Научно-практический электронный журнал
Оригинальные исследования (ОРИС), *ISSN 2222-0402*
www.ores.su
original-research.ru

УДК 621.31:621.771.06-88

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ГАЛТЕЛИ РАБОЧЕГО ВАЛКА ПО КРИТЕРИЮ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

Андрей Анатольевич Мальцев
к.т.н., доцент кафедр ФН-7 и МТ-10 МГТУ им Н.Э. Баумана
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru

Тронников Александр Иванович
к.т.н., доцент кафедры ФН-7 МГТУ им Н.Э. Баумана
e-mail: a.tronnikov@hotmail.com

Аннотация

Рабочий валок прокатного стана имеет несколько опасных сечений, одно из которых расположено в месте перехода от приводного конца к шейке. Крутильные колебания в электроприводе рабочей клети придают циклический характер касательным напряжениям, возникающим в опасном сечении валка при кручении. На осциллограмме крутильных колебаний были обнаружены асимметричные циклы, амплитуды которых превышают предел выносливости рабочего валка в опасном сечении, что в итоге приведет к поломке валка. Дана вероятностная оценка безотказной работы кольцевой галтели по критерию ее циклической прочности.

Ключевые слова: безотказность, металлургия, рабочий валок, галтель.

ESTIMATION OF THE PROBABILITY OF FAILURE-FREE OPERATION OF THE WORKING ROLL GALTELI BY THE CYCLIC STRENGTH CRITERION

Andrey A. Maltsev
associate professor, BMSTU ФН-7 and MT-10 Departments
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru

Alexander I. Tronnikov
associate professor, BMSTU ФН-7 Department
e-mail: a.tronnikov@hotmail.com

ABSTRACT

The working roll of the rolling mill has several dangerous sections, one of which is located at the transition point from the drive end to the neck. Torsional vibrations in the electric drive of the working stand give a cyclic character to tangential stresses that occur in the dangerous cross-section of the roll during torsion. On the torsional oscillation waveform,

asymmetric cycles were detected, the amplitudes of which exceed the endurance limit of the working roll in a dangerous cross-section, which will eventually lead to roll failure. A probabilistic estimation of the failure-free operation of the ring galtel is given by the criterion of its cyclic strength.

Keywords: reliability, metallurgy, working roll, galtel.

Введение

Объект исследования — рабочие валки, являющиеся технологическим инструментом прокатного стана (рис.1).

