



УДК 621.31:621.771.06-88

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО РЕСУРСА ВАЛА ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПО ОЦИФРОВАННОЙ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОЙ ОСЦИЛЛОГРАММЕ

Андрей Анатольевич Мальцев

доцент кафедр ФН-7 и МТ-10 МГТУ им Н.Э. Баумана
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru

Юрий Иванович Беляков

доцент кафедры ФН-7 МГТУ им Н.Э. Баумана
e-mail: belpmm@mail.ru

Ирина Александровна Тарасенко

старший преподаватель кафедры ФН-7 МГТУ им Н.Э. Баумана
e-mail: iri-taraskenko@yandex.ru

Аннотация

По осциллограмме напряжений в опасном сечении шпиндельного вала спрогнозирован ресурс работы электропривода до разрушения шпинделя, выраженный количеством произведенной металлопродукции.

Ключевые слова: электропривод, металлургия, прогнозирование, ресурс.

PREDICTION OF THE CYCLIC LIFE OF THE SHAFT OF THE ELECTRIC DRIVE OF METALLURGICAL MACHINES BY DIGITIZED STRAIN GAUGE OSCILLOSCOPE

Andrey A. Maltsev

associate professor, Bauman Moscow State Technical University
ФН-7 and МТ-10 Departments
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru

Yuri I. Belyakov

associate professor, Bauman Moscow State Technical University
ФН-7 Department
e-mail: belpmm@mail.ru

Irina A. Taraskenko

senior lecturer, Bauman Moscow State Technical University
ФН-7 Department
e-mail: iri-taraskenko@yandex.ru

ABSTRACT

According to the voltage oscillogram in the dangerous cross section of the spindle shaft, the life of the electric drive before the spindle failure is predicted, expressed by the amount of metal products produced.

Keywords: electric drive, metallurgy, oscillogram, strength.

Введение

Традиционная конфигурация электропривода такой металлургической машины как прокатный стан предполагает наличие шпинделей, передающих крутящий момент под значительным углом (рис. 1).

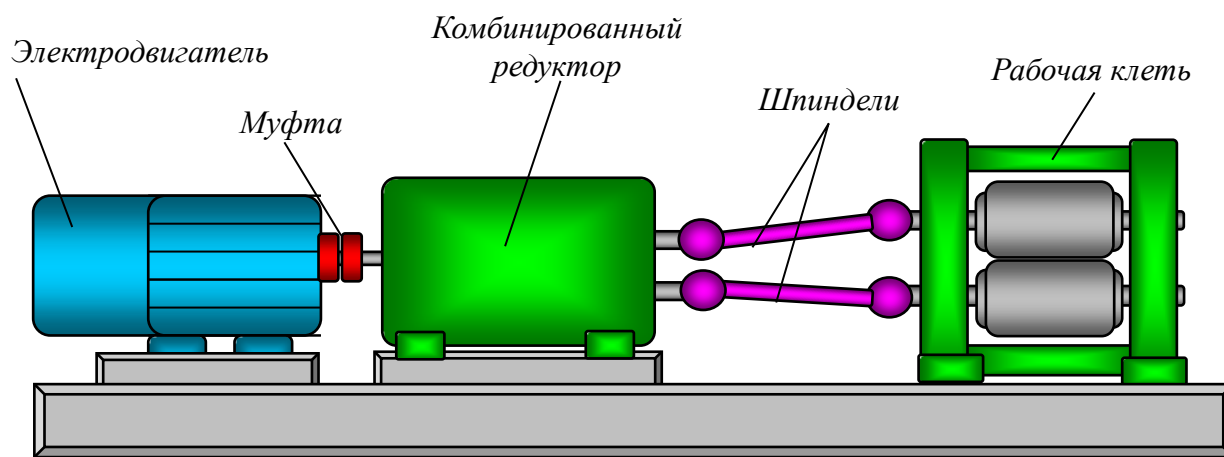


Рисунок 1. Электропривод рабочих валков прокатного стана

Кинематическая схема электропривода имеет вид (рис. 2).

