

УДК 621.771

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ
КОЛЬЦЕВОЙ ГАЛТЕЛИ ПРОКАТНОГО ВАЛКА****Андрей Анатольевич Мальцев**доцент кафедр ФН-7 и МТ-10 МГТУ им Н.Э. Баумана
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Аннотация**

Установлена степень влияния геометрических размеров и шероховатости поверхности кольцевой галтели на величину предела выносливости галтели, показатель наклона левой ветви диаграммы Вёллера, построенной для галтели в логарифмических координатах, и коэффициент чувствительности галтели к асимметрии цикла.

Ключевые слова: металлургия, галтель, усталостное разрушение, прочность.

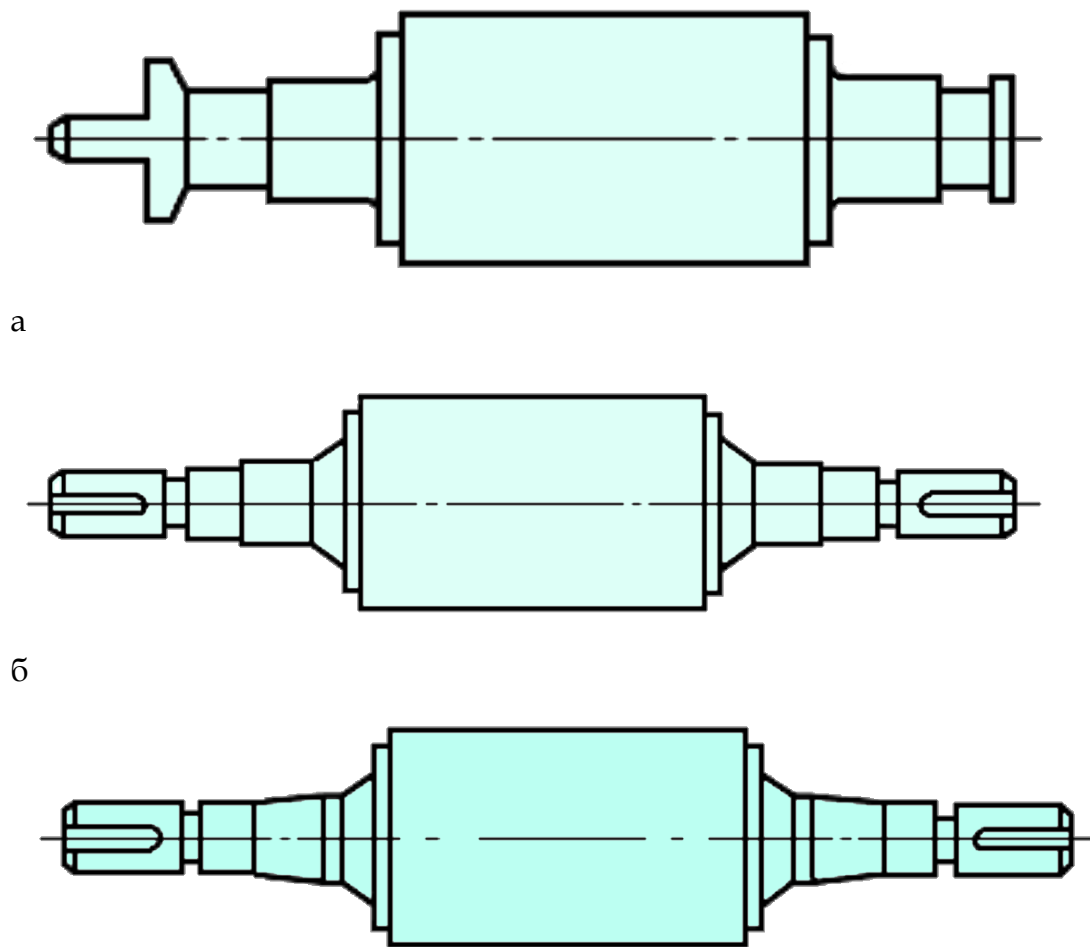
**INVESTIGATION OF FATIGUE RESISTANCE CHARACTERISTICS OF THE
ROLLING ROLL ANNULAR GALTTEL****Andrey A. Maltsev**Associate Professor of BMSTU ФН-7 and МТ-10 Departments
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**ABSTRACT**

The degree of influence of the geometric dimensions and roughness of the annular galttel surface on the value of the endurance limit of the galttel, the slope index of the left branch of the Weller diagram constructed for the galttel in loga-rithmic coordinates, and the sensitivity coefficient of the galttel to the asymmetry of the cycle are established.

Keywords: metallurgy, galttel, fatigue failure, strength.

Актуальность и цель исследования

Горизонтально расположенные рабочие и опорные валки 2-, 3- и 4-валковых станов горячей и холодной прокатки проектируются с учетом требований ГОСТ 5399-69 «Валки прокатные. Основные размеры» (рис. 1).



в
 Рисунок 1. Прокатный валок:
 а – с цилиндрическими шейками для подшипников скольжения;
 б – с цилиндрическими шейками для подшипников качения;
 в – с коническими шейками для подшипников жидкостного трения

Объект исследования – кольцевая галтель прокатного валка с цилиндрическими шейками для подшипников скольжения (рис. 2).

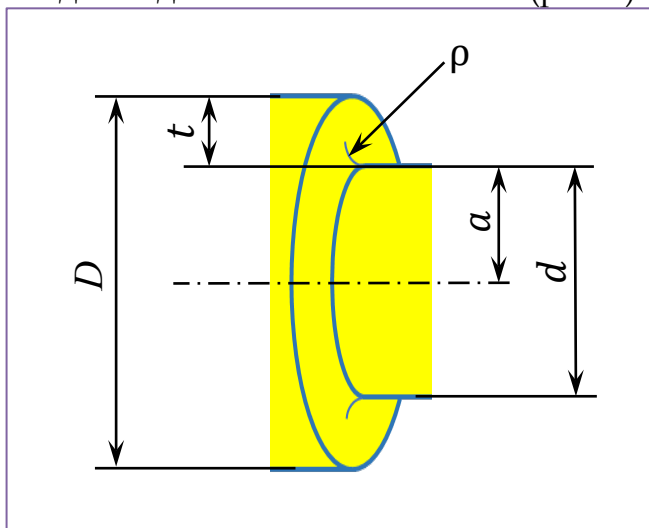


Рисунок 2. Кольцевая галтель:
 D – больший диаметр;

d – меньший диаметр;
 ρ – радиус закругления;

$$a = \frac{d}{2}; \quad t = \frac{D - d}{2}$$

Цель исследования – доработка и тестирование компьютерной программы для выполнения лабораторной работы на тему «Исследование характеристик циклической прочности опасного сечения рабочего вала» по учебной дисциплине «Основы динамики и надежности металлургического оборудования» [1, 2, 3].

Требуется установить степень влияния геометрических размеров (ρ, t) и шероховатости поверхности (R_z) на характеристики циклической прочности кольцевой галтели ($\tau_{-1 \text{ сеч}}, m, \Psi_{\tau \text{ сеч}}$) в случае кручения.

