



МЕТОДОЛОГИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВАЛКОВ КЛЕТЕЙ КВАРТО НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПОЛОСОЙ

Анцупов А.В.(мл.)¹, Анцупов А.В.², Анцупов В.П.¹, Рыскина Е.С.¹

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В данной статье сформулирована методология решения актуальной согласно паспорту специальности 2.6.4 «Обработка металлов давлением» проблемы оценки и повышения долговечности и надежности эксплуатации валков широкополосных станов (ШС) на основе моделирования их контактного взаимодействия с пластически деформируемой полосой. Обосновывая причины непригодности известных моделей отказов валков для корректной оценки долговечности и тем более эксплуатационной надежности валков, в статье рассмотрен методологический подход к решению этих задач с использованием нового математического аппарата. Для аналитической оценки долговечности валков разработана совокупность взаимосвязанных замкнутых систем уравнений, моделирующих не только процессы их контактного взаимодействия, но и физические процессы формирования их постепенных ресурсных отказов по критериям прочности и износостойкости материалов. Решение систем алгебраических уравнений позволяет формулировать методику расчета среднего ресурса каждого валка по наиболее опасному критерию отказа в процессе прокатки полос известного сортамента. Для аналитической оценки надежности эксплуатации валков дополнительно сформулированы системы уравнений, описывающие процесс преобразования рабочего фонда времени ШС в годовой объем выпускаемой им продукции и модели процессов формирования отказов тех низконадежных деталей и узлов, потери работоспособности которых вызывают простой стана. В этом случае алгоритмизация моделей позволяет сформулировать последовательность расчета главного показателя эксплуатационной надежности валков – годовой производительности ШС, функции среднего ресурса каждого, включая валки, низконадежного элемента и длительности простоев стана по причине его отказа по наиболее опасному критерию. Собственно стратегия (методология) решения обеих задач заключается в проведении на модели теоретических исследований контактного взаимодействия рабочих и опорных валков с полосой, а также безотказности низконадежных ресурсных элементов для анализа и выбора технически и экономически целесообразных решений по повышению долговечности валков и надежности их эксплуатации – эффективности функционирования исследуемого ШС.

Ключевые слова: методология, долговечность, надежность эксплуатации, валки, ресурс, основной технологический комплекс, эффективность функционирования, производительность

© Анцупов А.В.(мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П., Рыскина Е.С., 2023

Для цитирования

Методология теоретической оценки долговечности и надежности эксплуатации валков клетей кварто на основе моделирования их контактного взаимодействия с полосой / Анцупов А.В.(мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П., Рыскина Е.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 97-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-97-113>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

METHODOLOGY OF THEORETICAL ASSESSMENT OF DURABILITY AND RELIABILITY OF OPERATION OF ROLLS OF FOUR-HIGH STANDS BY MODELING THEIR CONTACT INTERACTION WITH STRIPS

Antsupov A.V., Jr.¹, Antsupov A.V.², Antsupov V.P.¹, Ryskina E.S.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. This paper formulates a methodology for solving the problem of assessing and improving durability and reliability of the operation of rolls of hot strip mills based on modeling their contact interaction with a plastically deformable strip. This is relevant according to the description of major 2.6.4 “Metal forming”. By justifying the reasons for unsuitability of the known models of roll failures for the correct assessment of durability and, moreover, operational reliability of the rolls, the paper describes a methodological approach to solving these problems using a new mathematical apparatus. To carry out the analytical evaluation of durability of rolls, the authors have developed a set of interconnected closed systems of equations that model not only the processes of their contact interaction, but also the physical processes of the formation of their gradual resource failures according to the criteria of strength and wear resistance of materials. The solution of systems of algebraic equations allows us to formulate a methodology for calculating the mean life of every roll according to the most dangerous failure criterion in the process of rolling strips of a known product range. To carry out the analytical assessment of reliability of the operation of the rolls, systems of equations have been additionally formulated describing the process of converting the operational hours of hot strip mills into the annual volume of its products and models of the processes of failure formation of those low reliable parts and assemblies, whose loss of operation causes downtime of the mill. In this case, the algorithmization of the models allows us to formulate the sequence used to calculate a main indicator of operational reliability of rolls, annual output of hot strip mills, as a function of the mean life of every low reliable element, including rolls, and the duration of mill downtime due to its failure according to the most dangerous criterion. The actual strategy (methodology) of solving both problems consists in conducting theoretical studies on the model of the contact interaction between work and back-up rolls and the strip, as well as failure-free performance of low reliable resource elements, to analyze and select technically and economically feasible solutions to improve durability and reliability of rolls, efficiency of the operation of the hot strip mill under study.

Keywords: methodology, durability, operational reliability, rolls, life, main technological complex, efficiency, performance

For citation

Antsupov A.V., Jr., Antsupov A.V., Antsupov V.P., Ryskina E.S. Methodology of Theoretical Assessment of Durability and Reliability of Operation of Rolls of Four-High Stands by Modeling Their Contact Interaction with Strips. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 97-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-97-113>

Описание проблемы

Одну из актуальных научных проблем теории листовой прокатки в соответствии с паспортом специальности 2.6.4 «Обработка металлов давлением» можно сформулировать как исследование контактного взаимодействия упругодеформируемых рабочих и опорных валков с прокатываемой полосой с целью повышения их долговечности и надежности эксплуатации. Стратегия теоретического решения этой проблемы, разрабатываемая далее в этой статье, реализуется «...путем построения, применения и изучения математических компьютерных аналитических моделей...» для описания динамических процессов не только кон-

тактного взаимодействия рабочих и опорных валков с полосой, но и процессов формирования их деградационных отказов [1-3]. Результатом решения комплексных краевых задач математической физики (моделей физической теории надежности) [4] являются алгоритмы (программы), позволяющие рассчитывать основные показатели долговечности валков и надежности их эксплуатации в функции параметров контактного взаимодействия (усилия прокатки $P_{пр}$, погонных нагрузок в очаге деформации $p(y)$ и межвалковых зонах $q_{1(2)}(y)$, а также соответствующих контактных напряжений $p(x, y)$, $\tau(x, y)$ и $\sigma_k(x, y)$, $\tau_k(x, y)$).

Стандартным показателем долговечности валков является их средний ресурс t_p [3], а в качестве основного стандартного показателя их эксплуатационной надежности можно принять один из параметров продукции – годовую производительность Q широкополосного стана [5, 6]. Согласно [5] этот параметр характеризует надежность (эффективность) процесса прокатки, но, как и другие параметры продукции по ГОСТ 27.204 [6], его обычно используют для количественной оценки эффективности функционирования оборудования, на котором этот процесс реализуется, – главных приводах клетей кварто или основных технологических комплексах широкополосного стана (ОТК ШС). Однако при определении параметра Q следует учитывать, что его величина зависит не только от среднего ресурса валков t_p , но и от ресурса t_{pi} других недолговечных i -х элементов (деталей и узлов) ОТК ШС, которые приводят к его простоям.