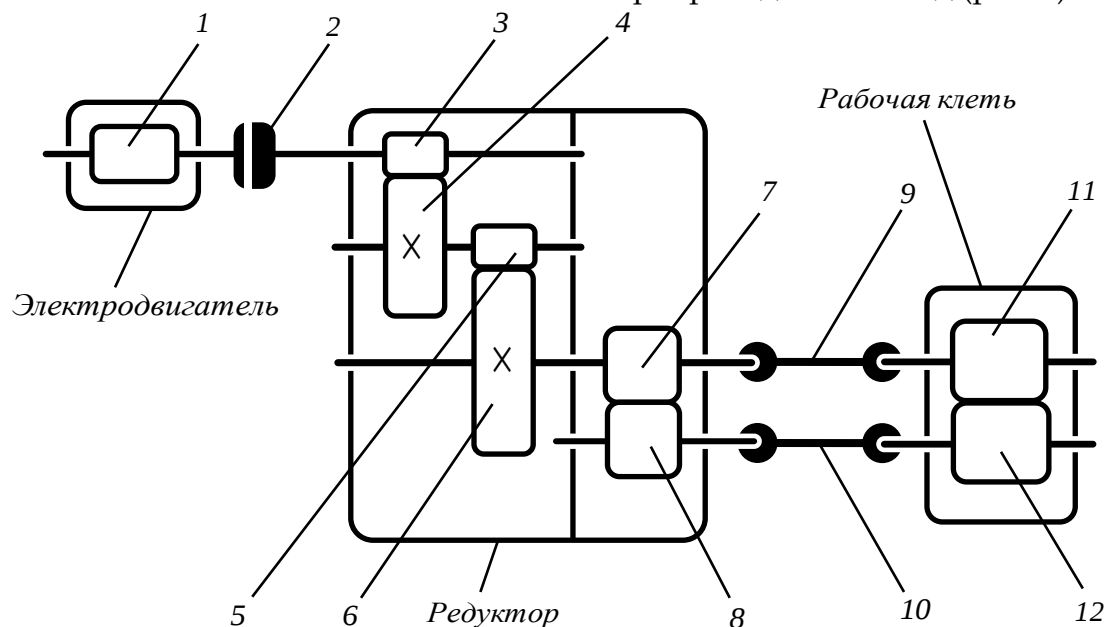


Рисунок 2. Кинематическая схема электропривода

- 1 – ротор электродвигателя; 2 – муфта моторная; 3, 5 – вал-шестерни;
4, 6 – зубчатые колеса; 7, 8 – шестеренные валки
9, 10 – шпиндели; 11, 12 – рабочие валки

Шпиндели соединяют шестеренные и рабочие валки друг с другом и благодаря шарнирам передают крутящий момент под значительным углом, который меняется вследствие изменения раствора валков при продольной прокатке. Если шпиндель металлоемок, то для уменьшения нагрузки на его шарниры, а также на подшипники рабочих и шестеренных валков, применяют уравнивание (грузовое, пружинное, гидравлическое).

Длину L шпинделя рассчитывают по максимально допустимому углу наклона α и необходимому расстоянию h между осями шестеренного и рабочего валков (рис. 3).

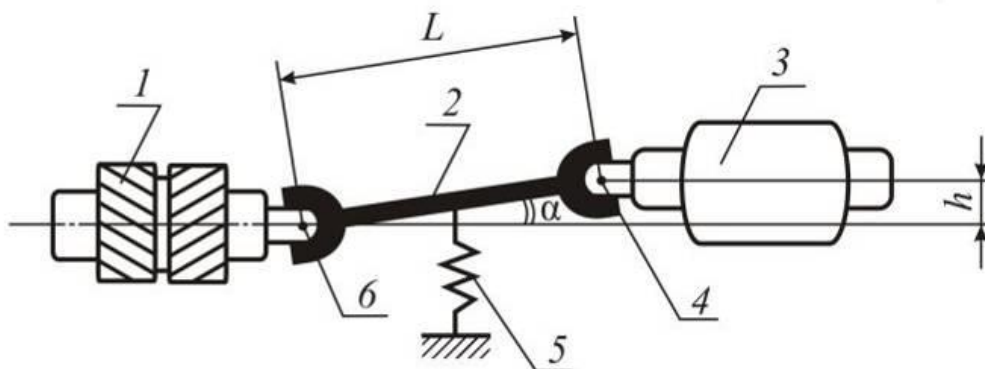


Рисунок 3. Шпиндельное соединение:

- 1 — шестеренный валок;
- 2 — вал шпинделя; 3 — рабочий валок; 4, 6 — шарниры шпинделя;
- 5 — уравнивающее устройство (если необходимо)

При расчете шпинделя на кручение с изгибом (или просто на чистое кручение) следует исходить из статической и динамической (циклической) прочности его опасного поперечного сечения. Динамическое нагружение иногда вызывает усталость металла и приводит к его разрушению при напряжениях, значительно меньших, чем предел прочности. Для проведения испытания на усталостную прочность металлические образцы подвергают воздействию циклических нагрузок в некотором их диапазоне. В каждом случае подсчитывают число циклов от момента начала эксперимента до момента разрушения лабораторного образца.

Объект исследования — опасное поперечное сечение шпиндельного вала, передающего крутящий момент (рис. 4).

