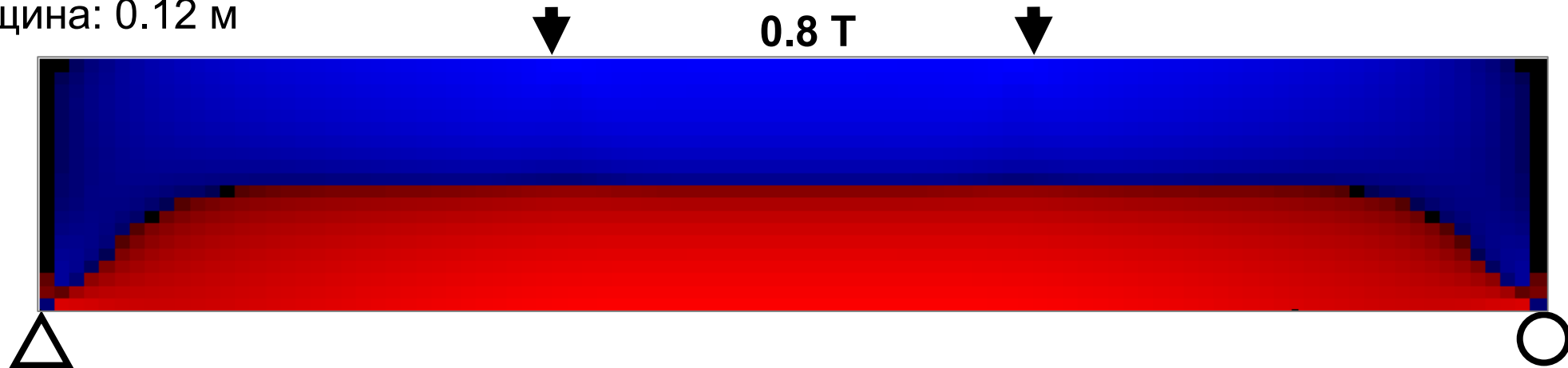
$$K > K_c \Rightarrow \text{разрушение}$$

Материал: бетон

Длина: 1.5 м

Высота: 0.25 м

Толщина: 0.12 м



■ сжатие
■ растяжение (меньше предельного)

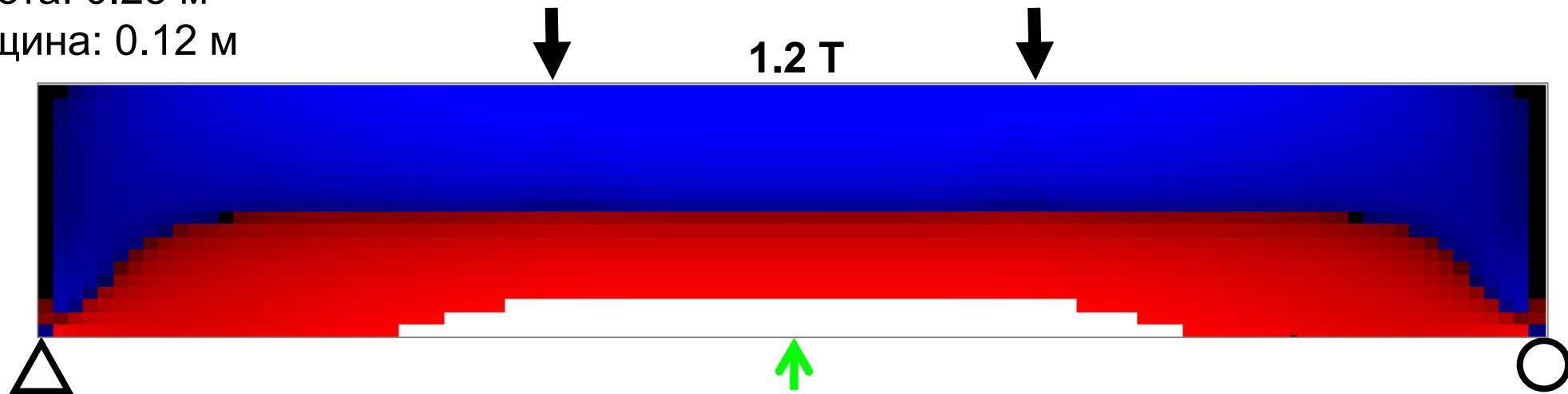
Материал: бетон

Длина: 1.5 м

Высота: 0.25 м

Толщина: 0.12 м

Сломается ?