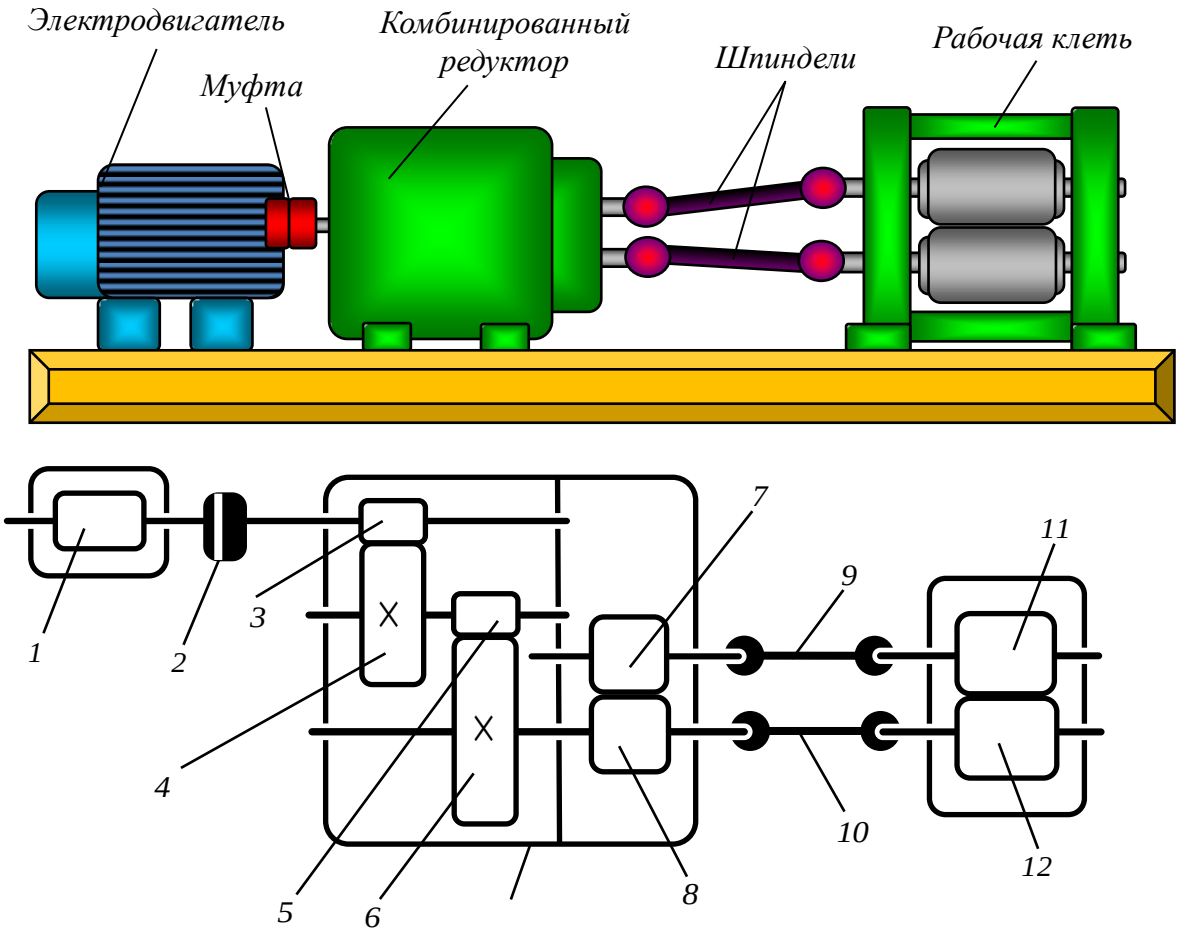

Рисунок 1. *Рабочая клеть с электроприводом:*
1 – ротор электродвигателя;
2 – соединительная муфта;
3, 5 – вал-шестерни;
4, 6 – зубчатые колеса;
7, 8 – шестеренные валки;
9, 10 – шпиндели;
11, 12 – рабочие валки

Цель исследования – повысить эксплуатационную надежность рабочих валков клети, осуществляющих основную технологическую операцию [1], связанную с деформацией металла прокатываемой заготовки (рис.2).