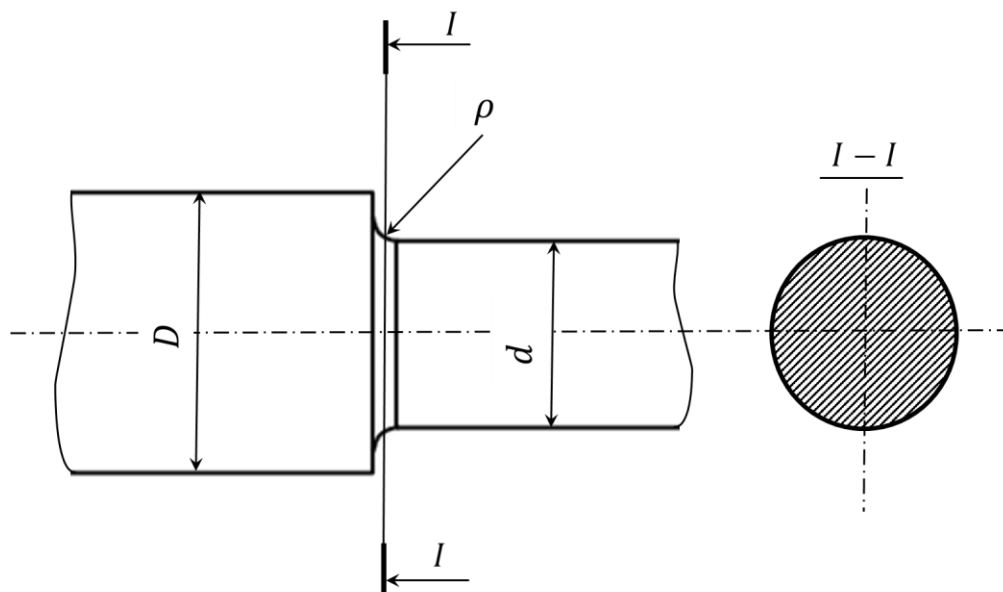


Рисунок 4. Участок шпиндельного вала:

$I - I$ – опасное сечение;

D – диаметр шарнира;

d – диаметр опасного сечения;

ρ – радиус галтели

Предмет исследования – циклическая прочность опасного сечения шпиндельного вала, выраженная количеством прокатанных заготовок до момента появления макроскопической трещины. Чаще всего усталостные трещины возникают у поверхности вала, но иногда и в толще материала. По мере развития усталостной трещины уменьшается рабочая площадь поперечного сечения вала вплоть до его внезапного разрушения. На поверхности усталостного излома вала шпинделя будут наблюдаться две ярко выраженные зоны: гладкая – результат постепенного развития трещины, и грубозернистая – след внезапного разрушения.

Цель исследования – дать приблизительную оценку циклическому ресурсу опасного сечения шпиндельного вала.

Задачи исследования:

- ✓ вычисление предела выносливости вала в опасном сечении;
- ✓ вычисление координаты точки перелома кривой усталости;
- ✓ вычисление показателя угла наклона левого участка кривой;
- ✓ построение диаграммы Вёллера в логарифмических координатах;
- ✓ визуализация имитационной тензометрической осциллограммы;
- ✓ обработка осциллограммы методом размахов;
- ✓ построение спектра касательных напряжений;
- ✓ приблизительная оценка циклической прочности опасного сечения.

Материалы и методы исследования

Из предыдущих исследований [1, 2, 3] известен предел выносливости вала (сталь 45) в его опасном сечении:

$$\tau_{-1\text{сеч}} = \frac{\tau_{-1}}{K} = \frac{178,97}{2,17} \approx 83 \text{ МПа}, \quad (1)$$

где τ_{-1} – предел выносливости лабораторного образца, изготовленного из стали 45; K – коэффициент, учитывающий снижение предела выносливости.

Вычислен коэффициент чувствительности металла в опасном сечении вала к асимметрии цикла нагрузки

$$\Psi = \frac{0,01 + 10^{-4} \cdot \sigma_{\text{в}}}{K} = 0,033, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{в}} = 610$ МПа — предел прочности стали 45.

Величина N_G абсциссы точки перелома кривой Веллера, построенной в логарифмических координатах, колеблется в пределах от 10^6 до $3 \cdot 10^6$ циклов. Согласно ГОСТ 25.504-82 «Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости» в расчетах на прочность при переменных напряжениях, когда отсутствуют данные натурных усталостных испытаний, принимают в среднем $N_G = 2 \cdot 10^6$ циклов.

Вычислена величина m — показатель наклона α левой ветви кривой Веллера, построенной в логарифмических координатах:

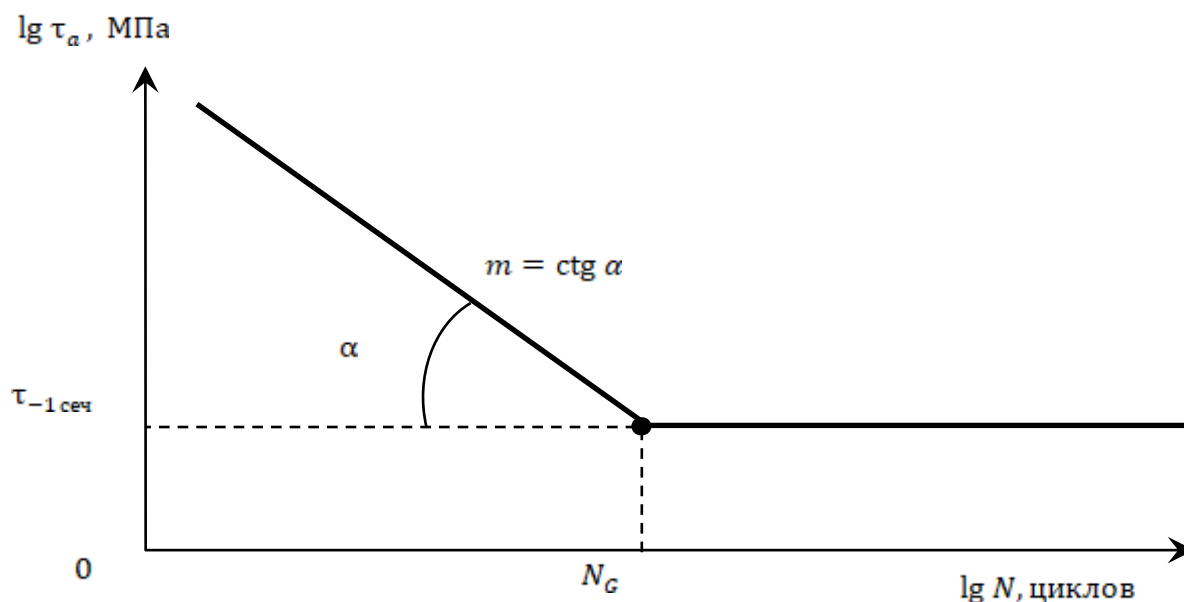
$$m = \frac{5 + \frac{\sigma_{\text{в}}}{80}}{K} = 5,8. \quad (3)$$