Анализ известных моделей отказов валков клетей кварто показывает, что они представляют строгие неравенства, моделирующие причины выхода их из строя. В частности, в нормальных условиях эксплуатации рабочие и опорные валки подвержены постепенным прочностным или износным ресурсным отказам [3], причинами которых соответственно являются:

- поломки по шейкам, трещинам или бочке, возникновение крупных, средних или мелких сколов контактного слоя, а также усталостное выкрашивание рабочих поверхностей;

- достижение максимальным текущим износом $\Delta R(0, t)$ или профилем износа $\Delta_{и}(t)$ валка предельных значений соответственно $\Delta R_{пр}$ и $\Delta_{и пр}$.

Для описания первой группы причин широко применяют классические модели *прочностных отказов* рабочих и опорных валков, которые формулируются обычно в виде статических условий нарушения прочности с использованием коэффициентов запаса [7, 8]:

$$n = \frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{макс}} < [n], \quad (1)$$

где n и $[n]$ – расчетный запас прочности и его допустимое значение; $\sigma_{пр}$ – предельное напряжение, в качестве которого используют предел прочности σ_B или предел текучести σ_T матери-

ала валка; $\sigma_{макс}$ – максимальное расчетное напряжение, в качестве которого выступают максимальное напряжение изгиба $\sigma_{и}$, кручения τ или эквивалентное напряжение $\sigma_{эКВ} = \sqrt{\sigma_{и}^2 + 3 \cdot \tau^2}$.

В случаях сложного сопротивления для моделирования возможных поломок валков, например при изгибе с кручением, модели отказа записывают также в виде условия нарушения объемной усталости:

$$n = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} < [n], \quad (2)$$

где запасы прочности на изгиб и кручение определяют выражениями

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1} \cdot \frac{\beta \cdot \varepsilon_{\sigma}}{k_{\sigma}}}{\sigma_{и}} \quad \text{и} \quad n_{\tau} = \frac{\tau_0}{\left[\frac{\tau}{2} \cdot \left(\psi_{\tau} + \frac{k_{\tau}}{\beta \cdot \varepsilon_{\tau}} \right) \right]}$$

В этих уравнениях:

$\sigma_{-1} = (0,45 - 0,55) \cdot \sigma_B$ – предел выносливости гладких образцов из материала валков с симметричным циклом изменения нормальных напряжений;

$\tau_0 = (0,46 - 0,56) \cdot \sigma_B$ – предел выносливости гладких образцов из материала валков с отнулевым циклом изменения касательных напряжений;

$k_{\sigma(\tau)}, \beta, \varepsilon_{\sigma(\tau)}, \psi_{\sigma(\tau)}$ – эффективный коэффициент концентрации напряжений, коэффициент качества поверхности, масштабный фактор и коэффициент чувствительности материала валка к асимметрии цикла соответственно.

Модели отказов рабочих и опорных валков для описания контактной усталости записывают также в виде статических неравенств [7, 8] вида

$$\sigma_k = \frac{2 \cdot q}{\pi \cdot a} \geq [\sigma_k] \quad \text{или} \quad \tau_{ck}^{\max} \approx 0,6 \cdot \sigma_k \geq \frac{[\sigma_k]}{2}, \quad (3)$$

где $\sigma_k, \tau_{ck}^{\max}$ и $[\sigma_k]$ – максимальное контактное и приконтактное скалывающее напряжения в зоне взаимодействия валков, а также их допустимые значения; a – полуширина площадки контакта валков, определяемая по формуле Герца; q – погонная нагрузка в межвалковом контакте.

$$q = \frac{P_{пр}}{L},$$

где $P_{пр}$ – усилие прокатки самой тонкой полосы максимальной ширины $2b_{max}$ из наиболее труднодеформируемой марки стали; L – длина контакта валков [8].

В 1984 году в работе [9] опубликована контактно-усталостная статистическая модель отказов опорных валков из марки стали 9ХФ в виде уравнения кривой усталости для расчета наработки их до отказа:

$$N_i = P_i^{-m} \cdot \exp(2,3 \cdot \alpha), \quad (4)$$

где N_i – предельное число циклов до разрушения валка, которое определяли на основе статистики отказов 55-ти валков 4-х ШСП СССР в функции количества металла Q_i , прокатанного валком в i -й клетки; α и m – параметры кривых усталости, рассчитанные для каждого стана.

Расчетная эквивалентная нагрузка, заменяющая действительный спектр нагружения при прокатке реального монтажа партий полос, определяемая согласно РТМ ВНИИметмаш [10]:

$$P_i = m \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^l P_{ji}^m \cdot Q_{ji}}{\sum_{j=1}^l Q_{ji}}},$$

где P_{ji} – межвалковое контактное усилие при прокатке j -го типоразмера полосы в i -й клетки; Q_{ji} – масса прокатанной в i -й клетки полосы j -го типоразмера; l – число клеток, в которых работал валок.

Статистические модели типа (4) позволяют оценивать долговечность и рассчитывать ресурс валков, измеряемый числом циклов N_i , если заранее на основе корректной, репрезентативной статистики отказов определены значения параметров α и m кривых усталости.

Многочисленные модели *износных отказов* рабочих и опорных валков ОТК ШС, созданные в период с 60-х годов прошлого столетия по настоящее время на основе анализа статистических данных, можно представить в единой форме широко распространенных в трибологии стохастических уравнений для определения их среднего ресурса t_p [11, 12]:

$$t_p = \frac{\Delta R_{пр} - \Delta R_0}{I_H} \quad \text{или} \quad t_p = \frac{\Delta_{и пр} - \Delta_0}{I_H}, \quad (5)$$

где $\Delta R_{пр}$ или $\Delta_{и пр}$ – заданные предельные значения радиального износа исследуемого валка обычно в сечении на середине длины его бочки или профиля износа этого валка, имеющего смысл разности радиусов валка в сечениях на середине и на краю бочки; ΔR_0 и Δ_0 – приработочный (пренебрежимо малый) износ валка и соответствующий ему профиль, сформированные в относительно короткий период прира-

ботки; $I_H \approx \bar{I}_H = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta R_i}{H_{пр i}}$ – интенсивность

изнашивания (коэффициент износа) валка, соответствующий единицам измерения ресурса валка и определяемый по рекомендациям [12] как среднее в выборке из числа N отработавших валков значение отношения измеренных величин износа ΔR_i i -х валков к i -й наработке $H_{пр i}$ их до отказа.