- сжатие
- растяжение меньше предельного
- растяжение больше предельного

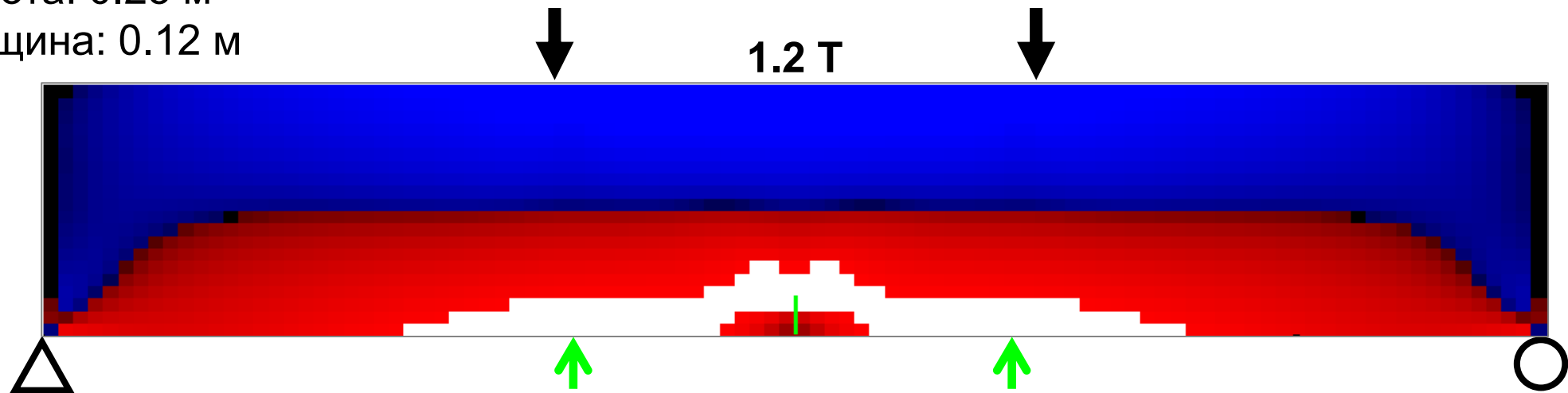
Материал: бетон

Длина: 1.5 м

Высота: 0.25 м

Толщина: 0.12 м

Согласно КИН,
ещё не ломается



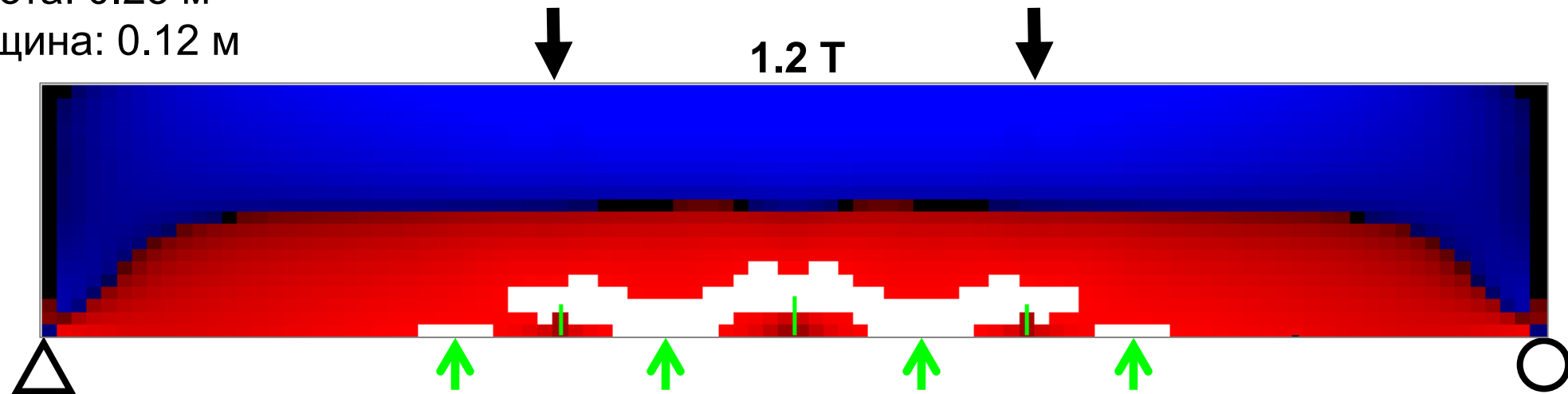
- сжатие
- растяжение меньше предельного
- растяжение больше предельного
- | трещина