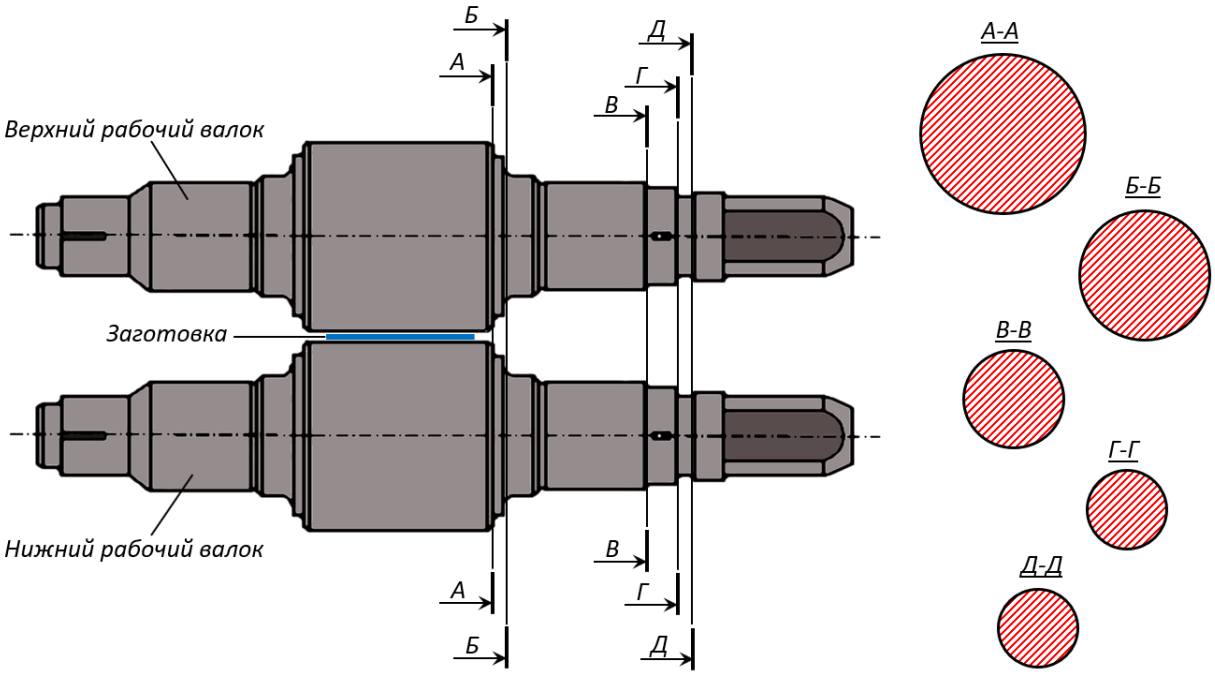

Рисунок 2. *Технологический инструмент рабочей клети*

Эксплуатационная надежность технологического инструмента прокатного стана характеризуется безотказностью, долговечностью, ремонтопригодностью и сохраняемостью. Основными показателями эксплуатационной надежности рабочего валка являются его вероятность безотказной работы, наработка на отказ, технический ресурс, время восстановления работоспособного состояния и коэффициент технического использования.

Задача исследования – дать вероятностную оценку безотказности кольцевой галтели в месте перехода от приводного конца к шейке рабочего валка, где расположено одно из опасных поперечных сечений (*В-В*).

Материалы и методы исследования

Исходные справочные данные – механические свойства стали 150ХНМ, из которой изготовлен рабочий валок.

Предел прочности стали 150ХНМ при растяжении-сжатии [2]:

Максимальное значение $\sigma_{в\,max}$, МПа …… 873

Минимальное значение $\sigma_{в\,min}$, МПа …… 834

Математическое ожидание $\langle\sigma_в\rangle$, МПа …… 856

Среднеквадратическое отклонение $S_{\sigma_в}$, МПа …… 20

Предел выносливости стали 150ХНМ при кручении [3]:

Максимальное значение $\tau_{-1\,max}$, МПа …… 242

Минимальное значение $\tau_{-1\,min}$, МПа …… 233

Математическое ожидание $\langle\tau_{-1}\rangle$, МПа …… 238

Среднеквадратическое отклонение $S_{\tau_{-1}}$, МПа …… 5

Исходные данные из чертежей – геометрические размеры опасного сечения (*В-В*) и качество механической обработки поверхности кольцевой галтели, расположенной в области этого сечения (табл. 1).

Таблица 1.

Геометрические характеристики кольцевой галтели [3]

Сечения	Радиус закругления ρ, мм	Диаметры, мм		Шероховатость поверхности R_z, мкм
		Больший D	Меньший d	
А-А	2	450	380	6,3
Б-Б	30	380	280	6,3
В-В	10	260	230	6,3
Г-Г	1,6	230	190	12,5
Д-Д	1,6	210	190	12,5

По мнению авторов статьи, руководящий технический материал (РТМ) 24.090.25-76 «Краны грузоподъемные. Расчет вероятности безотказной работы элементов», который распространяется на механизмы и металлоконструкции кранов и содержит описание методов расчета вероятности безотказной работы отдельных элементов и их групп, пригоден для расчета вероятности безотказной работы кольцевой галтели рабочего валка прокатного стана.