$H_{пр}$ – наработка исследуемых валков до отказа, измеряемая различными физическими величинами и принимаемая за воздействие, вызвавшее предельный износ. В качестве такой наработки до отказа обычно используют массу $G_{пр}$ в тоннах или длину $L_{пр}$ в километрах прокатанной полосы, расход энергии при прокатке $\mathcal{E}_{пр}$ в мегаДжоулях на тонну проката, удельный путь трения $S_{тр пр}$ в метрах или удельную работу трения $A_{тр пр}$ в ньютонметрах, совершенные единицей поверхности валка или удельной касательной силой трения в очаге деформации или межвалковой зоне за время его эксплуатации до отказа.

Все известные статистические модели типа (5) позволяют оценивать долговечность и рассчитывать ресурс валков t_p в соответствующих

I_H единицах измерения (тоннах, километрах, мегаджоулях, метрах, ньютонметрах), если заранее на основе корректной, репрезентативной статистики отказов определены значения массового I_G , геометрического I_L , кинематического I_k или энергетического $I_{\mathcal{E}}$ ($I_{ЭН}$) коэффициента износа.

Таким образом, анализ известных прочностных и износочных моделей отказов валков клетей кварто показывает, что они непригодны для аналитической оценки их долговечности и тем более их эксплуатационной надежности.

Прочностные статические модели типа (1)-(3) непригодны по причине отсутствия в их структуре времени t , как аргумента, и позволяют устанавливать «на сколь угодно долго» только вид технического состояния валков – работоспособное (неработоспособное) [3]. Стохастические прочностные и износочные модели типа (4) и (5) хотя и позволяют оценивать долговечность валков клетей кварто, но корректная оценка их ресурса возможна только в условиях эксплуатации, подобных тем, для которых были определены входящие в формулы статистические коэффициенты: α и m – в модели (4), I_H – в уравнениях (5). Однако создать «подобные» условия и, следовательно, корректные статистические модели отказов валков невозможно даже в одной клетке стана. Причиной этому является уникальность (неповторимость) не только физико-механических свойств материалов сменяемых валков, но, главным образом, неповторимость сортамента прокатываемых полос. Это, в свою очередь, приводит к отсутствию подобия исходных профилировок, геометрических и кинематических параметров очага деформации и межвалковых зон, силовых и тепловых условий их нагружения, приводящих к различной степени деградации валков к моменту их перевалки.

В таких условиях, на наш взгляд, методологию теоретического решения проблемы прогнозирования долговечности и эксплуатационной надежности валков клетей кварто в функции параметров контактного взаимодействия можно построить на основе базовых положений физической теории параметрической надежности технических объектов [13] и современных достижений эргодинамической теории деформирования, повреждаемости и разрушения конструкционных материалов [14]. Такой подход разрабатывается в следующих разделах статьи.

Структура методологического подхода к оценке и повышению долговечности и эксплуатационной надежности валков клетей кварто

Методологический подход к теоретической оценке и повышению долговечности и эксплуатационной надежности валков ОТК ШС пред-

ставляет постановку и решение ряда взаимосвязанных краевых задач математической физики: теории пластичности, теории упругости, эргодинамики и физической теории надежности с последующим поиском эффективных способов повышения показателей этих свойств. Поэтому согласно [1, 2] он включает три последовательно выполняемые стадии:

1. Разработку математического аппарата в виде совокупностей систем уравнений для многопараметрического моделирования прочностных и износочных ресурсных отказов рабочих и опорных валков клетей кварто.

2. Верификацию теоретических разработок – подтверждение корректности решения базовых блоков моделей опытным путем.

3. Проведение теоретических исследований контактного взаимодействия рабочих и опорных валков с пластически деформируемой полосой на созданной многопараметрической модели для анализа и выбора технически и экономически целесообразных решений по повышению долговечности валков и надежности их эксплуатации (эффективности функционирования исследуемого ОТК ШС).

Очевидно, что основой разрабатываемого метода и главным предметом исследований данной статьи является построение математического аппарата в виде комплекса взаимосвязанных математических моделей, описывающих процессы формирования деградационных ресурсных отказов рабочих и опорных валков по упомянутым выше причинам.

На наш взгляд, в соответствии с формулировкой научной проблемы процедура построения требуемого комплекса аналитических моделей должна включать четыре взаимосвязанных этапа, каждый из которых подробно рассматривается в следующих разделах статьи.

Построение модели контактного взаимодействия рабочего и опорного валков с прокатываемой полосой

На первом этапе моделирования необходимо построить систему уравнений для описания процессов контактного взаимодействия i -х валков клетей кварто с прокатываемой полосой в упругопластическом очаге деформации при стационарной прокатке k -й партии полос одного типоразмера. Опуская индексы « i » и « k » для упрощения записи, комплексную модель с учетом [15-19] можно представить в виде следующей системы уравнений для последовательного определения:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 (6.1) - \text{усилия прокатки, при постоянстве погонных сил } p(y) \text{ по ширине полосы } 2b \text{ [15]:} \\
 P_{\text{пр}} = (\bar{p}_{1 \text{ упр}} \cdot x_{1 \text{ упр}} + \bar{p}_{\text{отс}} \cdot x_{\text{пл. отст}} + \bar{p}_{\text{пр}} \cdot l_{\text{прил}} + \bar{p}_{\text{опер}} \cdot x_{\text{пл. опер}} + \bar{p}_2 \cdot x_2) \cdot 2b; \\
 (6.2) - \text{истинных распределений погонных сил в очаге деформации } p(y) \text{ и межвалковых} \\
 \text{зонах } q_{1,2}(y) \text{ [16]:} \\
 p(y) = P_{\text{пр}} / b + a_p \cdot (1 - y^2 / l^2) \quad \text{и} \quad q_{1,2}(y) = (P_{\text{пр}} + F) / l + a_{q1,2} \cdot (1 - y^2 / l^2). \\
 (6.3) - \text{распределения нормальных и касательных контактных напряжений на упругих} \\
 \text{и пластических участках очага деформации [15]:} \\
 p_{\text{упр}}(x, y) = f(p(y), E_{\text{п}}, h_x(y), f_{\text{упр}}(y)); \quad \tau_{\text{упр}}(x, y) = f_{\text{упр}}(x, y) \cdot p_{\text{упр}}(x, y); \\
 p_{\text{пл}}(x, y) = f(p(y), \sigma_{\text{ф.пл}}, h_x(y), f_{\text{пл}}(y)). \quad \tau_{\text{пл}}(x, y) = f_{\text{пл}}(x, y) \cdot p_{\text{пл}}(x, y). \\
 \text{Максимального напряжения в очаге деформации: } p_{\text{max}} = p_{\text{пл}}(x = x_{\gamma}, y = 0) \\
 (6.4) - \text{распределения контактных напряжений в межвалковых зонах [17]:} \\
 \sigma_{ik1,2}(x, y) = \frac{3 \cdot q_{1,2}(y)}{4 \cdot a_{1,2}(y)} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{(a_{1,2}(y))^2} \right), \quad \tau_{k1,2}(x, y) = f_{\text{ск1,2}}(x, y) \cdot \sigma_{k1,2}(x, y). \\
 \text{Максимальных напряжений на контакте валков:} \\
 \sigma_{\text{max ik1,2}} = \sigma_{k1,2}(0, 0).
 \end{array} \right. \quad (6)$$