Число N знакопеременных симметричных циклов нагружения, которое деталь выдерживает до разрушения в опасном сечении, зависит от амплитуды цикла τ_a

$$N = \begin{cases} \frac{\tau_{-1\text{сеч}}^m N_G}{\tau_a^m}, & \text{при } \tau_a \geq \tau_{-1\text{сеч}}; \\ \infty, & \text{при } \tau_a < \tau_{-1\text{сеч}}, \end{cases} \quad (4)$$

где $0 < \tau_a \leq 0,7\sigma_{\text{в}}$.

По уравнениям (4) в логарифмических координатах построена кривая Вёллера, которая имеет две прямолинейные ветви — наклонную (под углом α) и горизонтальную (рис. 5).



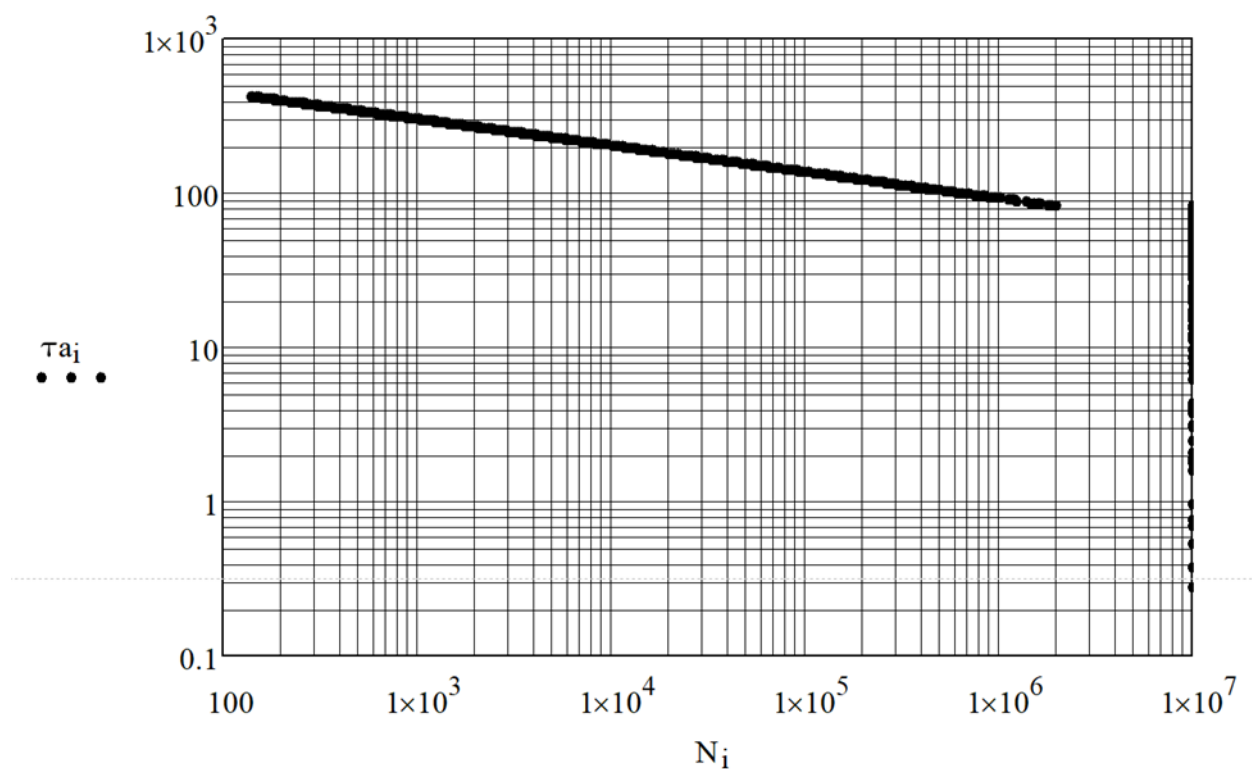


Рисунок 5. Диаграмма Вейера в логарифмических координатах:

N — ось чисел циклов; τ_a — ось амплитудных напряжений

Исходные тензометрические данные — имитационная осциллограмма касательных напряжений, возникающих в опасном сечении шпиндельного вала при передаче им крутящего момента (рис. 6).