Материалы и методы исследования

Теоретический материал (все расчетные формулы) взят из ГОСТ 25.504-82 «Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости».

Пусть предел прочности стали, из которой изготовлен рабочий валок,
 $\sigma_B = 850$ МПа .

Тогда предел выносливости для этой стали:

$\sigma_{-1} = (0,55 - 0,0001 \sigma_B) \sigma_B \approx 395$ МПа – при растяжении-сжатии;

$\tau_{-1} = 0,6 \sigma_{-1} \approx 237$ МПа – при кручении.

Коэффициент чувствительности конструкционной стали к концентрации напряжений и масштабному фактору:

$$v_{\sigma} = \begin{cases} 0,211 - 0,000143 \sigma_B, & \text{при } \sigma_B \leq 1300 \text{ МПа;} \\ 0,025, & \text{при } \sigma_B > 1300 \text{ МПа;} \end{cases}$$

$v_{\sigma} = 0,09$ – при растяжении-сжатии;

$v_{\tau} = 1,5 v_{\sigma} = 0,13$ – при кручении.

Пусть известны геометрические размеры кольцевой галтели:

$D = 250$ мм ;

$d = 150$ мм ;

$$t = \frac{D - d}{2} = 50 \text{ мм;} \\ a = \frac{d}{2} = 75 \text{ мм;} \\ \rho = 20 \text{ мм.}$$

$\rho = 20$ мм .

Тогда теоретический коэффициент концентрации касательных напряжений в области кольцевой галтели в случае кручения

$$a_{\tau} = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{3,4}{\frac{t}{\rho}} + 19,0 \frac{\left(1 + \frac{a}{\rho}\right)^2}{\left(\frac{a}{\rho}\right)^3} + \frac{1,0}{\left(\frac{t}{\rho}\right)^2} \cdot \frac{\frac{a}{\rho}}{\frac{a}{\rho} + \frac{t}{\rho}}}} \approx 1,32 .$$

Относительный градиент касательного напряжения в области кольцевой галтели в случае кручения

$$\bar{G}_{\tau} = \frac{1,15}{\rho} + \frac{2}{d} = 0,07 \frac{1}{\text{мм}} .$$

Параметр L при кручении круглого стержня (вала) с переходом от одного сечения к другому по галтели

$$L = \pi d = 471 \text{ мм.}$$

Относительный критерий подобия усталостного разрушения

$$\Theta = \frac{1}{88,3} \frac{L}{\bar{G}_\tau} = 75,34.$$

Параметр шероховатости поверхности кольцевой галтели рабочего валка
 $R_z = 6,3$ мкм .

Коэффициент влияния шероховатости поверхности:

$$K_{F\sigma} = 1 - 0,22 \lg R_z \left(\lg \frac{\sigma_B}{20} - 1 \right) = 0,89 \quad \text{— при растяжении-сжатии};$$

$$K_{F\tau} = 0,575 K_{F\sigma} + 0,425 = 0,94 \quad \text{— при кручении}.$$

Коэффициент снижения предела выносливости

$$K = \frac{2a_\tau}{1 + \Theta^{-\nu_\tau}} + \frac{1}{K_{F\tau}} - 1 = 1,76.$$

Предел выносливости кольцевой галтели в случае кручения

$$\tau_{-1 \text{ сеч}} = \frac{\tau_{-1}}{K} \approx 134 \text{ МПа}.$$

Абсцисса точки перелома кривой усталости $N_G = 2 \cdot 10^6$ циклов.

Показатель наклона левой ветви диаграммы Вёллера, построенной в логарифмических координатах,

$$m = \frac{5 + \frac{\sigma_B}{80}}{K} \approx 9.$$

Коэффициент чувствительности стали к асимметрии цикла нагрузки в области галтели для случая кручения

$$\Psi_{\tau \text{ сеч}} = \frac{0,01 + 10^{-4} \cdot \sigma_B}{K} \approx 0,05.$$

Результаты исследования и выводы

Доработана и протестирована компьютерная программа для выполнения в среде MathCAD лабораторной работы на тему «Исследование характеристик циклической прочности опасного сечения рабочего валка»:

$$\sigma_B := 850$$

$$\sigma_{-1} := (0,55 - 0,0001 \cdot \sigma_B) \cdot \sigma_B \rightarrow 395$$

$$\tau_{-1} := 0,6 \cdot \sigma_{-1} \rightarrow 237$$

$$\nu_\sigma := \begin{cases} 0,211 - 0,000143 \cdot \sigma_B & \text{if } \sigma_B \leq 1300 \\ 0,025 & \text{if } \sigma_B > 1300 \end{cases} \rightarrow 0,09$$

$$\nu_\tau := 1,5 \cdot \nu_\sigma \rightarrow 0,13$$

$$D := 250$$

$$d := 150$$

$$t := \frac{D - d}{2} \rightarrow 50$$

$$\alpha := \frac{d}{2} \rightarrow 75$$

$$\rho := 20$$

$$\alpha_{\tau} := 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{3.4}{\frac{t}{\rho}} + 19.0 \cdot \frac{\left(1 + \frac{\alpha}{\rho}\right)^2}{\left(\frac{\alpha}{\rho}\right)^3} + \frac{1}{\left(\frac{t}{\rho}\right)^2} \cdot \frac{\frac{\alpha}{\rho}}{\frac{\alpha}{\rho} + \frac{t}{\rho}}}} \rightarrow 1.32$$

$$G_{\tau} := \frac{1.15}{\rho} + \frac{2}{d} \rightarrow 0.07$$

$$L := \pi \cdot d$$

$$L = 471$$

$$\Theta := \frac{1}{88.3} \cdot \frac{L}{G_{\tau}} \rightarrow 75.34$$

$$R_z := 6.3$$

$$K_{F\sigma} := 1 - 0.22 \cdot \log(R_z) \cdot \left(\log\left(\frac{\sigma_B}{20}\right) - 1 \right)$$

$$K_{F\sigma} = 0.89$$

$$K_{F\sigma} := 0.89$$

$$K_{F\tau} := 0.575 \cdot K_{F\sigma} + 0.425 \rightarrow 0.94$$

□

$$\square K := \frac{2 \cdot \alpha_\tau}{1 + \Theta^{-\nu_\tau}} + \frac{1}{K_{F\tau}} - 1 \rightarrow 1.76$$

$$\tau_{-1\text{сеч}} := \frac{\tau_{-1}}{K} \rightarrow 134$$

$$N_G := 2 \cdot 10^6$$

$$\square m := \frac{5 + \frac{\sigma_B}{80}}{K} \rightarrow 9$$

$$\Psi_{\tau\text{сеч}} := \frac{0.01 + 10^{-4} \cdot \sigma_B}{K} \rightarrow 0.05$$

Тест №1 — исследование влияния радиуса закругления на предел выносливости кольцевой галтели:

$$D = 250$$

$$d = 150$$

$$t = 50$$

$$\alpha = 75$$

$$\rho := \begin{pmatrix} 21 \\ 22 \\ 23 \\ 24 \\ 25 \\ 26 \\ 27 \\ 28 \\ 29 \\ 30 \end{pmatrix}$$

$$\alpha_T := 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{3.4}{\frac{t}{\rho}} + 19.0 \cdot \frac{\left(1 + \frac{\alpha}{\rho}\right)^2}{\left(\frac{\alpha}{\rho}\right)^3} + \frac{1}{\left(\frac{t}{\rho}\right)^2} \cdot \frac{\frac{\alpha}{\rho}}{\frac{\alpha}{\rho} + \frac{t}{\rho}}}}$$

Вывод: при увеличении радиуса закругления кольцевой галтели от 21 до 30 мм теоретический коэффициент концентрации касательных напряжений в области кольцевой галтели снижается от 1,29 до 1,23 (рис. 3).