В уравнения системы (6) входят следующие параметры, характеризующие условия однозначности и граничные условия задачи:

x и y – оси системы координат, принятые согласно [15, 16];

$x_{1 \text{ упр}}$, $x_{\text{пл. отст}}$, $l_{\text{прил}}$, $x_{\text{пл. опер}}$, x_2 – длины зон (участков), на которые разделена расчетная длина l_c очага деформации в направлении прокатки соответственно: упругого сжатия, опережения, прилипания, отставания, упругого восстановления, определяемые по методике [15];

$\bar{p}_{1 \text{ упр}}$, $\bar{p}_{\text{отс}}$, $\bar{p}_{\text{пр}}$, $\bar{p}_{\text{опер}}$, \bar{p}_2 – средние значения нормальных контактных напряжений на перечисленных участках упругопластического очага деформации, определяемые согласно [15];

F – усилие противоизгиба;

a_p , a_{q1} , a_{q2} – параметры неравномерности распределения погонных нагрузок $p(y)$, $q_1(y)$, определяемые по методике [16] в функции текущих профилей Δ_{ik} износа валков;

$E_{\text{п}}$ и $\sigma_{\text{ф.пл}}$ – модуль упругости и сопротивление деформации материала полосы в очаге деформации [15];

$h_x(y)$ – распределение толщины полосы в сечении y по длине бочки в функции $p(y)$ [15];

$f_{\text{упр}}(y)$ и $f_{\text{пл}}(y)$ – распределения коэффициентов трения на упругих и пластических участках очага деформации, определяемых по методике [20] и [15] соответственно;

$a_{1,2}(y)$ – полуширина площадки контакта валков в сечении y по длине бочки, определяемая по методике [17];

$f_{\text{ск1,2}}(x, y)$ – распределения коэффициентов трения на участках скольжения поверхностей в межвалковых зонах, определяемые по методике [20].

Поскольку на практике ресурс рабочих ($i = 1, 2$) и опорных ($i = 3, 4$) валков определяется одной из трех основных причин – потерей контактной и объемной прочности ($j = 1, 2$) или износостойкости ($j = 3$), построим отдельно модели их прочностных и износосовых отказов.

Разработка прочностных моделей отказов валков клетей кварто

На втором этапе моделирования сформулируем систему уравнений для описания физических процессов повреждаемости и разрушения наиболее нагруженных локальных объемов материалов i -х валков, сопровождающих их контактное взаимодействие с полосой до момента $t_{pij} = t_{pk_{ij}^*}$ возникновения отказа из-за потери контактной ($j = 1$) или объемной ($j = 2$) прочности, то есть до момента разрушения соответствующих наиболее напряженных объемов и предполагаемого появления выкрашивания, скола или поломки какого-либо валка.

В постановку задачи должны войти системы уравнений для последовательного определения:

$$\left. \begin{aligned}
 & (7.1) \text{ – скорости повреждаемости } i\text{-го валка по } j\text{-му критерию} \\
 & \text{прочности при прокатке } k\text{-й партии полос для } k = 1, 2, 3, \dots : \\
 & \dot{u}_{eijk} = 2 \cdot k_{yi} \cdot \frac{k_B \cdot T_i}{h} \cdot \frac{U_0(\sigma_{шиj}, T_i)}{V_a} \cdot \exp\left(-\frac{U_0'(\sigma_{шиj}, T_i)}{k_B \cdot T_i}\right) \cdot \text{sh}\left(\frac{A_f^0(\sigma_{диj})}{2 \cdot k_B \cdot T_i}\right). \\
 & (7.2) \text{ – текущей плотности энергии дефектов в локальных, повреждаемых} \\
 & \text{по } j\text{-му критерию объемах материала } i\text{-го валка,} \\
 & \text{после прокатки } k\text{-й партии полос :} \\
 & u_{eijk} = u_{e0i} + \sum_k \dot{u}_{eijk} \cdot t_k. \\
 & (7.3) \text{ – среднего ресурса } i\text{-го валка по } j\text{-му критерию прочности :} \\
 & t_{pk_{ij}^*} = t_{ijk-1} \text{ и } k_{ij}^* = k - 1, \\
 & \text{если в условии : } t_{ijk} = \left[\sum_{k-1} t_k + \frac{(u_{eijk} - u_{eijk-1})}{\dot{u}_{eijk}} \right], \quad u_{eijk} \geq u_{eij}^*.
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

При оценке скорости повреждаемости i -х валков по j -м критериям с использованием уравнения (7.1) необходимо учесть индивидуальные особенности схемы их нагружения. В частности, при определении скорости \dot{u}_{eijk} повреждаемости локальных приповерхностных объемов рабочих ($i = 1, 2$) валков по критерию контактной усталости ($j = 1$) следует учесть их «двойное» нагружение. А именно, нагруженные объемы рабочих валков подвергаются действию максимального контактного напряжения $P_{\max ik}$ в очаге деформации и максимального напряжения $\sigma_{\max ik}$ в контакте со «своим» опорным валком. Поэтому скорость \dot{u}_{eilk} повреждаемости их локальных объемов при прокатке k -й партии полос в очаге деформации и в межвалковой зоне определяется по уравнению (7.1) в виде

$$\dot{u}_{eilk} = \dot{u}'_{eilk}(\sigma'_{шиlk}, \sigma'_{дилk}) \quad \text{и} \quad \dot{u}_{eilk} = \dot{u}''_{eilk}(\sigma''_{шиlk}, \sigma''_{дилk}),$$

где $\dot{u}'_{eilk}(\sigma'_{шиlk}, \sigma'_{дилk})$ – скорость повреждаемости контактных объемов рабочих валков от действия шаровой $\sigma'_{шиlk} = \frac{P_{\max}}{3}$ и девиаторной $\sigma'_{дилk} = P_{\max ik}$ составляющих максимального контактного напряжения $P_{\max ik}$ в очаге деформации (см. уравнение (6.3)); $\dot{u}''_{eilk}(\sigma''_{шиlk}, \sigma''_{дилk})$ – скорость по-

вреждаемости контактных объемов рабочих валков от действия шаровой $\sigma''_{шilk} = \frac{\sigma_{\max ik}}{3}$ и девиаторной $\sigma''_{дилk} = \sigma_{\max ik}$ составляющих максимального контактного напряжения $\sigma_{\max ik1,2}$ в верхнем (1) или нижнем (2) межвалковом контакте (см. уравнение (6.4)).