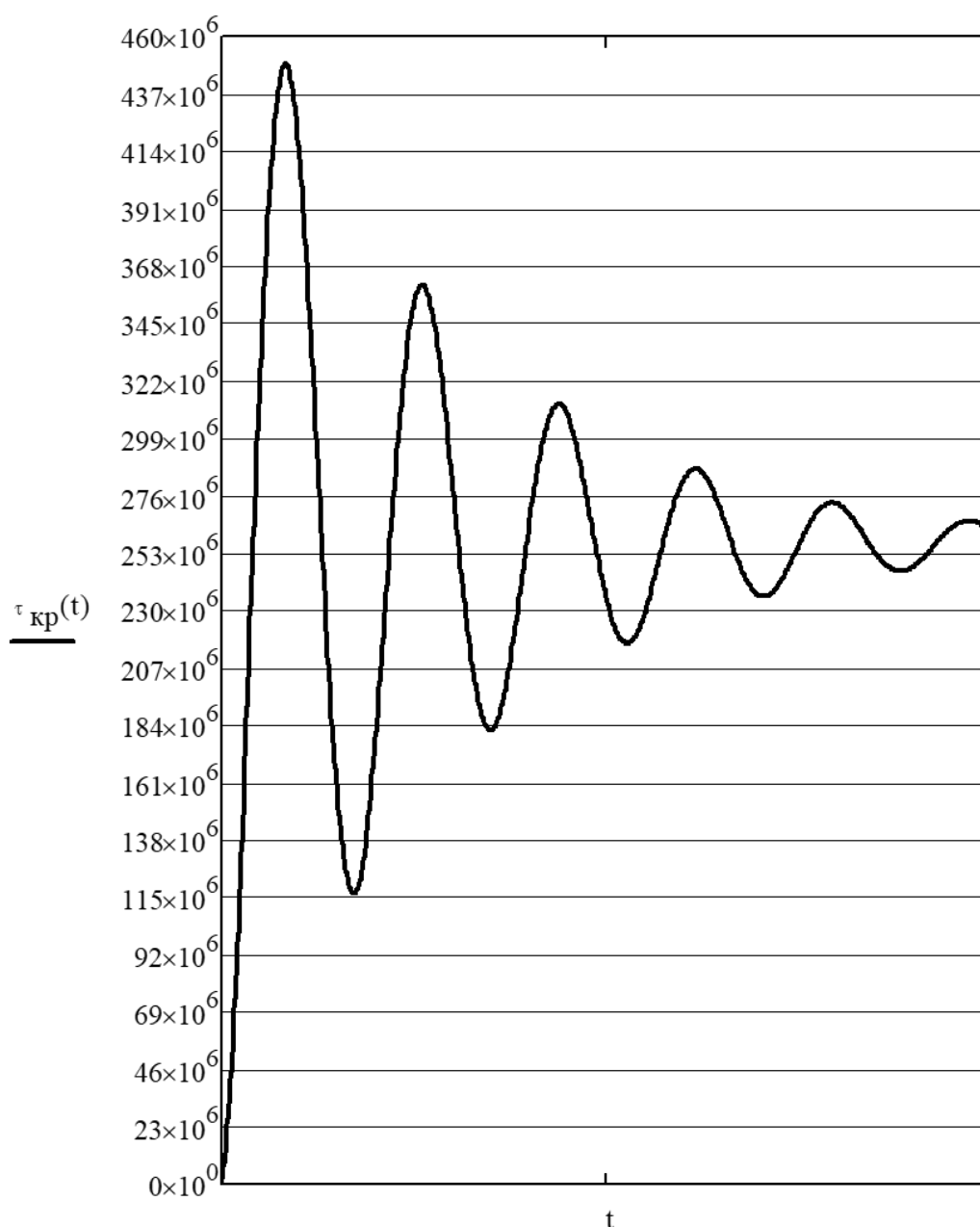


Рисунок 6. Фрагмент осциллограммы с переходным процессом:
 $\tau_{кр}(t)$ — функция касательных напряжений [МПа]; t — время [с]

Для вероятностной оценки циклической прочности опасного сечения шпиндельного вала использован метод статистического моделирования (Монте-Карло).

Результаты и их обсуждение

На обработанном фрагменте осциллограммы обнаружено 6 максимумов и 6 минимумов (рис. 7).