В зависимости от степени ответственности опасные сечения рабочего валка предложено разделить на две группы. К первой группе целесообразно отнести опасные сечения (*А-А* и *Б-Б*) в месте перехода от шейки к бочке валка; отказ любого из этих сечений сразу приведет к аварии, поскольку рабочий валок одной стороной не будет опираться на подшипник. Ко второй группе относятся опасные сечения (*В-В*, *Г-Г* и *Д-Д*) в месте перехода от приводного конца к шейке валка, отказ которых не столь катастрофичен в предположении, что некоторое время возможно осуществление процесса прокатки, когда один из валков станет холостым.

Другими словами, вероятность безотказной работы технологического инструмента, графически представленная в виде блок-схемы (рис. 3), зависит от вероятности безотказной работы каждого из опасных сечений.

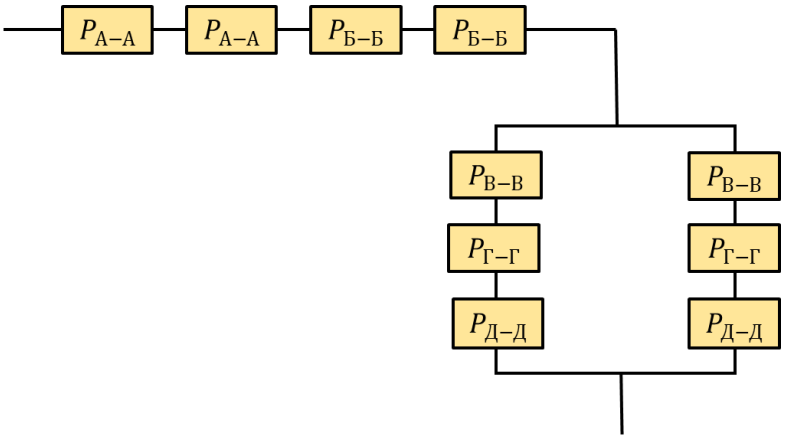

Рисунок 3. *Система с последовательно-параллельным соединением элементов*

Вероятность безотказной работы $P(t)$ системы с последовательным соединением элементов зависит от числа элементов n, и от вероятности безотказной работы каждого i -го элемента $P_i(t)$ в рассматриваемый момент времени t:

$$P(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t). \qquad (1)$$

Вероятность безотказной работы рабочего валка в месте перехода от шейки к бочке (*А-А* и *Б-Б*)

$$P_{шей-боч}(t) = P_{А-А}(t) \cdot P_{Б-Б}(t). \qquad (2)$$

Вероятность безотказной работы рабочего валка в месте перехода от приводного конца к шейке (*В-В*, *Г-Г* и *Д-Д*)

$$P_{конц-шей}(t) = P_{В-В}(t) \cdot P_{Г-Г}(t) \cdot P_{Д-Д}(t). \qquad (3)$$

Вероятность отказа $G(t)$ системы из n параллельно соединенных элементов

$$G(t) = \prod_{i=1}^{n} G_i(t). \qquad (4)$$

Соответственно, вероятность безотказной работы системы из n параллельно соединенных элементов:

$$P(t) = 1 - G(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} G_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_i(t)). \qquad (5)$$

Вероятность безотказной работы технологического инструмента

$$P_{\text{тех инстр}}(t) = P_{\text{шей-боч}}(t) \cdot P_{\text{шей-боч}}(t) \times$$
$$\times \left[1 - \left(1 - P_{\text{конц-шей}}(t)\right) \cdot \left(1 - P_{\text{конц-шей}}(t)\right)\right]. \qquad (6)$$

Далее приведен расчет вероятности безотказной работы только одного из элементов системы – кольцевой галтели, расположенной в месте опасного сечения *В-В*.

Касательные напряжения, возникающие в опасном поперечном сечении (*В-В*) при кручении, предел прочности и предел выносливости стали 150ХНМ являются случайными величинами, поэтому безотказность кольцевой галтели, как и другие показатели надежности, имеет вероятностный характер.