В то же время скорость повреждаемости контактных объемов i -х опорных валков определяется по (7.1) в функции шаровой и девиаторной составляющих максимальных контактных напряжений $\sigma_{\max ik1,2}$ (см.(6.4)).

Скорости повреждаемости рабочих и опорных валков по критериям объемной усталости определяются также по уравнению (7.1) в функции шаровых и девиаторных составляющих максимальных эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ изгиба с кручением для рабочих валков и напряжений изгиба $\sigma_{\text{И}}$ – для опорных (см. (1)).

Остальные параметры, входящие в уравнения системы (7), характеризуют краевые условия задачи и определяются по методикам работ [14, 19]:

k_{yi} – коэффициент упрочнения структуры материала i -го валка [21],

$$k_{yi} = \frac{2 \cdot (u_{ei*} - u_{e0i})}{3 \cdot u_{ei*} - u_{e0i}}, \quad (7.1a)$$

где u_{e0i} и u_{ei*} – начальное и критическое значение плотности энергии дефектов структуры материала в локальных объемах i -го валка [14],

$$u_{e0i} = (0,071 \cdot HV_i)^{2,4} \cdot k_{\sigma i}^2 / (6 \cdot G_i) \quad \text{и} \quad u_{ei*} = \Delta H_{TBi} - u_{Ti}, \quad (7.1б)$$

здесь HV_i и $G_i = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \mu_i)}$, E_i и μ_i – исходная твердость по Виккерсу, модуль сдвига, линейный модуль упругости и коэффициент Пуассона материала i -го валка, $k_{\sigma i} = (6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV_i + 0,12 \cdot 10^{-2})^{-1}$ –

комплексный структурный параметр [14];
 ΔH_{TBi} – энтальпия плавления материала i -го валка в твердом состоянии при температуре плавления T_{Si} ;

$u_{Ti} = \rho_i(T_i) \cdot c_i(T_i) \cdot T_i$ – плотность тепловой энергии в поверхностном слое материала i -го валка при температуре T_i , здесь $c_{ik}(T_i)$ и $\rho_i(T_i)$ – теплоемкость и плотность материала;

T_i – стационарная температура поверхностных слоев опорного и рабочего валков, определяемая по методикам [22];

k_B , h – постоянная Больцмана и постоянная Планка.

$U_0(\sigma_{шij}, T_i)$ – начальная энергия активации процесса повреждаемости (образования дефектов) в единице объема материала i -го валка при гидростатическом напряжении $\sigma_{шij}$ и температуре T_i в уравнении (7.1):

$$U_0(\sigma_{шij}, T_i) = U_{P_{T_0}} - \Delta U_T(T_i) \pm \Delta U_{\sigma_{шij}}, \quad (7.1в)$$

где $U_{P_{T_0}} = (-2,415 \cdot 10^{-28} T_{0i}^3 + 5,955 \cdot 10^{-25} T_{0i}^2 + 0,0121 \cdot 10^{-20} T_{0i} + 12,286 \cdot 10^{-20}) / V_{ати}$ – начальная энергия активации с учетом теплового давления при T_{0i} , K и $\sigma_{шij} = 0$ ($V_{ати}$ – атомный объем матери-

ала i -го валка [14]);

$\Delta U_T(T_i) = 1,5 \cdot \alpha_{0i} \cdot K_i \cdot T_i$ – изменение энергии активации от повышения температуры от 0°C до T_i , $^\circ\text{C}$ (α_{0i} – коэффициент теплового расширения; $K_i = \frac{E_i}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu_i)}$ – модуль объемной упругости материала i -го валка);

$\Delta U_{\sigma_{шиj}} = A_V^0(\sigma_{шиj}) = \frac{\varphi_\sigma^2 \cdot M_{Ri}^2 \cdot \sigma_{шиj}^2}{2 \cdot K_i}$ – изменение энергии активации от работы $A_V^0(\sigma_{шиj})$ гидростатического напряжения $\sigma_{шиj}$;

$\varphi_\sigma = k_{\sigma i} \cdot v_{0i}^{0,5}$ – коэффициент перенапряжений на межатомных связях реального кристалла (здесь $v_{0i} = \frac{\sigma_{Ti}}{65 + 0,46 \cdot HV_i}$ – безразмерный структурный коэффициент неравномерности распределения скрытой энергии по объему материала i -го валка в исходном состоянии; σ_{Ti} – предел текучести его материала);

$M_{Ri} = \frac{[\sigma_{Ti} \cdot (65 + 0,46 \cdot HV_i)]^{0,5}}{\sigma_{Ri}}$ – коэффициент эквивалентности циклического и статического напряженного состояния i -го валка (здесь σ_{Ri} – предел выносливости его материала).

$A_f^0(\sigma_{дij}) = \frac{\varphi_\sigma^2 \cdot M_{Ri}^2 \cdot \sigma_{дij}^2}{6 \cdot G_i}$ – удельная работа формоизменения единицы локального деформируемого объема материала в уравнении (7.1), G_i – модуль сдвига его материала.

$t_k = \frac{G_k}{\rho_k \cdot b_k \cdot h_k \cdot V_k}$ – длительность прокатки k -й партии полос массой G_k с поперечным сечением $b_k \times h_k$, плотностью материала ρ_k (см. уравнение (7.2)); V_k – скорость прокатки.

k_{ij}^* – номер критической партии полос, после прокатки которой возникнет отказ i -го валка по j -му критерию прочности.

Алгоритм решения задач (6)-(7) для расчета параметров контактного взаимодействия и ресурса валков по критериям прочности не может быть построен, пока не будет найдена зависимость параметров неравномерности распределения погонных нагрузок (a_p, a_{q1}, a_{q2} , см. уравнение (6.2)) от текущих профилей Δ_{ik} износа i -х валков после прокатки k -й партии. Эта задача решается при разработке моделей отказов рабочих и опорных валков по критериям их износостойкости ($j = 3$), которая рассматривается в следующем разделе статьи.

Создание износных моделей отказов валков клетей кварто

На третьем этапе процедуры построения математического аппарата сформулируем систему уравнений для описания физических процессов формирования износных отказов рабочих и опорных валков на основе энергомеханической концепции прогнозирования долговечности узлов трения [23] для оценки их долговечности по критериям износостойкости ($j = 3$) трибоэлементов. Для упрощения записи формул индекс $j = 3$ опущен.