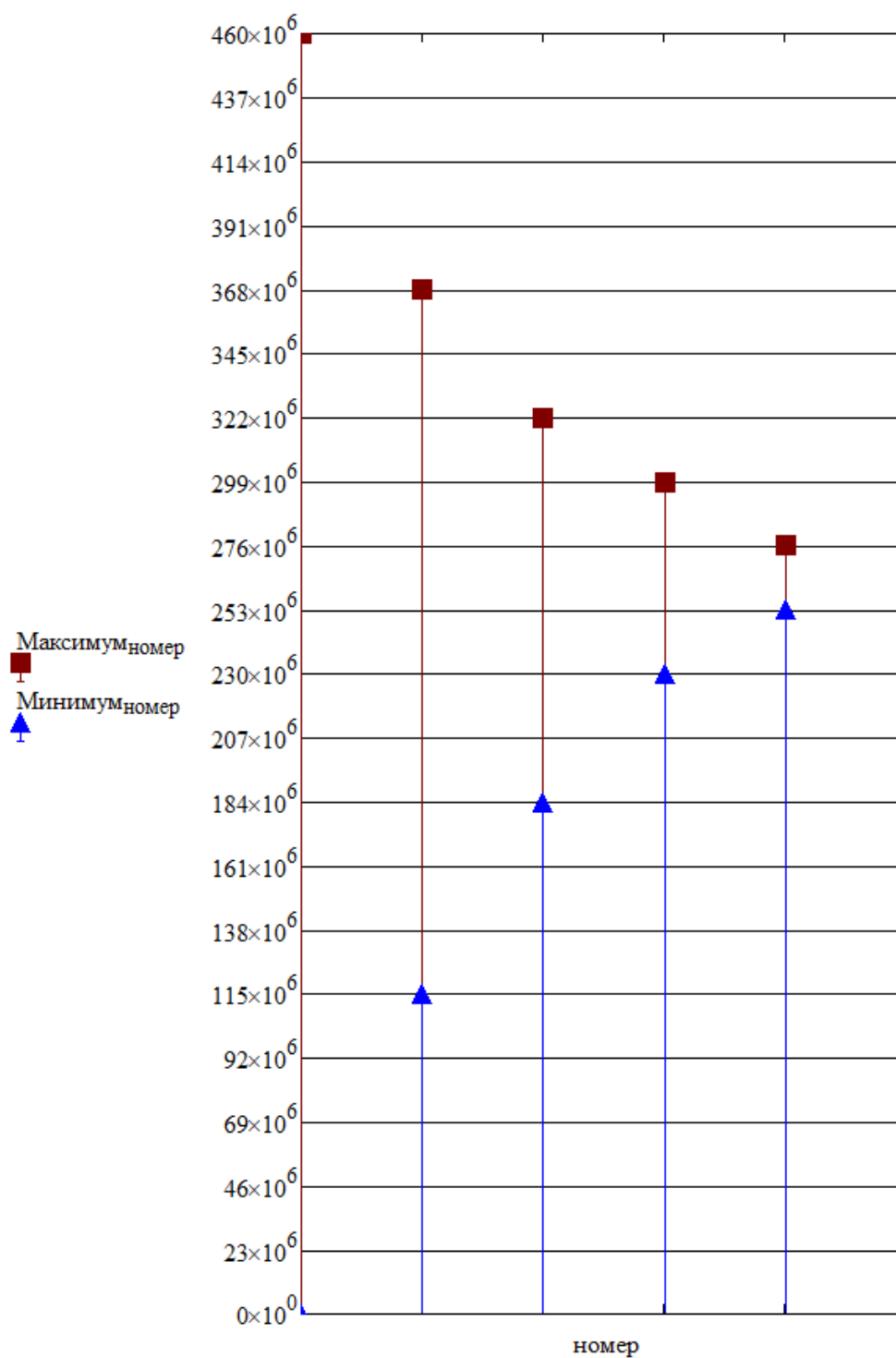


Рисунок 7. Экстремумы на осциллограмме:

Максимум_{номер} — максимумы [МПа];

Минимум_{номер} — минимумы [МПа]

Вычислены амплитудные и средние значения восходящих размахов, являющиеся к тому же параметрами циклов, поскольку каждый цикл состоит из двух размахов: восходящего и нисходящего (рис. 8).

