

## Задание ИДЗ по дисц. Исслед. процессов обраб рез и РИ» Влияние вида нагрузки на передней поверхности резца на НДС режущего клина при обработке стали

Для расчёта на прочность **неизношенного** режущего инструмента необходимо в качестве внешней нагрузки на передней поверхности прикладывать не сосредоточенные технологические ( $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$ ) или физические ( $N$  и  $F$ ) составляющие силы резания, а распределённые **нормальные  $\sigma$**  и **касательные  $\tau$**  контактные напряжения. При этом необходимо знать законы их распределения (диаграммы, графики или **эпюры** контактных напряжений).

Для изучения распределения контактных напряжений используется метод разрезного резца [1-8]. Первоначально получают ступенчатые диаграммы (гистограммы) распределения **удельных контактных нормальных  $q_{Ni}$**  и **касательных  $q_{Fi}$**  нагрузок ( $\text{Н/мм}^2$ , или МПа, принимая во внимание что  $1 \text{ Н/мм}^2 = 1 \text{ МПа}$ ), т.е. сил  $N$  и  $F$ , приходящихся на один квадратный миллиметр **площади** передней поверхности контакта стружки с передней поверхностью (рис. 1). При этом  $q_{Ni} = \Delta N_i / (\Delta x_{ci} \cdot b)$ ,  $q_{Fi} = \Delta F_i / (\Delta x_{ci} \cdot b)$ , где  $\Delta N_i$  и  $\Delta F_i$  – изменение **нормальных** и **касательных** сил (приращение сил) (Н) на участке длиной  $\Delta x_{ci}$  (мм) на пластине  $B$ ,  $b$  – ширина контакта стружки с передней поверхностью (мм).

Чем меньше **приращение** длины контакта стружки с поверхностью основной измерительной пластины  $B$  разрезного резца  $\Delta x_{ci}$  (мм) [3], тем выше точность формы графиков (**эпюр**) **нормальные  $\sigma$**  и **касательные  $\tau$**  контактные напряжения.

Графики этих контактные напряжений получают проведением линий через **середины** ступеней соответствующей гистограммы (рис. 1).

Анализ гистограмм и полученных графиков  $\sigma$  и  $\tau$  показывает, что эпюру касательных  $\tau$  контактных напряжений можно немного упростить, принимая, что на длине  $c_1 = 0,5 \cdot c$  от режущей кромки график  $\tau$  проходит параллельно передней поверхности резца, т.е.  $\tau_{\max} = \tau_{\text{const}}$  (рис. 2).

При дальнейшем отдалении от режущей кромки график  $\tau$  прямо пропорционально уменьшается до нуля в точке отрыва стружки от передней поверхности, т.е. при  $x = c$ .

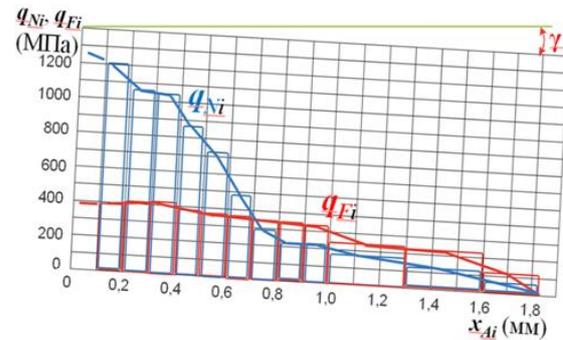


Рис. 1. Гистограммы удельных касательной  $q_{Fi}$  и нормальной  $q_{Ni}$  сил (МПа) на  $i$ -том участке пластины  $B$ . Абсцисса – расстояние от режущей кромки  $x_{Ai}$  (мм). Сталь 40Х – Т15К6,  $\gamma = +7^\circ$ ;  $v = 120$  м/мин;  $a = s = 0,368$  мм;  $b = 4$  мм;  $c = 1,844$  мм;  $c_1 = 0,922$  мм;  $P_{y \text{ эксп}} = 1623$  Н;  $P_{z \text{ эксп}} = 3061$  Н;  $F_{\text{эксп}} = 2014$  Н;  $N_{\text{эксп}} = 2837$  Н.