В постановку задачи должны войти системы уравнений для последовательного определения:

$$\left. \begin{aligned}
 & (8.1) - \text{скорости радиального изнашивания } i\text{-го валка в любом сечении } y \\
 & \text{по длине его бочки при прокатке } k\text{-й партии полос для } k = 1, 2, 3 \dots : \\
 & \text{в очаге деформации:} \\
 & \dot{R}'_{ik}(y) = \frac{\alpha_{ik}^*(y) \cdot v_{ik} \cdot f_{\text{мех}}(y) \cdot P_n(y) \cdot V_{\text{ск}}(y)}{\Delta u_{ei}^*}; \\
 & \text{в верхнем (1) или нижнем (2) межвалковом контакте:} \\
 & \dot{R}''_{ik1,2}(y) = \frac{\alpha_{ik}^*(y) \cdot v_{ik} \cdot f_{\text{мех}1,2}(y) \cdot q_{1,2}(y) \cdot V_{\text{ск}1,2}(y)}{\Delta u_{ei}^*}. \\
 & (8.2) - \text{скорости искажения профиля износа } i\text{-го валка:} \\
 & \text{для рабочих (} i = 1, 2 \text{):} \\
 & \dot{\Delta}_{ik} = \left(\dot{R}'_{ik}(0) + \dot{R}''_{ik1,2}(0) \right) - \left(\dot{R}'_{ik}(b_k) + \dot{R}''_{ik1,2}(b_k) \right); \\
 & \text{для опорных (} i = 3, 4 \text{):} \\
 & \dot{\Delta}_{ik} = \dot{R}''_{ik1,2}(0) - \dot{R}''_{ik1,2}(b_k). \\
 & (8.3) - \text{текущих профилей износа валков после прокатки } k\text{-й партии:} \\
 & \Delta_{ik} = \Delta_{i0} - \Delta_{ik-1} - \dot{\Delta}_{ik} \cdot t_k. \\
 & (8.4) - \text{среднего ресурса } i\text{-го валка по критерию износостойкости (} j = 3 \text{):} \\
 & t_{pk_{ij=3}}^* = t_{ik-1} \text{ и } k_{ij=3}^* = k - 1, \\
 & \text{если в условии: } t_{ik} = \left[\sum_{k-1} t_k + \frac{(\Delta_{ik} - \Delta_{ik-1})}{\dot{\Delta}_{eik}} \right], \Delta_{nik} \geq \Delta_{ni}^*.
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Параметры, входящие в уравнения системы (8), характеризуют начальные и граничные условия задачи и определяются по методикам работ [14, 21, 23]:

y – ось координат, направленная вдоль оси i -го валка, с началом на середине его бочки ($y = 0$);

$y = b_k$ – координата сечения i -го валка, соответствующая краю прокатываемой k -й полосы шириной $2b_k$;

$\alpha_{ik}^*(y) = \frac{A_{aik}(y)}{A_{\text{гр}ik}(y)}$ – коэффициенты перекрытия в парах трения «рабочий валок – полоса» и «ра-

бочий валок – опорный валок» при прокатке k -й партии полос в сечении y . ($A_{aik}(y)$ – номинальные удельные площади рассматриваемого контакта в сечении y шириной dy в очаге деформации или в межвалковых зонах; $A_{\text{гр}ik}(y)$ – удельные площади трения i -х валков в сечении y шириной dy);

v_{ik} – коэффициенты преобразования внешней энергии в изменение внутренней энергии поверхностного слоя исследуемого i -го валка на рассматриваемом контакте в очаге деформации или в межвалковых зонах;

$f_{\text{мех}1,2}(y)$ – механическая составляющая коэффициента трения на рассматриваемом контакте;

$V_{\text{ск}1,2}(y)$ – скорости относительного скольжения трущихся поверхностей в поперечном сечении y на рассматриваемом контакте;

Δu_{ei}^* – критическая энергоёмкость (критический прирост плотности энергии дефектов) в единице объема поверхностного слоя i -го валка:

$$\Delta u_{ei}^* = \Delta H_{Si} - u_{e0i} - \Delta u_{Ti},$$

где ΔH_{Si} – энтальпия плавления материала i -го валка в жидком состоянии; (u_{e0i} и Δu_{Ti} по (7.1.б)); Δ_{i0} , Δ_{ik-1} и Δ_{ii^*} – начальный, $(k - 1)$ -й и предельный профили износа i -х валков. (Здесь Δ_{ik-1} – значения профилей валка, которые входят в уравнения (6.2) при оценке погонных сил).

Подводя промежуточный итог, можно заключить следующее:

- комплексная математическая модель в виде замкнутой системы уравнений (6)-(8) описывает процессы формирования ресурсных отказов валков клетей кварто по критериям прочности и износостойкости их материалов;
- алгоритмизация предложенной алгебраической системы позволяет решить проблему оценки и повышения долговечности рабочих и опорных валков по указанным критериям, определяя их средний ресурс по уравнениям (7.3) и (8.4), а проводя теоретические исследования, выбрать технически и экономически целесообразные способы повышения их долговечности.

Однако решение задачи оценки и повышения долговечности валков клетей кварто по различным критериям не позволяет определить их эксплуатационную надежность, так как величина ее показателя Q зависит не только от определяемых по (7.3) и (8.4) ресурса валков, но также ресурса других i -х низконадежных элементов ОТК ШС. Поэтому в следующем разделе статьи рассматривается построение моделей надежности эксплуатации валков для оценки эффективности функционирования основных технологических комплексов исследуемого широкополосного стана по стандартному критерию их производительности Q .

Разработка комплексной модели эксплуатационной надежности валков

На четвертом этапе моделирования построим методику аналитической оценки годовой производительности Q основных технологических комплексов широкополосного стана (ОТК ШС) – главного показателя эксплуатационной надежности прокатных валков [5, 6], в функции ресурса и длительности простоев не только валков, но и других низконадежных элементов комплекса. С позиций технической кибернетики система «прокатный стан – полоса» в соответствии с уравнением для оценки практически возможной годовой производительности стана

$$Q = q \cdot t_p = q \cdot \left(t_{\text{ном}} - \sum_{i=1}^M t_{\Pi i} \right), \quad (9)$$

преобразует годовое рабочее время $t_p = t_{\text{ном}} - t_{\Pi ij}$ в количество Q выпускаемой продукции умножением его на технической характеристике основного оборудования ОТК ШС – часовую производительность q [24] (рис. 1, а). (Здесь $t_{\text{ном}}$ – номинальный годовой фонд времени предприятия; $t_{\Pi i}$ – суммарное время простоев ОТК в течение года по причине отказа i -х низконадежных элементов по наиболее опасному критерию прочности или износостойкости материала; $i = 1, 2, \dots, M$, M – номер и число низконадежных элементов, отказ которых приводит к простоям ОТК ШС; значения $i = 1, 2, 3, 4$, как отмечено выше, индексируют валки).