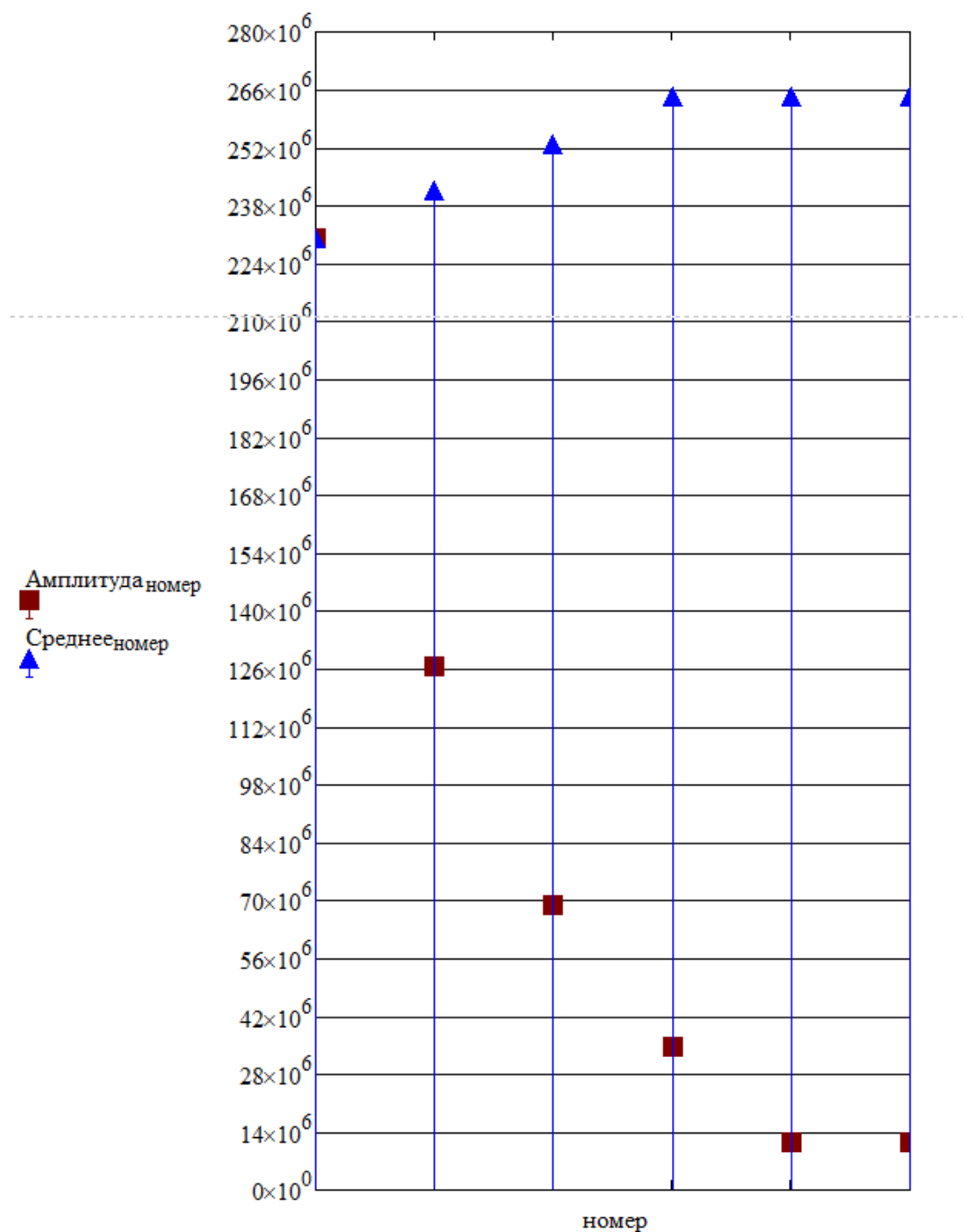


Рисунок 8. Параметры размахов (циклов):

Амплитуда_{номер} – амплитуды [МПа];

Среднее_{номер} – средние значения [МПа]

Амплитудные и средние значения восходящих размахов были вычислены в среде MathCAD:

$$\text{Амплитуда}_{\text{номер}} := \frac{\text{Максимум}_{\text{номер}} - \text{Минимум}_{\text{номер}}}{2};$$

$$\text{Среднее}_{\text{номер}} := \frac{\text{Максимум}_{\text{номер}} + \text{Минимум}_{\text{номер}}}{2}.$$

Вычислены приведенные к симметричному циклу амплитуды (рис. 9):

$$\tau_{\text{номер}} := \text{Амплитуда}_{\text{номер}} + \Psi \cdot \text{Среднее}_{\text{номер}}. \quad (5)$$