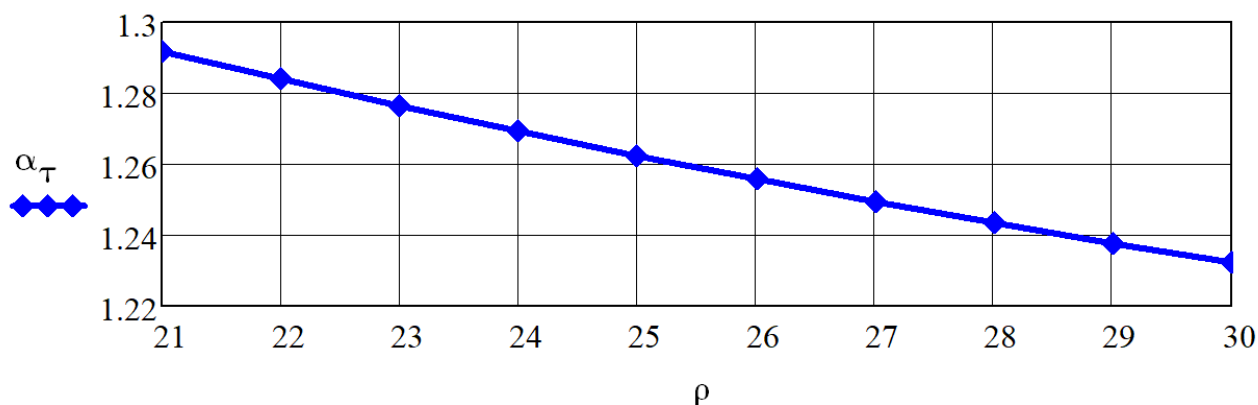


Рисунок 3. Диаграмма зависимости α_T от ρ

$$G_T := \frac{1.15}{\rho} + \frac{2}{d}$$

Вывод: при увеличении радиуса закругления кольцевой галтели от 21 до 30 мм относительный градиент касательного напряжения в области кольцевой галтели уменьшается от 0,068 до 0,052 $\frac{1}{\text{мм}}$ (рис. 4).

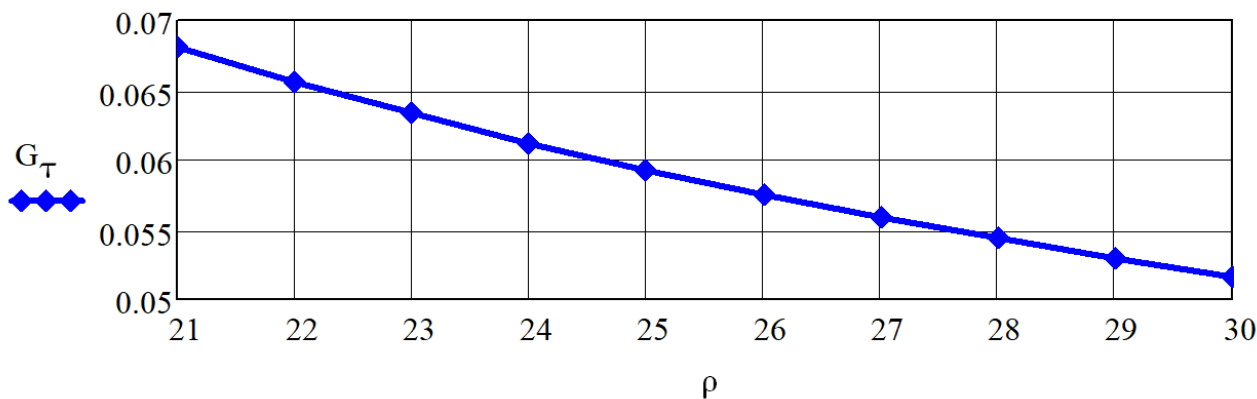


Рисунок 4. Диаграмма зависимости \bar{G}_T от ρ

$$L = 471$$

$$\Theta := \frac{1}{88.3} \cdot \frac{L}{G_T}$$

Вывод: при увеличении радиуса закругления кольцевой галтели от 21 до 30 мм относительный критерий подобия усталостного разрушения повышается от 78 до 103 (рис. 5).

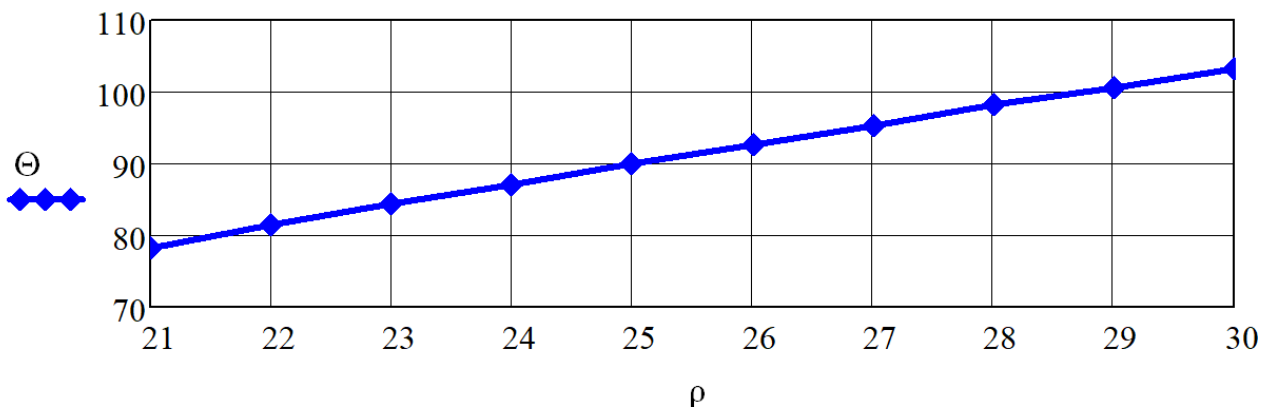


Рисунок 5. Диаграмма зависимости Θ от ρ

$$K_{FT} = 0.94$$

$$\nu_T = 0.13$$

$$K := \frac{2 \cdot \alpha_T}{1 + \Theta^{-\nu_T}} + \frac{1}{K_{FT}} - 1$$

Вывод: при увеличении радиуса закругления кольцевой галтели от 21 до 30 мм коэффициент снижения предела выносливости изменяется от 1,72 до 1,67 (рис. 6).