Материал: бетон

Длина: 1.5 м

Высота: 0.25 м

Толщина: 0.12 м



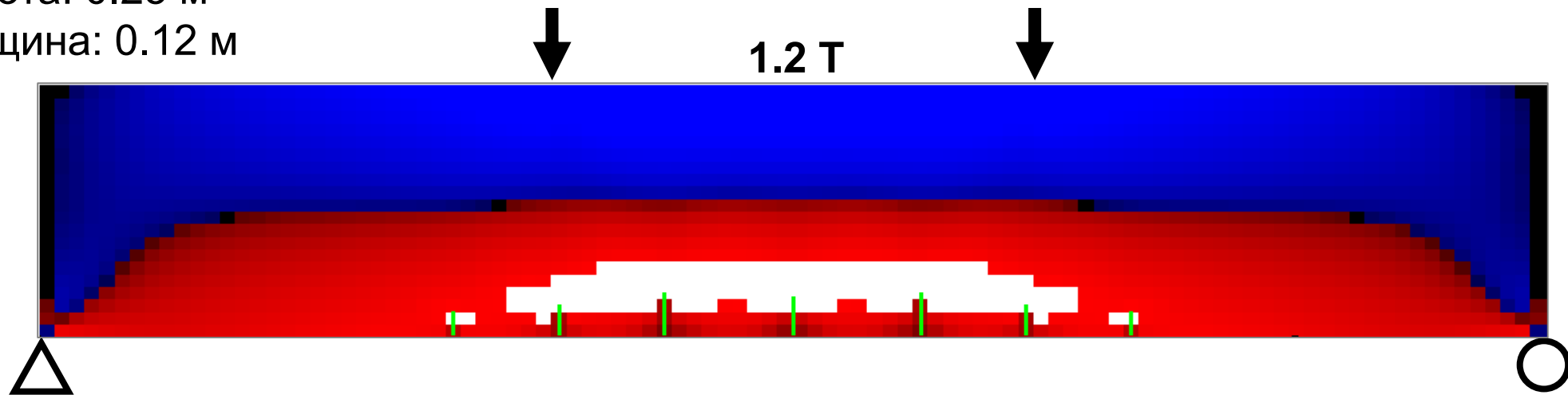
- сжатие
- растяжение меньше предельного
- растяжение больше предельного
- | трещина

Материал: бетон

Длина: 1.5 м

Высота: 0.25 м

Толщина: 0.12 м



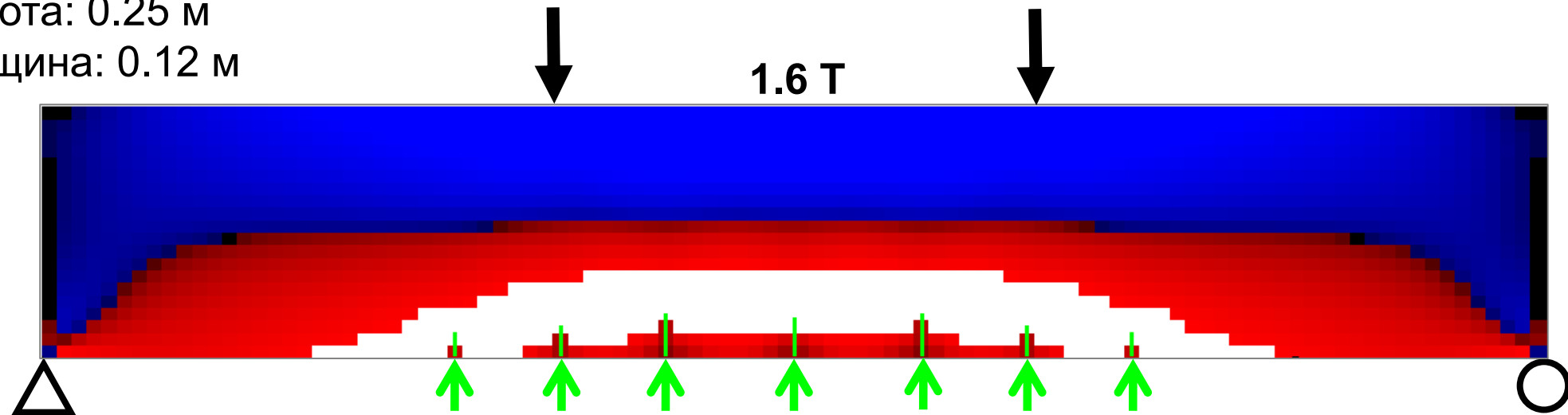
- сжатие
- растяжение меньше предельного
- растяжение больше предельного
- | трещина