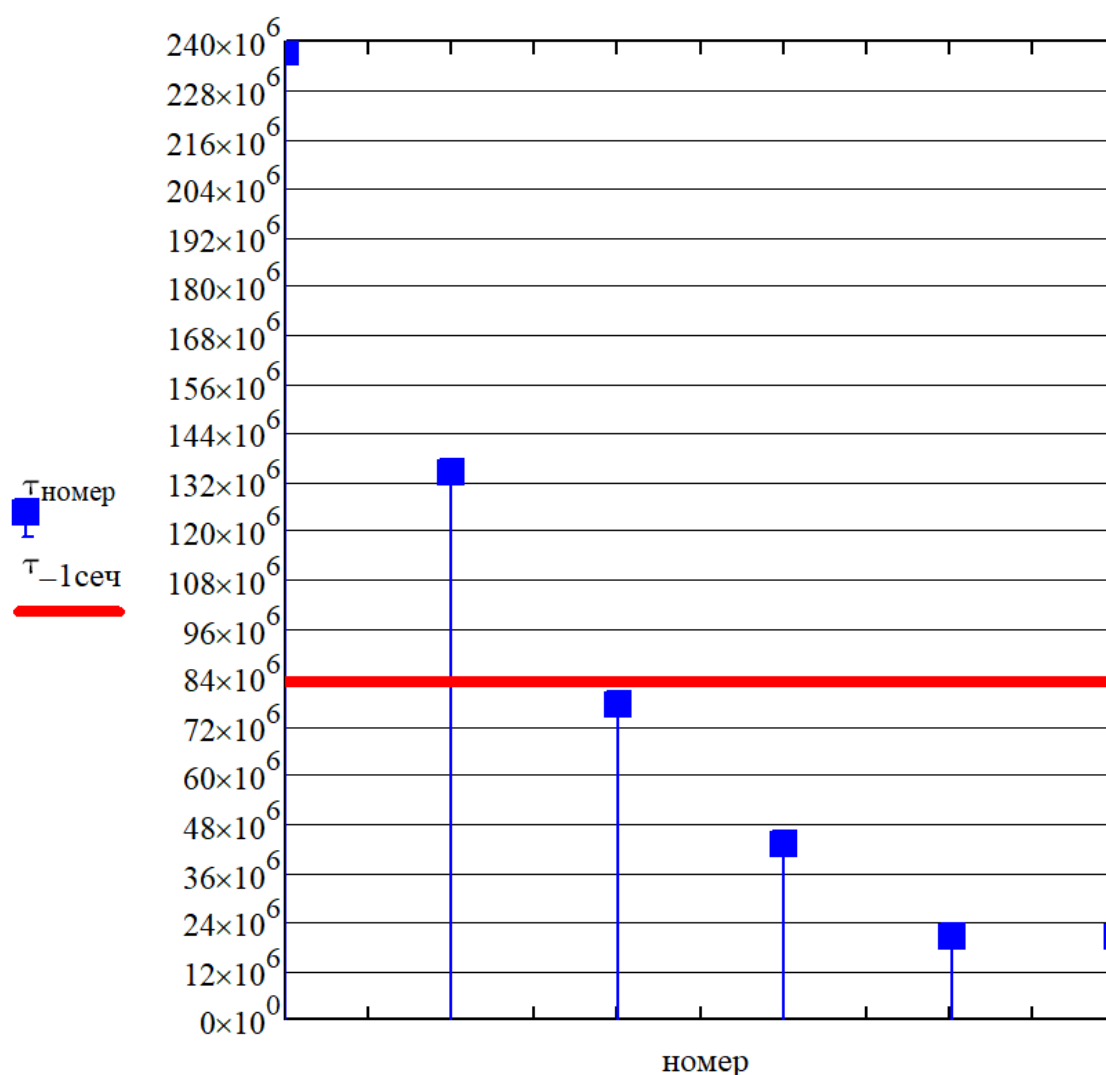


Рисунок 9. Спектр касательных напряжений:

$\tau_{\text{номер}}$ – амплитуды, приведенные к симметричному циклу [МПа];

$\tau_{1\text{сеч}}$ – предел выносливости вала в его опасном сечении [МПа]

Циклический ресурс, выраженный количеством прокатанных заготовок до разрушения шпиндельного вала в опасном сечении, спрогнозирован с привлечением скорректированной линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений:

$$N_{\text{заг}} = \frac{a_p \tau_{1\text{сеч}}^m N_G}{\sum_{(\tau_{\text{номер}} \geq \tau_{1\text{сеч}})} \tau_{\text{номер}}^m} = 1800 \text{ штук}, \quad (6)$$

где a_p – корректирующий коэффициент ($0.1 \leq a_p < 1$);

$$a_p = \frac{\tau_1 \xi - 0,5 \tau_{1\text{сеч}}}{\tau_1 - 0,5 \tau_{1\text{сеч}}} = 0,4;$$

$$\xi = \frac{\sum_{(\tau_{\text{номер}} \geq 0,5 \tau_{1\text{сеч}})} \tau_{\text{номер}}}{4 \tau_1} = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4}{4 \tau_1} = 0,53.$$

Выводы

1. Циклический ресурс вала электропривода металлургической машины целесообразнее выражать не в часах работы, а в количестве выпускаемой металлопродукции.

2. Спрогнозированный ресурс работы шпиндельного вала от начала его эксплуатации до поломки в опасном сечении составляет 1800 заготовок, прокатанных на стане.

3. В следующей статье авторы планируют выполнить статистическое моделирование циклической прочности опасного сечения шпиндельного вала методом Монте-Карло.

Список литературы

1. Мальцев А.А., Тарасенко И.А. Цифровая обработка тензометрических данных с выявлением спектра напряжений в опасном сечении вала электропривода металлургической машины. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС), 2020, № 02. – С. 69 – 79. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-2-2020/a229889>
2. Мальцев А.А. Алгоритм цифровой обработки осциллограммы крутящего момента на валу электродвигателя автоматического стана. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС), 2020, № 01. – С. 107 – 117. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-01-2020/a229877>
3. Мальцев А.А. Исследование методов обработки осциллограммы крутильных колебаний главного электропривода металлургической машины в среде MathCAD. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС), 2019, №10. – С. 74 – 86. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2019-oris-10-2019/a229809>

References

1. Maltsev A. A., Tarasenko I. A. Digital processing of tensometric data with the detection of the stress spectrum in the dangerous section of the shaft of the electric drive of a metallurgical machine. – [Electronic resource] Original research (ORIS), 2020, No. 02. – Pp. 69-79. – Mode of access: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-2-2020/a229889> [in Russian].
2. Maltsev A. A. Algorithm for digital processing of the torque oscillogram on the shaft of the automatic mill motor. - [Electronic resource] Original research (ORIS), 2020, No. 01. – Pp. 107-117. – Mode of access: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2020-oris-01-2020/a229877> [in Russian].
3. Maltsev A. A. Investigation of methods for processing the torsional oscillogram of the main electric drive of a metallurgical machine in the MathCAD environment. – [Electronic resource] Original research (ORIS), 2019, No. 10. – Pp. 74-86. – Mode of access: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2019-oris-10-2019/a229809> [in Russian].