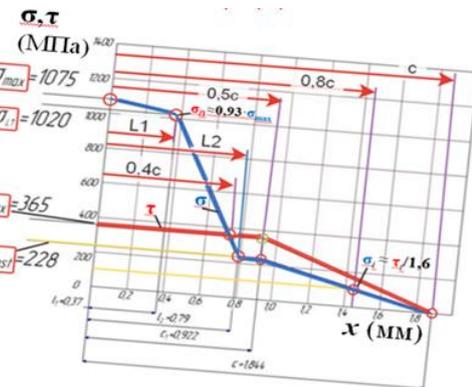


Рис. 2. Эпюры **касательных  $\tau$**  и **нормальных  $\sigma$**  контактных напряжений (МПа) на передней поверхности резца. Абсцисса – расстояние от режущей кромки вдоль передней поверхности резца в главной секущей плоскости  $x$  (мм). Сталь 40Х – Т15К6,  $\gamma = +7^\circ$ ;  $v = 120$  м/мин;  $a = s = 0,368$  мм.  $b = 4$  мм;  $c = 1,844$  мм;  $c_1 = 0,922$  мм;  $P_{y \text{ эксп}} = 1623$  Н;  $P_{z \text{ эксп}} = 3061$  Н;  $F_{\text{эксп}} = 2014$  Н;  $N_{\text{эксп}} = 2837$  Н.

Такая форма графика  $\tau$  позволяет использовать формулу  $\tau_{const} = \tau_{max} = F / (0,75 \cdot c \cdot b)$  для расчёта величины **касательных** контактных напряжений на первой половине контакта стружки с передней поверхностью режущего инструмента.

Форма графика **нормальных**  $\sigma$  контактных напряжений более сложная (рис. 1 и 2), и требуется тщательный анализ для его построения.

Для упрощения задачи приложения внешней нагрузки к 3-D модели режущего инструмента при расчёте напряжённо-деформированного состояния (НДС) режущего клина принимают следующие виды внешней нагрузки:

1) принимается, что прикладываются силы в виде технологических сил  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$ , т.е. без учёта величины переднего угла  $\gamma$ , действующие на ограниченной площади шириной  $b$  и длиной  $0,2 \cdot c$  на расстоянии  $0,3 \cdot c$  от режущей кромки (рис. 3). Такой выбор места приложения сил обусловлен их приложением в центре действия сил, определяемый в основном распределением нормальных контактных напряжений и который будет расположен ближе к режущей кромке согласно рис. 1 и 2. Для предотвращения эффекта концентрации нагрузки они обычно распределяются на небольшой площади, поэтому

рассчитываются удельная тангенциальная нагрузка  $q_{Pz} = P_z / (0,2 \cdot c \cdot b)$ , действующая вертикально, и удельная горизонтальная нагрузка  $q_{Pxy} = P_{xy} / (0,2 \cdot c \cdot b)$ , действующая в горизонтальной плоскости (в основной плоскости) Рассматриваем вариант из рис. 2, когда  $P_{y \text{ эксп}} = 1623 \text{ Н}$ ;  $P_{z \text{ эксп}} = 3061 \text{ Н}$ ;

2) принимается, что прикладываются силы в виде физических составляющих силы резания  $N$  и  $F$ , т.е. с учётом величины переднего угла  $\gamma$ , действующих на ограниченной площади шириной  $b$  и длиной  $0,2 \cdot c$  на расстоянии  $0,3 \cdot c$  от режущей кромки (рис. 4). Для предотвращения эффекта концентрации нагрузки они обычно распределяются на небольшой площади, поэтому рассчитываются удельная нормальная нагрузка  $q_{N \text{ сосред}} = N / (0,2 \cdot c \cdot b)$ , действующая перпендикулярно передней поверхности, и удельная касательная нагрузка  $q_{F \text{ сосред}} = F / (0,2 \cdot c \cdot b)$ , действующая вдоль

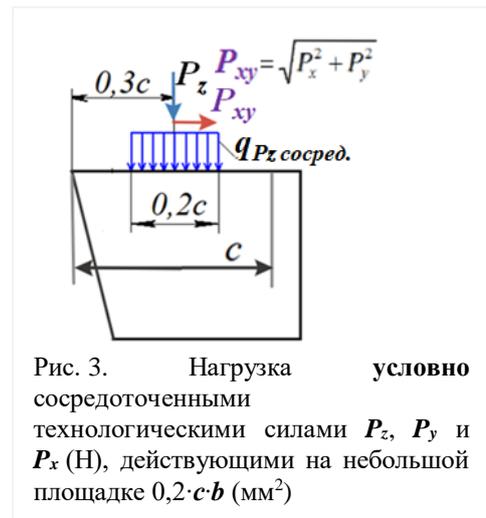


Рис. 3. Нагрузка **условно** сосредоточенными технологическими силами  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  (Н), действующими на небольшой площадке  $0,2 \cdot c \cdot b$  ( $\text{мм}^2$ )