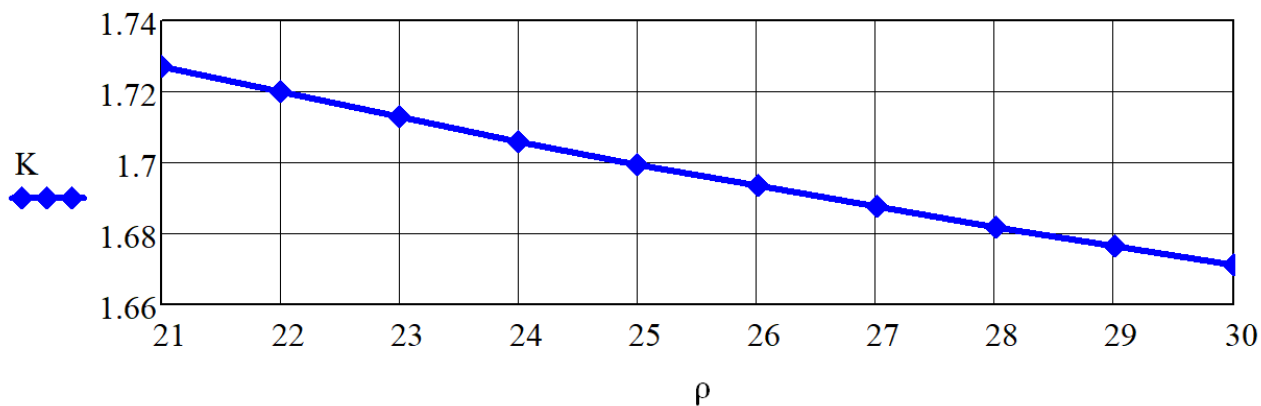


Рисунок 6. Диаграмма зависимости K от ρ

$$\tau_{-1} = 237$$

$$\tau_{-1\text{сеч}} := \frac{\tau_{-1}}{K}$$

Вывод: при увеличении радиуса закругления кольцевой галтели от 21 до 30 мм предел выносливости кольцевой галтели повышается от 137,3 до 141,9 МПа (рис. 7).

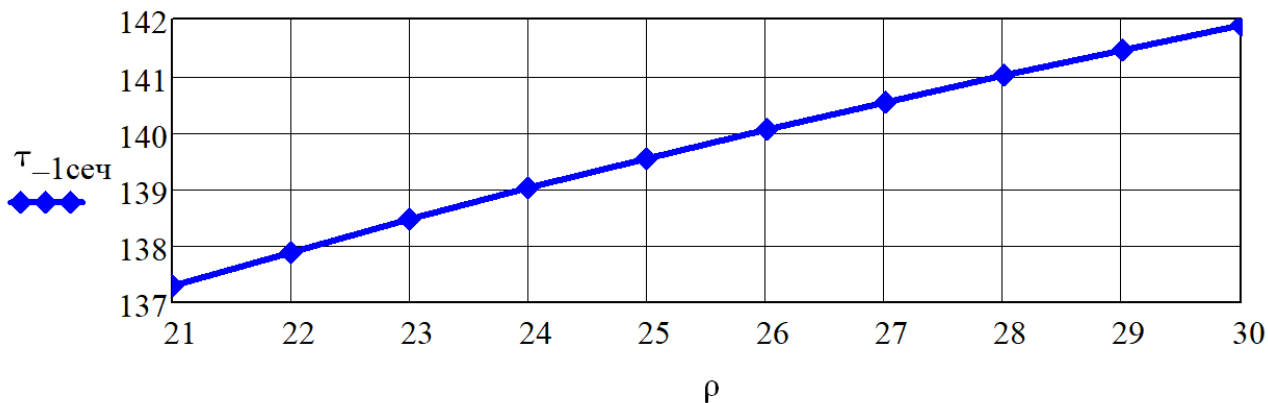
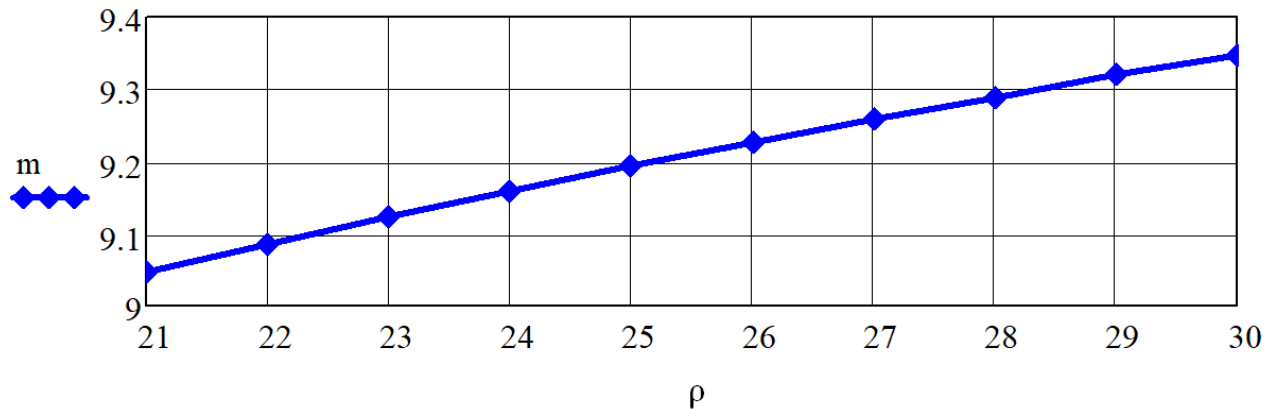


Рисунок 7. Диаграмма зависимости $\tau_{-1\text{сеч}}$ от ρ

$$\sigma_B = 850$$

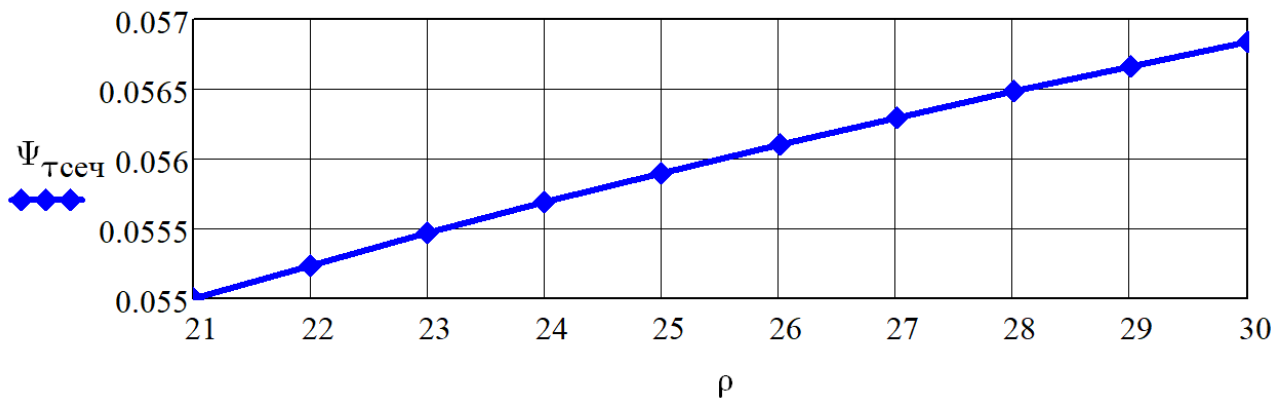
$$m := \frac{5 + \frac{\sigma_B}{80}}{K}$$

Вывод: при увеличении радиуса закругления кольцевой галтели от 21 до 30 мм показатель наклона левой ветви диаграммы Вёллера, построенной в логарифмических координатах, повышается от 9,04 до 9,34 (рис. 8).