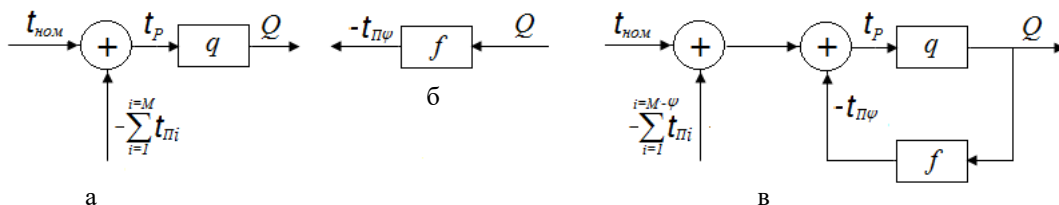


Рис. 1. Схемы параметрических преобразований при оценке производительности ОТК ШС: а – рабочего времени в выпуск продукции; б – количества продукции в длительность простоев ОТК по причине отказов ψ -х элементов; в – среднего ресурса ОТК в количестве продукции с учетом отказов ψ -х элементов
 Fig. 1. Diagrams of parametric transformations in assessing performance of main technological complexes of the hot strip mill: а is operational hours to output of products; б is the quantity of products to the duration of downtime of the main technological complexes due to failures of the ψ -th elements
 в is mean life of the main technological complexes to the quantity of products taking into account failures of the ψ -th elements

Если из общего числа M известных из практики i -х низконадежных элементов выделить произвольную ψ -ю группу деталей (узлов), отказ которых по наиболее опасному критерию приводит к простоям исследуемого ОТК, и проанализировать время годовых простоев комплекса $t_{\Pi\psi}$, возникших по причине их отказов, то по тому же кибернетическому принципу можно полагать, что количество выпущенной за год продукции Q может быть преобразовано в годовое время этих простоев $t_{\Pi\psi}$ в соответствии с уравнением [24]

$$t_{\Pi\psi} = f \cdot Q. \quad (10)$$

В этом выражении передаточный коэффициент f цепи отрицательной обратной связи (**рис. 1, б**) по физическому смыслу определяет долю времени годовых простоев ОТК по причине отказа ψ -х элементов на одну тонну выпускаемой продукции:

$$f = \frac{t_{\Pi\psi}}{Q} = \frac{[t_{\Pi}]_{\psi}}{[Q]_{\psi}}, \quad (11)$$

где $[t_{\Pi}]_{\psi}$ – длительность одного простоя на замену ψ -х элементов; $[Q]_{\psi}$ – нормируемое количество продукции, выпускаемое между простоями ψ -х элементов, которое согласно [3] определяет их среднюю наработку (ресурс) в тоннах выпускаемой продукции. Средний ресурс t_{ψ} этих элементов в единицах времени (например, в часах) можно оценить отношением

$$t_{p\psi} = \frac{[Q]_{\psi}}{q}. \quad (12)$$

Совместным решением уравнений (9) и (10) получаем зависимость:

$$Q = \frac{q}{1 + q \cdot f} \cdot \left(t_{\text{НОМ}} - \sum_{i=1}^{M-\psi} t_{\Pi i} \right), \quad (13)$$

которая отражается логической схемой параметрических преобразований на **рис. 1, в**. Эта зависимость описывает взаимодействие двух преобразователей (q и f), соединенных по схеме отрицательной обратной связи. Учитывая выражение (11) для определения f , зависимость (13) можно представить в виде уравнения, которое связывает годовую производительность Q (или ресурс $[Q]_{\psi}$) в тоннах с длительностью годовых $t_{\Pi\psi}$ (или единичного $[t_{\Pi}]_{\psi}$) простоев комплекса по причине отказа ψ -х элементов:

$$Q = \frac{Q}{Q + q \cdot t_{\Pi\psi}} \cdot q \cdot \left(t_{\text{НОМ}} - \sum_{i=1}^{i=M-\psi} t_{\Pi i} \right) = \frac{[Q]_{\psi}}{[Q]_{\psi} + q \cdot [t_{\Pi}]_{\psi}} \cdot q \cdot \left(t_{\text{НОМ}} - \sum_{i=1}^{i=M-\psi} t_{\Pi i} \right). \quad (14)$$

Подставляя согласно (12) ресурс в часах, окончательно получим искомое кибернетическое универсальное уравнение:

$$Q = \frac{t_{p\psi}}{t_{p\psi} + [t_{\Pi}]_{\psi}} \cdot q \cdot \left(t_{\text{НОМ}} - \sum_{i=1}^{i=M-\psi} t_{\Pi i} \right). \quad (15)$$

Универсальность полученной совокупности уравнений (15) при подстановке в нее требуемого значения индекса i вместо ψ заключается в том, что она отвечает поставленной цели и связывает производительность Q – выбранный показатель эксплуатационной надежности валков (или эффективности функционирования исследуемого технологического комплекса), одновременно с ресурсом $t_{p\psi}$

интересующих исследователя низконадежных элементов и длительностью $[t_{\Pi}]_{\psi}$ единичного простоя комплекса для их замены, например, перевалки валков исследуемого ОТК ШС. Если величины простоев $[t_{\Pi}]_i$ (или $t_{\Pi i}$) в уравнениях (15) определяются продолжительностью операций ТОиР и считаются заданными, то для аналитической оценки долговечности и определения среднего ресурса t_{pi} каждого i -го низконадежного элемента можно использовать примененный выше эргодинамический подход. Поэтому сформулируем краевые задачи (подобные (7) и (8)) для описания их прочностных и износных отказов.

Для моделирования отказов i -х низконадежных элементов по j -м критериям прочности и оценки их среднего ресурса построим систему уравнений для последовательного определения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{(16.1) – скорости повреждаемости } i\text{-го элемента по } j\text{-му критерию} \\ \text{прочности при прокатке } k\text{-й партии полос для } k = 1, 2, 3, \dots : \\ \dot{u}_{eijk} = 2 \cdot k_{yi} \cdot \frac{k_B \cdot T_i}{h} \cdot \frac{U_0(\sigma_{\text{ш}ij}, T_i)}{V_a} \cdot \exp\left(-\frac{U'_0(\sigma_{\text{ш}ij}, T_i)}{k_B \cdot T_i}\right) \cdot \text{sh}\left(\frac{A_f^0(\sigma_{\text{д}ij})}{2 \cdot k_B \cdot T_i}\right); \\ \text{(16.2) – текущей плотности энергии дефектов в локальных,} \\ \text{повреждаемых по } j\text{-му критерию объемах материала} \\ \text{} i\text{-го элемента :} \\ u_{eijk} = u_{e0i} + \sum_k \dot{u}_{eijk} \cdot t_{\text{п}k}; \\ \text{(16.3) – среднего ресурса } i\text{-го элемента по } j\text{-му критерию :} \\ t_{pkij}^* = t_{ijk-1} \text{ и } k_{ij}^* = k - 1, \\ \text{если в условии : } t_{ijk} = \left[\sum_{k-1} t_k + \frac{(u_{eijk} - u_{eijk-1})}{\dot{u}_{eijk}} \right], u_{eijk} \geq u_{eij}^*. \end{array} \right. \quad (16)$$