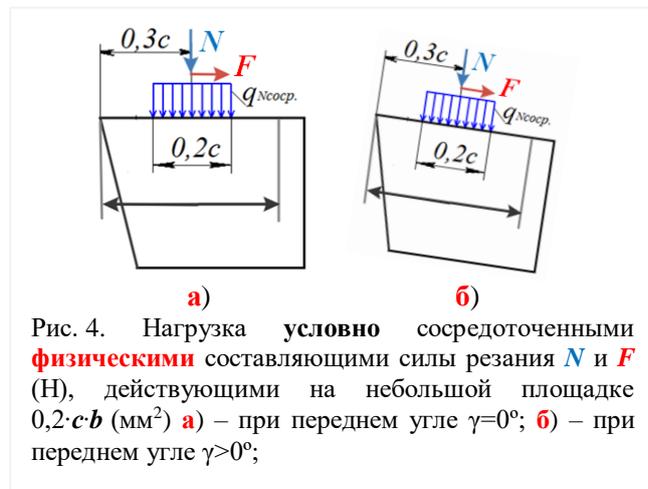


Рис. 4. Нагрузка **условно** сосредоточенными **физическими** составляющими силы резания  $N$  и  $F$  (Н), действующими на небольшой площадке  $0,2 \cdot c \cdot b$  ( $\text{мм}^2$ ) **а)** – при переднем угле  $\gamma = 0^\circ$ ; **б)** – при переднем угле  $\gamma > 0^\circ$ ;

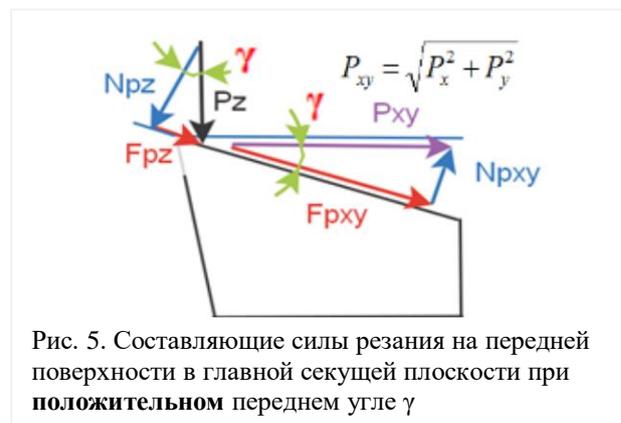


Рис. 5. Составляющие силы резания на передней поверхности в главной секущей плоскости при **положительном** переднем угле  $\gamma$

передней поверхности. Физические составляющие рассчитываются по уравнениям (1) и (2) при **положительном** переднем угле  $\gamma$  согласно рис. 5;

$$N = N_{P_z} - N_{P_y} = P_z \cdot \cos \gamma - P_y \cdot \sin \gamma; \quad (1)$$

$$F = F_{P_y} + F_{P_z} = P_y \cdot \cos \gamma + P_z \cdot \sin \gamma. \quad (2)$$

Рассматриваем вариант из рис. 2, когда  $P_{y \text{ эксп}}=1623$  Н;  $P_{z \text{ эксп}}=3061$  Н;  $F_{\text{эксп}}=2014$  Н;  $N_{\text{эксп}}=2837$  Н.

3) принимается, что прикладываются нагрузки в виде равномерно распределённых удельных **физических** составляющих силы резания  $N$  и  $F$  (см. рис. 6). Они рассчитываются по формулам:

$$q_N = N_{\text{эксп}} / (c \cdot b),$$

$$q_F = F_{\text{эксп}} / (c \cdot b);$$

Рассматриваем вариант из рис. 2, когда  $P_{y \text{ эксп}}=1623$  Н;  $P_{z \text{ эксп}}=3061$  Н;  $F_{\text{эксп}}=2014$  Н;  $N_{\text{эксп}}=2837$  Н.