Рисунок 8. Диаграмма зависимости m от ρ

$$\Psi_{\text{тсеч}} := \frac{0.01 + 10^{-4} \cdot \sigma_{\text{в}}}{K}$$

Вывод: при увеличении радиуса закругления кольцевой галтели от 21 до 30 мм коэффициент чувствительности стали к асимметрии цикла нагрузки в области галтели повышается от 0,055 до 0,057 (рис. 9).

Рисунок 9. Диаграмма зависимости $\Psi_{\text{тсеч}}$ от ρ

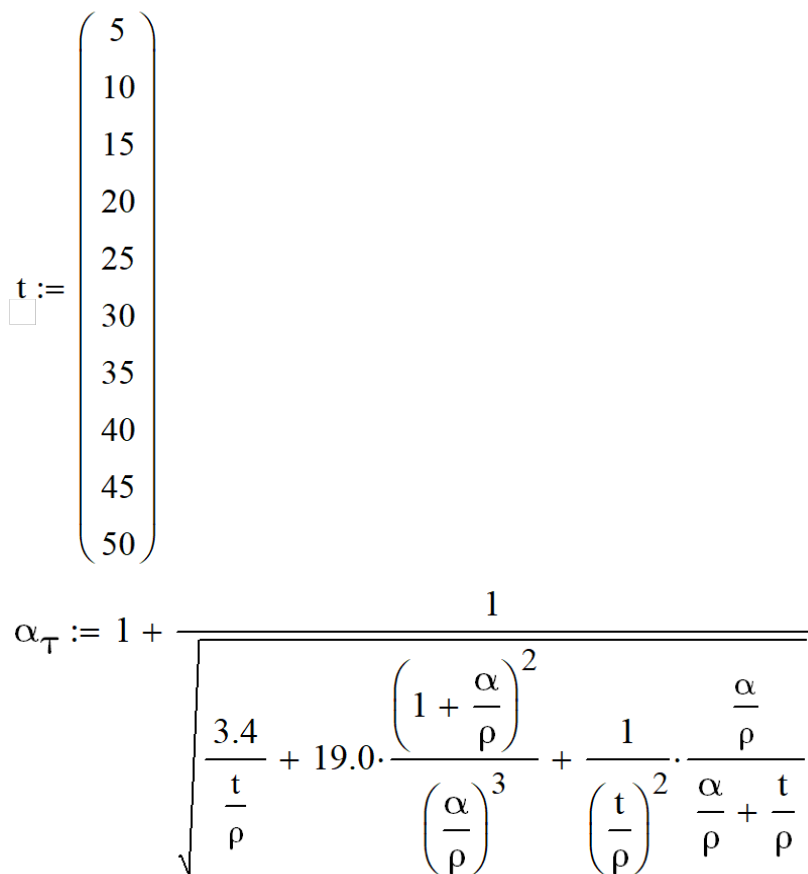
Тест №2 – исследование влияния половины разности большего и меньшего диаметров на предел выносливости кольцевой галтели:

$$D = 250$$

$$d = 150$$

$$\alpha = 75$$

$$\rho := 20$$



Вывод: при увеличении половины разности большего и меньшего диаметров кольцевой галтели от 5 до 50 мм теоретический коэффициент концентрации касательных напряжений в области кольцевой галтели повышается от 1,151 до 1,178 (рис. 10).

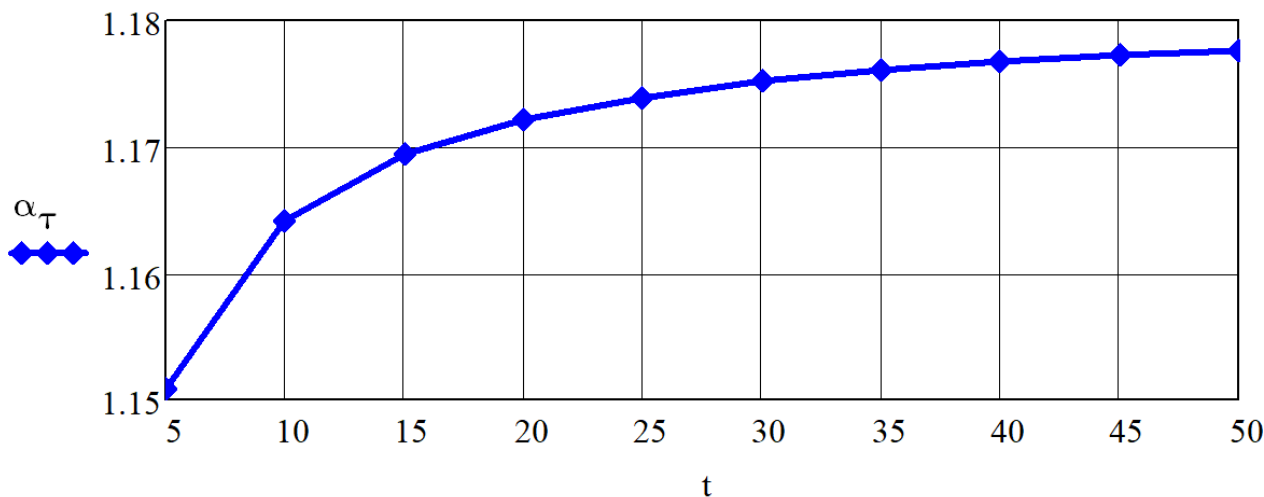


Рисунок 10. Диаграмма зависимости a_T от t

$$G_T := \frac{1.15}{\rho} + \frac{2}{d} \rightarrow 0.07$$

$$L = 471$$

$$\Theta := \frac{1}{88.3} \cdot \frac{L}{G_T} \rightarrow 75.34$$

$$\nu_T = 0.13$$

$$K_{F\tau} = 0.94$$

$$K := \frac{2 \cdot \alpha_{\tau}}{1 + \Theta^{-\nu_{\tau}}} + \frac{1}{K_{F\tau}} - 1$$

Вывод: при увеличении половины разности большего и меньшего диаметров кольцевой галтели от 5 до 50 мм коэффициент снижения предела выносливости кольцевой галтели изменяется от 1,543 до 1,577 (рис. 11).