Вероятность безотказной работы кольцевой галтели (*В-В*)

$$P_{\text{В-В}}(t) = P_{\text{н}}(t) \cdot P_{\text{ц}}(t), \qquad (7)$$

где $P_{\text{н}}(t)$ – вероятность безотказной работы по условию не превышения касательными напряжениями $\tau_{\text{В-В}}$, возникающими в опасном сечении (*В-В*) при кручении рабочего валка, некоторого допускаемого касательного напряжения $[\tau]$; $P_{\text{ц}}(t)$ – вероятность безотказной работы по условию сохранения циклической прочности.

Вероятность безотказной работы кольцевой галтели (*В-В*) по условию не превышения напряжениями $\tau_{\text{В-В}}$ уровня $[\tau]$ можно записать в виде (рис.4):

$$P_{\text{н}}(t) = P([\tau] \geq \tau_{\text{В-В}}) = P([\tau] - \tau_{\text{В-В}}) \geq 0. \qquad (8)$$

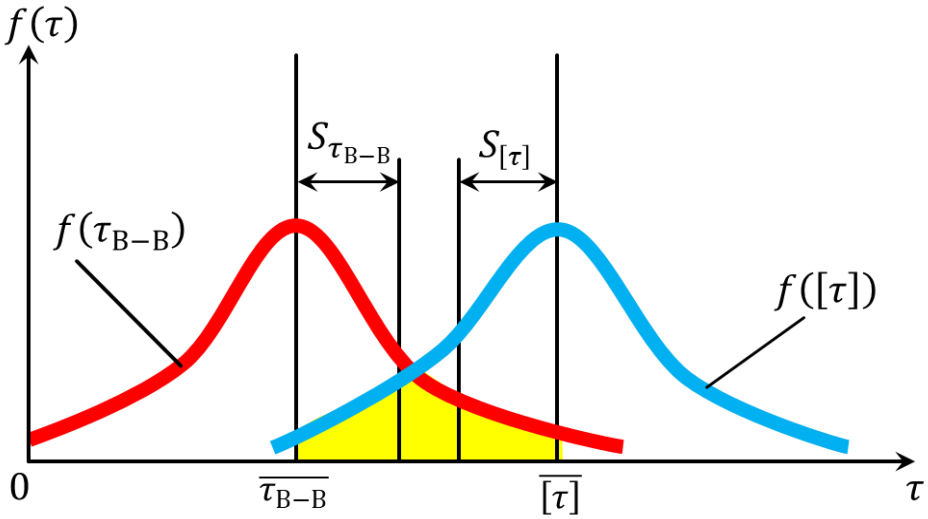

Рисунок 4. *Область перекрытия распределений* $\tau_{\text{В-В}}$ *и* $[\tau]$ *(выделена желтым цветом):*
τ – *касательные напряжения;*
$f(\tau)$ – *плотность распределения* τ

Полученные результаты

На основании четвертой теории прочности вычислено математическое ожидание допускаемого касательного напряжения $[\tau]$:

$$\langle[\tau]\rangle = 0{,}6\,\frac{\langle\sigma_в\rangle}{n} = 0{,}6\,\frac{856}{5} \approx 103\ \text{МПа}, \qquad (9)$$

где $n = 5$ — коэффициент запаса прочности.

По геометрическим характеристикам кольцевой галтели (табл. 1), вычислен предел выносливости рабочего валка (сталь 150ХНМ) в его опасном сечении (*В-В*) при кручении [3]:

Максимальное значение $\tau_{-1\,В-В\,max}$, МПа …….…...…… 142

Минимальное значение $\tau_{-1\,В-В\,min}$, МПа …….…….…….. 137

Математическое ожидание $\langle\tau_{-1\,В-В}\rangle$, МПа ……..…… 140

Среднеквадратическое отклонение $S_{\tau_{-1\,В-В}}$, МПа ……...…….…….. 2

Пусть пороговое значение предела выносливости $\tau^*_{-1\,В-В} = 130$ МПа .