4) принимается, что прикладываются **нормальные** контактные нагрузки  $\sigma$  в виде **треугольника**, а **касательные**  $\tau$  – в виде **равномерно распределённых** (рис. 7). Последние имеют небольшую величину по сравнению с нормальными и поэтому ошибки будет небольшая, что позволяет упростить расчёт и построение эпюр. Основные параметры эпюр рассчитываются по формулам:

$$\sigma_{\max} = 2N_{\text{эксп}} / (c \cdot b); \quad \tau_{\text{const}} = F_{\text{эксп}} / (2c \cdot b);$$

Рассматриваем вариант из рис. 2, когда  $P_{y \text{ эксп}}=1623$  Н;  $P_{z \text{ эксп}}=3061$  Н;  $F_{\text{эксп}}=2014$  Н;  $N_{\text{эксп}}=2837$  Н.

5) принимается, что прикладываются **нормальные** контактные нагрузки  $\sigma$  в виде **треугольника**, а **касательные**  $\tau$  – в виде эпюр, форма которой экспериментально выявлена (рис. 1, 3, 8). Основные параметры эпюр рассчитываются по формулам:

$$\sigma_{\max} = 2N_{\text{эксп}} / (c \cdot b);$$

$$\tau_{\text{const}} = F_{\text{эксп}} / (0,75 \cdot c \cdot b).$$

Рассматриваем вариант из рис. 2, когда  $P_{y \text{ эксп}}=1623$  Н;  $P_{z \text{ эксп}}=3061$  Н;  $F_{\text{эксп}}=2014$  Н;  $N_{\text{эксп}}=2837$  Н.

б) принимается, что контактные нагрузки прикладываются в виде эпюр, **форма которых экспериментально выявлена** (рис. 1, 2). Основные параметры эпюр указаны на рис. 2.

Рассматриваем вариант из рис. 2, когда  $P_{y \text{ эксп}}=1623$  Н;  $P_{z \text{ эксп}}=3061$  Н;  $F_{\text{эксп}}=2014$  Н;  $N_{\text{эксп}}=2837$  Н.

Для выявления влияния вида нагрузки на НДС режущего клина создаём 3-D модель простого резца (см. рис. 9) с размерами  $l = 20$  мм,  $h = 5$  мм, шириной  $b = 4$  мм,  $\gamma = 7^\circ$  из твёрдого сплава Т15К6 и прикладываем к ней поочерёдно вышеуказанные нагрузки 6 видов.

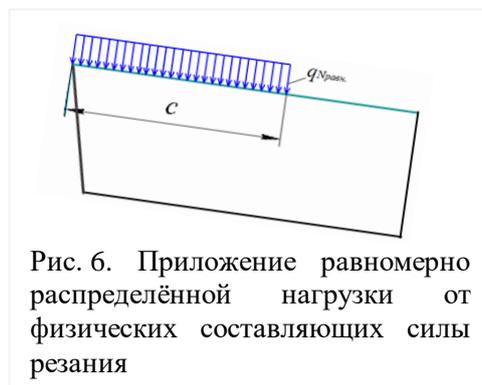


Рис. 6. Приложение равномерно распределённой нагрузки от физических составляющих силы резания

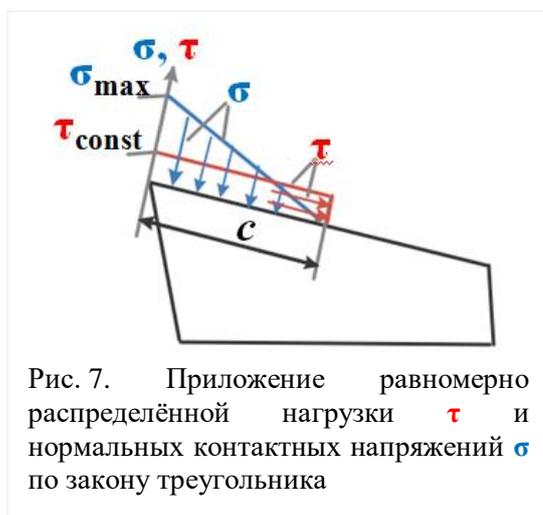


Рис. 7. Приложение равномерно распределённой нагрузки  $\tau$  и нормальных контактных напряжений  $\sigma$  по закону треугольника