Материал: бетон

Длина: 1.5 м

Высота: 0.25 м

Толщина: 0.12 м



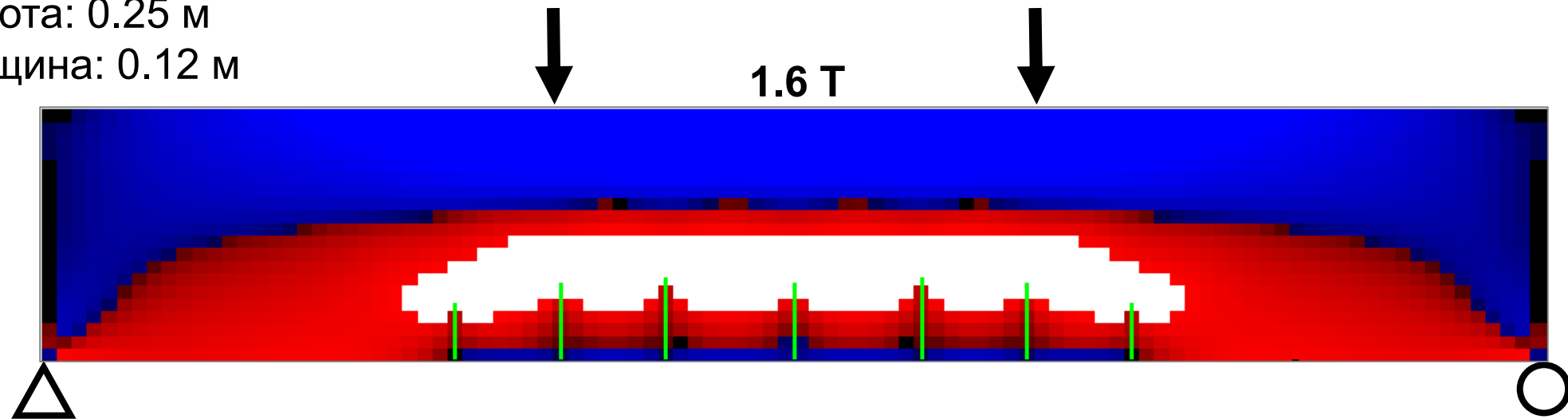
- сжатие
- растяжение меньше предельного
- растяжение больше предельного
- | трещина

Материал: бетон

Длина: 1.5 м

Высота: 0.25 м

Толщина: 0.12 м



- сжатие
- растяжение меньше предельного
- растяжение больше предельного
- | трещина