Тогда вероятность безотказной работы кольцевой галтели (*В-В*) по условию сохранения циклической прочности

$$P_ц(t) = \frac{C_3}{2}\left[\Phi\left(\frac{\tau_{-1\,В-В\,max} - \langle\tau_{-1\,В-В}\rangle}{\sqrt{2}\,S_{\tau_{-1\,В-В}}}\right) - \Phi\left(\frac{\tau^*_{-1\,В-В} - \langle\tau_{-1\,В-В}\rangle}{\sqrt{2}\,S_{\tau_{-1\,В-В}}}\right)\right] =$$

$$= \frac{C_3}{2}\left[\Phi\left(\frac{142-140}{2\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{130-140}{2\sqrt{2}}\right)\right] =$$

$$1{,}63\,[\Phi(0{,}7) - \Phi(-3{,}55)] = 0{,}76\,, \qquad (11)$$

где Φ — табулированная функция Лапласа;

$$C_3 = \frac{1}{\frac{1}{2}\left[\Phi\left(\frac{\tau_{-1\,В-В\,max} - \langle\tau_{-1\,В-В}\rangle}{S_{\tau_{-1\,В-В}}\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{\tau_{-1\,В-В\,min} - \langle\tau_{-1\,В-В}\rangle}{S_{\tau_{-1\,В-В}}\sqrt{2}}\right)\right]} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{2}\left[\Phi\left(\frac{142-140}{2\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{137-140}{2\sqrt{2}}\right)\right]} = \frac{1}{\frac{1}{2}\,[\Phi(0{,}7) - \Phi(-1{,}06)]} = 3{,}26.$$

Выводы

1. Вероятность безотказной работы является основным показателем эксплуатационной надежности рабочего валка.

2. Для расчета вероятности безотказной работы кольцевой галтели рабочего валка прокатного стана может быть использован РТМ 24.090.25-76 «Краны грузоподъемные. Расчет вероятности безотказной работы элементов».

3. Вероятность безотказной работы кольцевой галтели (*В-В*) по условию сохранения циклической прочности равна 0,76.

4. Вероятности безотказной работы кольцевых галтелей остальных опасных сечений рабочего валка (*А-А*, *Б-Б*, *Г-Г* и *Д-Д*) вычисляются по той же методике, что и вероятность безотказной работы кольцевой галтели опасного сечения (*В-В*).

5. Для точного вычисления порогового значения $\tau^*_{-1\,В-В}$ необходимы дополнительные тензометрические данные, представленные (по результатам компьютерной обработки осциллограммы крутильных колебаний) в виде гистограммы касательных напряжений, приведенных к симметричному циклу.

Список литературы

1. Колесников А.Г., Яковлев Р.А., Мальцев А.А. Технологическое оборудование прокатного производства. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. — 158 с.
2. Потапов А.И., Орлов Г.А., Шестакова Е.Н., Орлов А.Г. Сталь для изготовления кованых прокатных валков. — Патент RU 2540241 C1, 2015. — 5 с.
3. Мальцев А.А. Компьютерное исследование характеристик циклической прочности опасных сечений рабочего валка клети дуо-450. — [Электронный ресурс] Научный альманах, 2017, № 10-2(36). — С. 95 - 98. —Режим доступа: https://ukonf.com/doc/na.2017.10.02.pdf

References

1. Kolesnikov A.G., Yakovlev R.A., Maltsev A.A. Technological equipment for rolling production. — Moscow: BMSTU, 2014. — 158 p. [in Russian].
2. Potapov A.I., Orlov G.A., Shestakova E.N., Orlov A.G. Steel for manufacturing forged rolling rolls: Pat. RU 2540241 C1 Russian Federation. 2015. Byul. No. 4 — 5 p. [in Russian].
3. Maltsev A.A. Computer research of characteristics of the cyclic strength of hazardous sections of the duo-450 working cutter. — [Electronic resource] Scientific almanac, 2017, No 10-2(36). — P. 95 – 98. — Access mode: https://ukonf.com/doc/na.2017.10.02.pdf [in Russian].