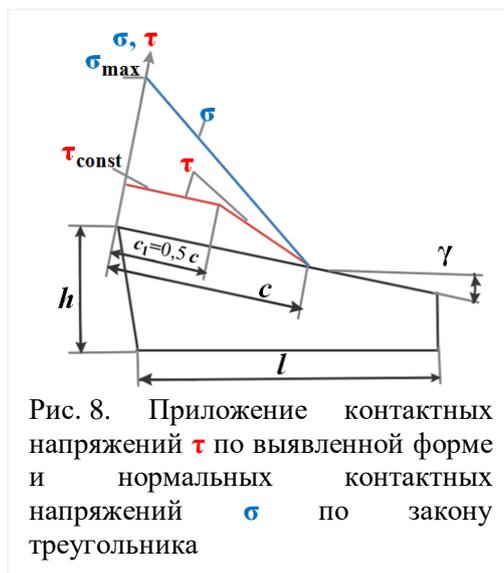


Рис. 8. Приложение контактных напряжений  $\tau$  по выявленной форме и нормальных контактных напряжений  $\sigma$  по закону треугольника

В задании на расчёт программы ANSYS устанавливается необходимость расчёта эквивалентных напряжений  $\sigma_e$  ( $\sigma_{\text{экв}}$ ) (построение поля распределения  $\sigma_e$ ), нормальных напряжений в направлении осей OZ, OY, OX ( $\sigma_z$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$ ), касательных напряжений в плоскостях ZY, ZX, XY ( $\tau_{zy}$ ,  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{xy}$ ), относительных эквивалентных деформаций  $\epsilon_{\text{общ}}$ .

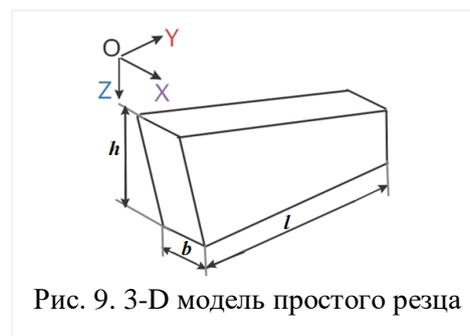


Рис. 9. 3-D модель простого реза

Сравниваем наибольшие напряжения  $\sigma_e$  ( $\sigma_{\text{экв}}$ ), наибольшие **положительные** и **отрицательные** (наименьшие с учётом знака) напряжения  $\sigma_z$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$ ,  $\tau_{zy}$ ,  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{xy}$ , наибольшую относительную деформация  $\epsilon_{\text{общ}}$  всех 6 видов (см. **таблицу 1** на следующей странице) и делаем выводы.

## Список литературы

1. Козлов В. Н., Бабаев А.С., Семёнов А.Р. Методы исследования процесса стружкообразования при обработке конструкционных сталей / В. Н. Козлов, А. С. Бабаев, А. Р. Семёнов // Современные проблемы машиностроения : сборник статей XVI Международной научно-технической конференции, г. Томск, 27 ноября – 1 декабря 2023 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) — Томск, 2024. — С. 217-222. — URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/77437>.
2. Построение эпюр контактных напряжении на передней поверхности инструмента при обработке стали / В. Н. Козлов, Х. Чжан, Е. Н. Петровский // Современные проблемы машиностроения : сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, г. Томск, 22-25 ноября 2022 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; ред. кол. Е. Н. Пашков [и др.]. — 2022. — Современные проблемы машиностроения. — [С. 94-97]. — URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/74379>
3. Исследование распределения контактных напряжении на передней поверхности инструмента при обработке стали / В. Н. Козлов, Ц. Дин, В. Ли // Современные проблемы машиностроения : сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, г. Томск, 22-25 ноября 2022 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; ред. кол. Е. Н. Пашков [и др.]. — 2022. — Современные проблемы машиностроения. — [С. 98-101]. — URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/74380>
4. Kozlov V.N., Babaev A. S., Shults N. A. [et al.] Study of a Methodology for Calculating Contact Stresses during Blade Processing of Structural Steel / V. N. Kozlov, A. S. Babaev, N. A. Shults [et al.] // Metals. – 2023. – Vol. 13, iss. 12. – Article number 2009, 16 p. – URL: <https://doi.org/10.3390/met13122009>.
5. Влияние переднего угла на физические составляющие силы резания при обработке стали / В. Н. Козлов, Ц. Дин, Х. Чжан [и др.] ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет // Современные проблемы машиностроения : сборник статей XVI Международной научно-технической конференции, г. Томск, 27 ноября – 1 декабря 2023 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; ред. кол. А. И. Сечин, М. С. Кухта, А. А. Моховиков [и др.]. — Томск, 2024. — Современные проблемы машиностроения. — С. 225-227. — URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/77439>.
6. Исследование и моделирование НДС в зоне стружкообразования при обработке стали 40X / В. Н. Козлов, Ц. Дин, Х. Чжан ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет // Современные проблемы машиностроения : сборник