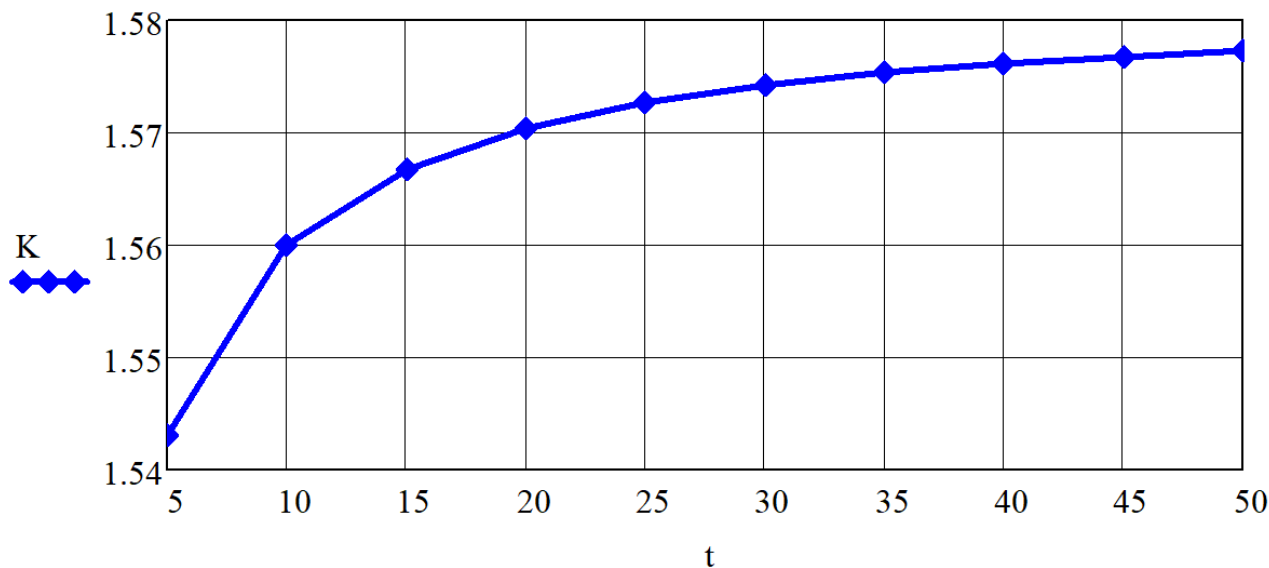


Рисунок 11. Диаграмма зависимости K от t

$$\tau_{-1} = 237$$

$$\tau_{-1\text{сеч}} := \frac{\tau_{-1}}{K}$$

Вывод: при увеличении половины разности большего и меньшего диаметров кольцевой галтели от 5 до 50 мм предел выносливости кольцевой галтели снижается от 153,7 до 150,3 МПа (рис. 12).

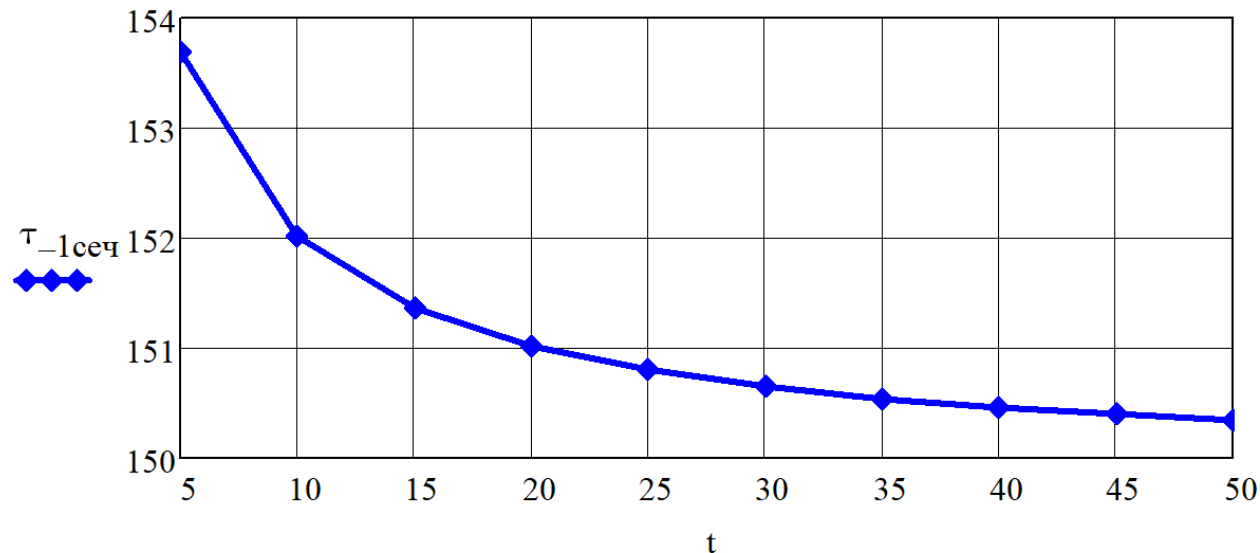


Рисунок 12. Диаграмма зависимости $\tau_{-1\text{сеч}}$ от t

$$\sigma_B = 850$$

$$m := \frac{5 + \frac{\sigma_B}{80}}{K}$$

Вывод: при увеличении половины разности большего и меньшего диаметров кольцевой галтели от 5 до 50 мм показатель наклона левой ветви диаграммы Вёллера, построенной в логарифмических координатах, снижается от 10,13 до 9,91 (рис. 13).

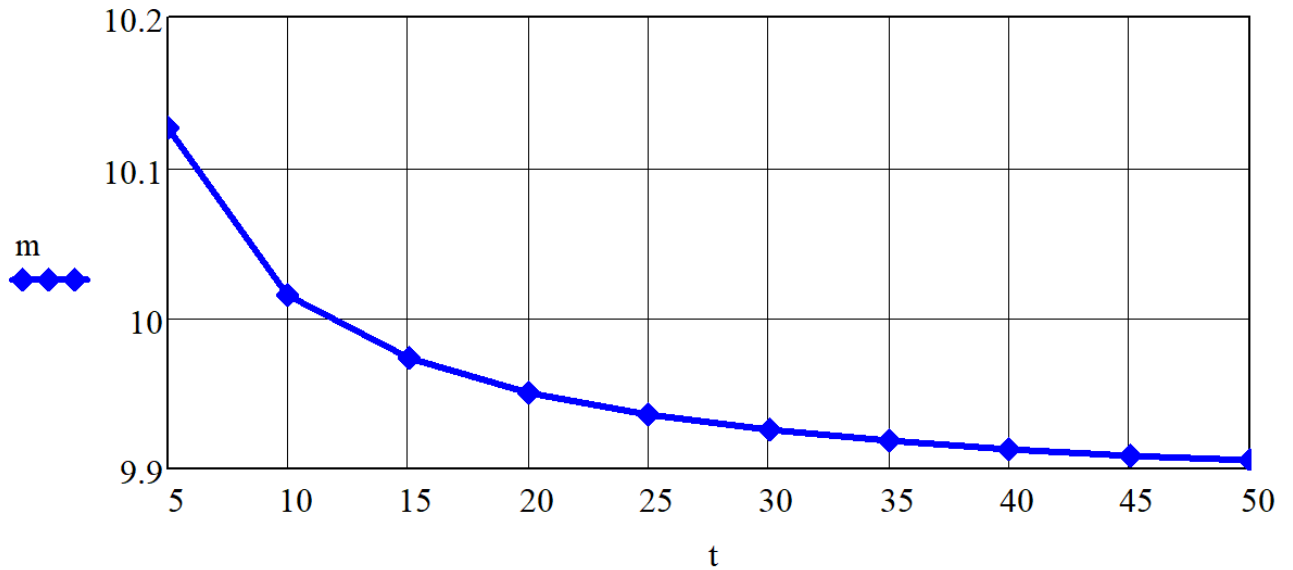


Рисунок 13. Диаграмма зависимости m от t

$$\Psi_{\tau\text{сеч}} := \frac{0.01 + 10^{-4} \cdot \sigma_B}{K}$$

Вывод: при увеличении половины разности большего и меньшего диаметров кольцевой галтели от 5 до 50 мм коэффициент чувствительности стали к асимметрии цикла нагрузки в области галтели немного снижается (рис. 14).