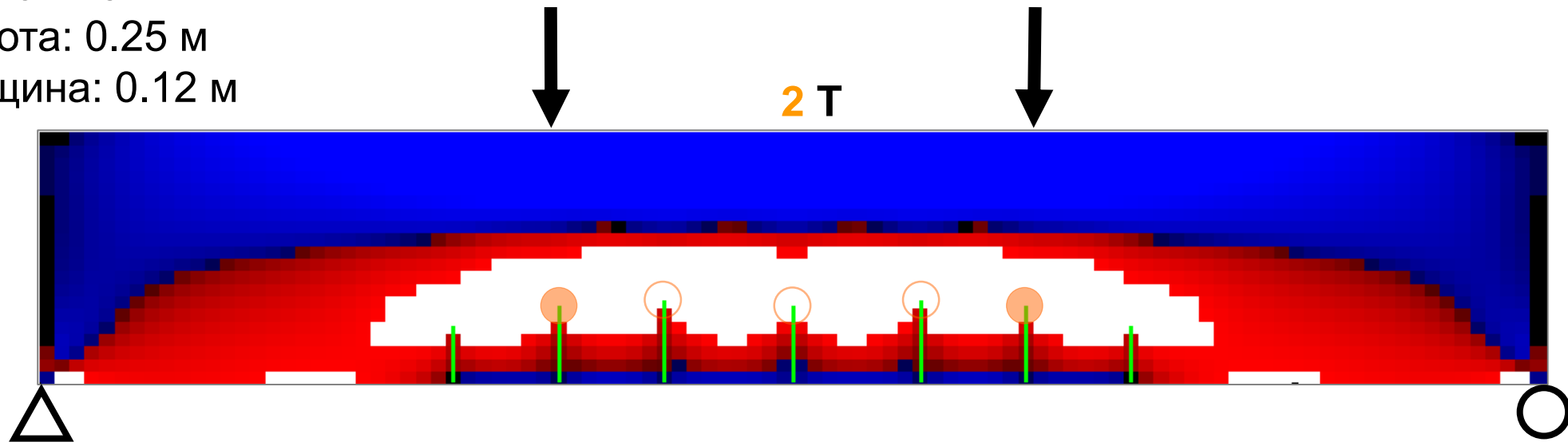
Материал: бетон

Длина: 1.5 м

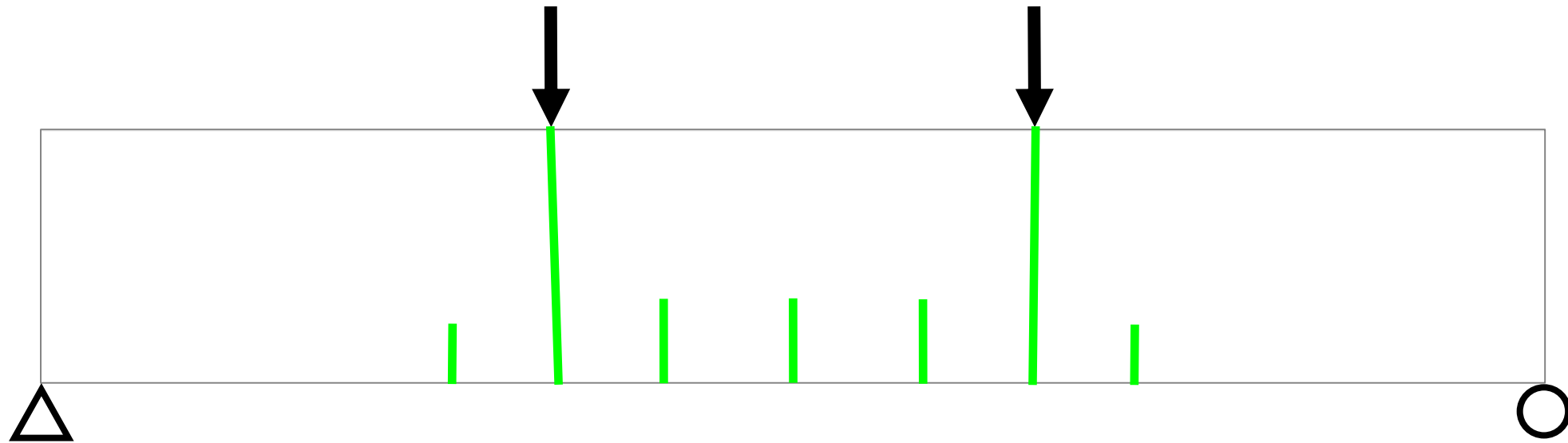
Высота: 0.25 м

Толщина: 0.12 м

Сломается



- сжатие
- растяжение меньше предельного
- растяжение больше предельного
- | трещина
- начнётся рост при данной постоянной нагрузке



Спасибо за внимание!

**Компания НТЦ «АПМ»
(научно-технический центр)
Московская область, г. Королев
Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6
Тел.: (498) 600-25-10, (495) 514-84-19
Internet: www.apm.ru, www.cae.apm.ru
E-mail: com@apm.ru**