статей XVI Международной научно-технической конференции, г. Томск, 27 ноября – 1 декабря 2023 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; ред кол. А. И. Сечин, М. С. Кухта, А. А. Моховиков [и др.]. — Томск, 2024. — Современные проблемы машиностроения. — С. 228-233. — URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/77440>

7. Real-time determination of cutting force coefficients without cutting geometry restriction / В.Тукора,Т.Сзалы // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2011. – Vol. 51 – No. 12. – P. 871-879. –doi:10.1016/j.ijmachtools.2011.08.003.

8. Unified cutting force model for turning, boring, drilling and milling operations / М.Каймакци,З.М.Килич,У.Алтintas // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2012. – Vol. 54-55. – P. 34-45. –doi:10.1016/j.ijmachtools.2011.12.008

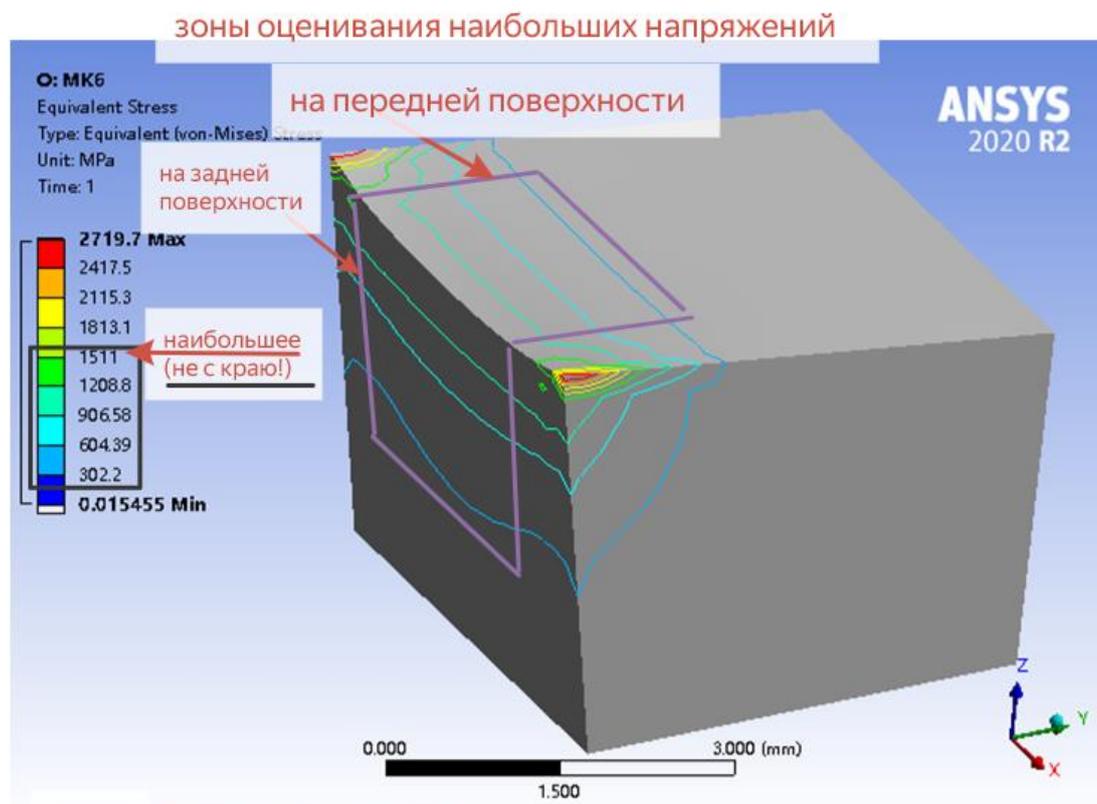


схема 6 - реальные эпюры

МК6:Эквивалентное напряжение. ¶

Рис. 10. Пример распределения эквивалентных напряжений при нагрузке по схеме №6 (реальные эпюры)