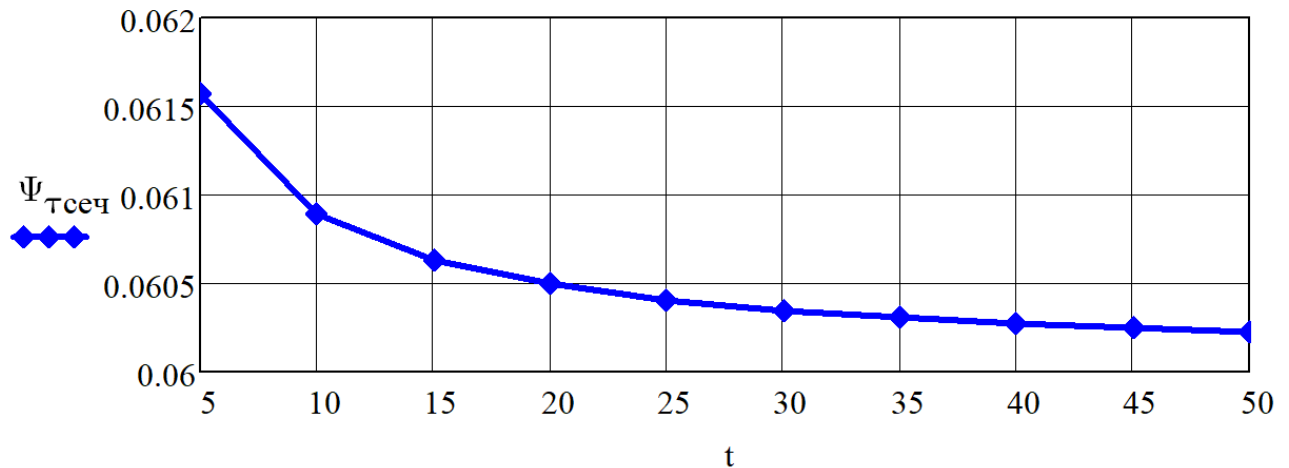


Рисунок 14. Диаграмма зависимости $\Psi_{\tau\text{сеч}}$ от t

Тест №3 – исследование влияния шероховатости поверхности на предел выносливости кольцевой галтели:

$$D = 250$$

$$d = 150$$

$$t := 50$$

$$\alpha = 75$$

$$\rho = 20$$

$$\alpha_T := 1.75$$

$$R_Z := \begin{pmatrix} 1.6 \\ 3.2 \\ 6.3 \\ 12.5 \\ 25 \\ 50 \\ 100 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_B = 850$$

$$K_{F\sigma} := 1 - 0.22 \cdot \log(R_Z) \cdot \left(\log\left(\frac{\sigma_B}{20}\right) - 1 \right)$$

$$K_{F\tau} := 0.575 \cdot K_{F\sigma} + 0.425$$

$$\nu_T = 0.13$$

$$\Theta = 75.34$$

$$K := \frac{2 \cdot \alpha_T}{1 + \Theta^{-\nu_T}} + \frac{1}{K_{F\tau}} - 1$$

Вывод: при увеличении параметра шероховатости (R_z) от 1,6 до 100 мкм коэффициент снижения предела выносливости кольцевой галтели изменяется от 2,26 до 2,43 (рис. 15).

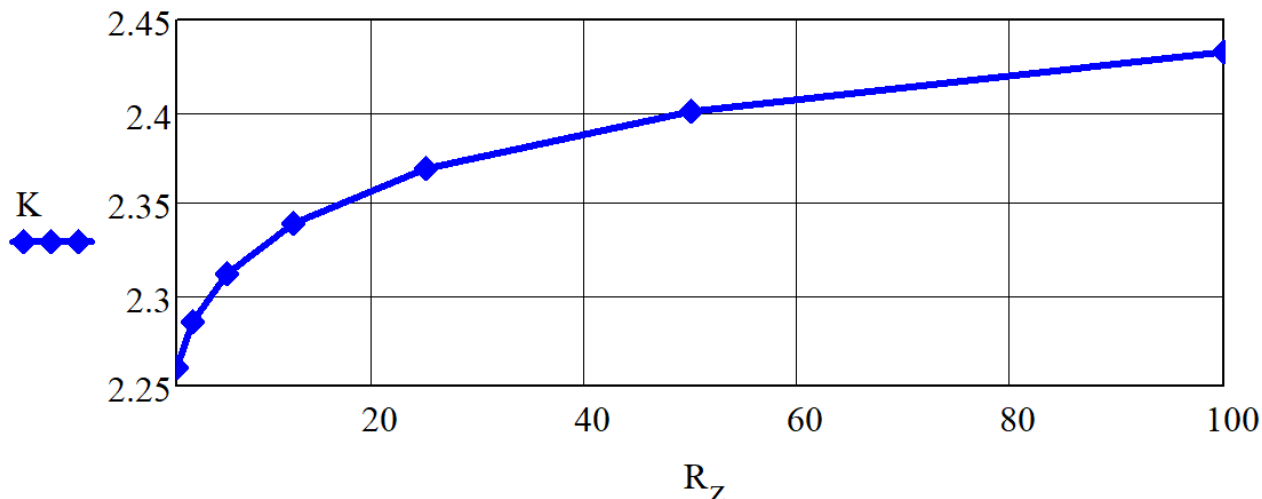


Рисунок 15. Диаграмма зависимости K от R_z

$$\tau_{-1\text{сеч}} := \frac{\tau_{-1}}{K}$$

Вывод: при увеличении параметра шероховатости (R_z) от 1,6 до 100 мкм предел выносливости кольцевой галтели снижается от 105 до 97,5 МПа (рис. 16)

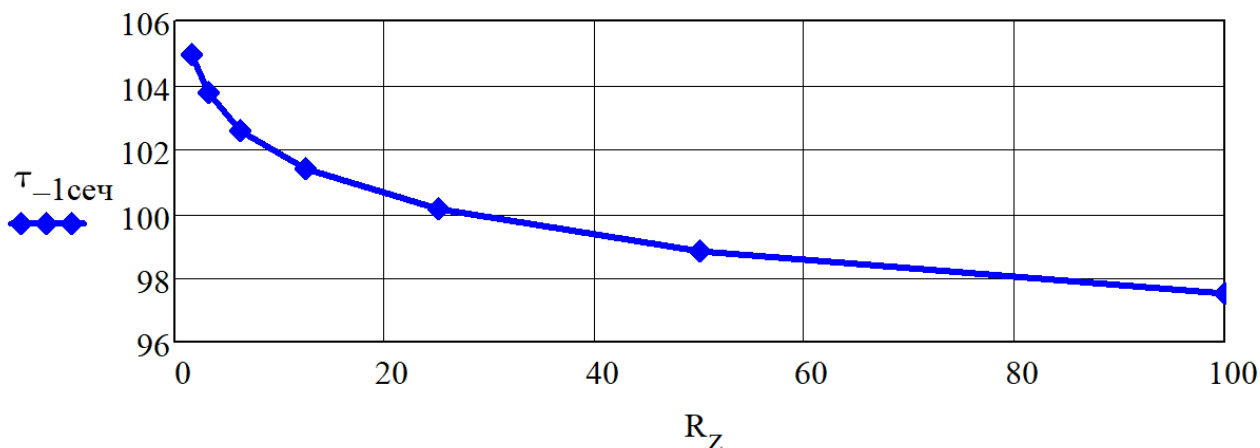
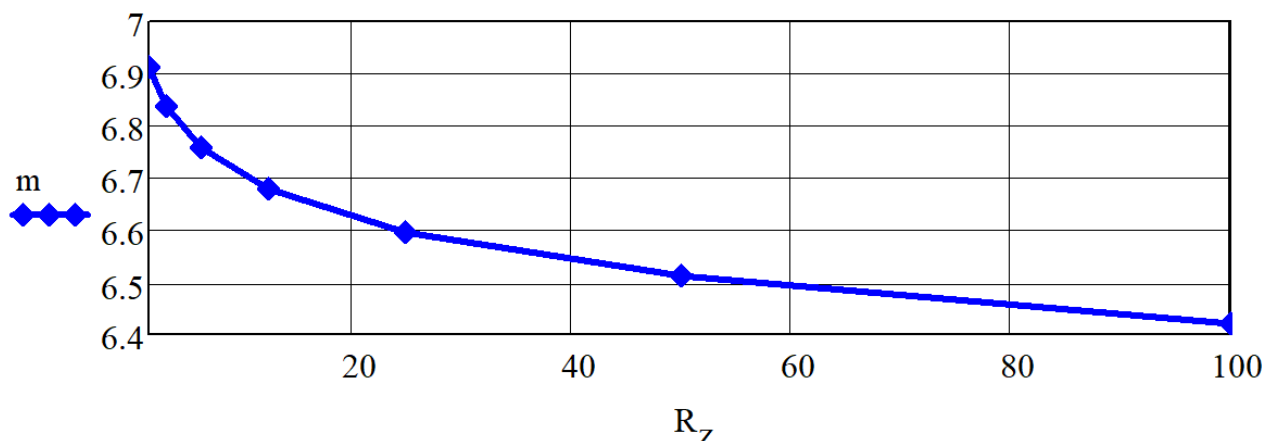


Рисунок 16. Диаграмма зависимости $\tau_{-1\text{сеч}}$ от R_z

$$\sigma_B = 850$$

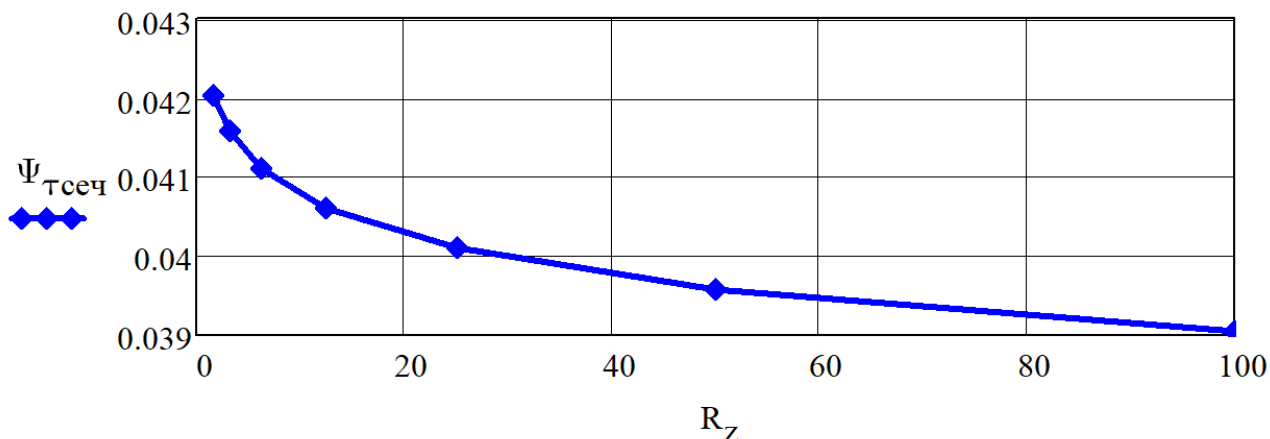
$$m := \frac{5 + \frac{\sigma_B}{80}}{K}$$

Вывод: при увеличении параметра шероховатости (R_z) от 1,6 до 100 мкм показатель наклона левой ветви диаграммы Вёллера, построенной в логарифмических координатах, снижается от 6,9 до 6,4 (рис. 17).

Рисунок 17. Диаграмма зависимости m от R_z

$$\Psi_{\text{тсеч}} := \frac{0.01 + 10^{-4} \cdot \sigma_B}{K}$$

Вывод: при увеличении параметра шероховатости поверхности галтели (R_z) от 1,6 до 100 мкм коэффициент чувствительности стали к асимметрии цикла нагрузки в области галтели снижается от 0,042 до 0,039 (рис. 18).

Рисунок 18. Диаграмма зависимости $\Psi_{\text{тсеч}}$ от R_z

Список литературы:

1. Мальцев А.А. Исследование теоретического коэффициента концентрации напряжений в опасном сечении рабочего валка. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2020. Т.10. №6. С.169–178. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-6-2020/a230002>
2. Мальцев А.А. Исследование коэффициента снижения предела выносливости галтели рабочего валка. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2020. Т.10. №7. С.219–228. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-7-2020/a230052>
3. Мальцев А.А. Исследование влияния параметра шероховатости поверхности на циклическую прочность галтели рабочего валка. – [Электронный ресурс]

Оригинальные исследования (ОРИС). 2020. Т.10. №8. С.62–70. — Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-8-2020/a230060>

References:

1. A.A. Maltsev. Study of the theoretical stress concentration coefficient in the dangerous cross section of the working roll. — [Electronic resource] Original research (ORIS). Vol.10. 2020. No.06. — P.169–178. — Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-6-2020/a230002>
2. A.A. Maltsev. Study of the coefficient of reduction of the endurance limit of the working roll galteli. — [Electronic resource] Original research (ORIS). 2020. Vol.10. No.07. — P.219–228. — Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-7-2020/a230052>
3. A.A. Maltsev. A study of the influence of roughness surface on fatigue strength of fillet work roll. — [Electronic resource] Original research (ORIS). 2020. Vol.10. No.08. — P.62–70. — Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-8-2020/a230060>