Параметры, входящие в уравнения системы (16), характеризуют краевые условия задачи и определяются расчетной схемой стационарного силового и теплового нагружения i -го элемента при прокатке заданного сортамента полос. Поэтому для расчета скорости \dot{u}_{eijk} повреждаемости локальных объемов каждого i -го низконадежного элемента, разрушаемых по каждому j -му критерию прочности при прокатке каждой k -й партии полос по (16.1), а затем определения ресурса t_{pkij}^* по уравнениям (16.2), (16.3), в первую очередь необходимо:

– по известным методикам сопротивления материалов определить максимальные напряжения $\sigma_{\text{max } ijk}$, действующие в локальных, соответствующих j -му критерию, объемах материала i -го элемента и найти их шаровую $\sigma_{\text{ш}ij}$ и девиаторную $\sigma_{\text{д}ij}$ составляющие (см. параметры системы (7));

– по методике работ [14, 23] определить температуру T_i необходимых объемов материала i -го элемента.

Остальные параметры системы (16) и формулы для их определения показаны при постановке задачи (7).

Для описания износных отказов i -х низконадежных узлов трения (сопряжений) исследуемого ОТК ШС и оценки их среднего ресурса построим, опуская индекс $j = 3$, систему определяющих уравнений для последовательного расчета:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 (17.1) - \text{скорости изнашивания } i\text{-го узла трения при прокатке } k\text{-й партии} \\
 \text{полос последовательно для } k = 1, 2, 3 \dots : \\
 \dot{x}_{ik} = \frac{\alpha_{ik}^* \cdot v_{ik} \cdot f_{\text{мех}ik} \cdot P_{\text{ник}} \cdot V_{\text{ски}}}{\Delta u_{ei}^*}; \\
 (17.2) - \text{текущего износа сопряжения (наиболее изнашиваемой детали)} \\
 \text{после прокатки } k\text{-й партии полос :} \\
 x_{ik} = x_{i0} - x_{ik-1} - \dot{x}_{ik} \cdot t_k; \\
 (17.3) - \text{среднего ресурса } i\text{-го сопряжения по критерию износостойкости :} \\
 t_{pk_{ij=3}}^* = t_{ik-1} \text{ и } k_{ij=3}^* = k - 1, \\
 \text{если в условии : } t_{ik} = \left[\sum_{k-1} t_k + \frac{(x_{ik} - x_{ik-1})}{\dot{x}_{ik}} \right], \quad x_{ik} \geq x_{ik}^*.
 \end{array} \right. \quad (17)$$

Параметры, входящие в уравнения системы (17), определяют краевые условия исследуемого сопряжения и рассчитываются по методикам работ [14, 23, 25]:

\dot{x}_{ik} – скорость изнашивания исследуемого i -го сопряжения при прокатке k -й партии полос обычно определяется как скорость изнашивания трибоэлемента из менее износостойкого материала;

$\alpha_{ik}^* = \frac{A_{aik}}{A_{\text{трик}}}$ – коэффициент перекрытия площади трения $A_{\text{трик}}$ изнашиваемого трибоэлемента

номинальной площадью контакта A_{aik} ;

v_{ik} – коэффициент поглощения внешней энергии трения поверхностным слоем материала изнашиваемого элемента i -го сопряжения;

$f_{\text{мех}ik}$ – механическая составляющая коэффициента трения в исследуемом сопряжении;

$V_{\text{ски}}$ – скорость относительного скольжения трущихся поверхностей в рассматриваемом узле трения;

x_{i0} , x_{ik-1} и x_{ik}^* – начальный (прирабочный), $(k - 1)$ -й и предельный износ i -го сопряжения.

Остальные параметры системы (17) и формулы для их определения показаны при постановке задачи (8).

Алгоритмизация решения замкнутой системы алгебраических уравнений (16) и (17) определит методику аналитической оценки среднего ресурса любого (кроме валков) i -го наименее работоспособного элемента (детали или узла трения) исследуемого ОТК ШС, необходимых при оценке главного показателя эксплуатационной надежности валков – производительности ШС по уравнениям (15).

Заключение

Предложен новый методологический подход – теоретический метод исследования процессов формирования постепенных деградационных отказов рабочих и опорных валков ОТК ШС для прогнозирования их долговечности и надежности эксплуатации на основе математического моделирования физических процессов повреждаемости структуры их материалов при прокатке полос известного сортамента. Он основан на обобщении данных анализа базовых положений параметрической теории

надежности, эргодинамики деформируемых твердых тел, энергомеханической теории трения и усталостного изнашивания, а также технической кибернетики. Такой синтез позволил получить новый результат – возможность разрабатывать математический аппарат для прогнозирования показателей долговечности и эксплуатационной надежности валков ОТК ШС без использования статистики их отказов в самых разнообразных условиях прокатки. Новизна обусловлена тем фактом, что опубликованные в многочисленной литературе по теории ОМД и частью проанализированные в

статье методы опираются на заведомо некорректные статистические данные об отказах исследуемых валков или характеризуют только вид их состояния.

К значимым научным результатам следует также отнести разработанные в соответствии с предложенной методологией и представленные в статье:

- модели процессов контактного взаимодействия валков и полосы (6);
- прочностные и износые модели отказов валков (7) и (8), а также всех низконадежных элементов ОТК ШС (16) и (17);
- кибернетическое уравнение (15) для оценки эффективности функционирования комплекса в целом.

Главным отличием поставленных в статье комплексных взаимосвязанных краевых задач от всех известных моделей отказов валков являются новые кинетические уравнения для описания процессов повреждаемости структуры их материалов и термодинамический критерий разрушения. Такой аналитический подход применен впервые при оценке надежности и долговечности прокатных валков ОТК ШС.

Список источников

1. ГОСТ Р 57188-2016. Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.
2. ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2018. 15 с.
3. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения (ИЕС 60050-192:2015, NEQ). М.: Российский институт стандартизации, 2021. 46 с.
4. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения / Межгосударственный стандарт ЕАСС. Минск: Госстандарт республики Беларусь, 2005. 43 с.
5. Надежность и эффективность в технике: справочник: В 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др.; под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
6. ГОСТ 27.204-83. Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности. М.: Изд-во стандартов, 1984. 41 с.
7. Машины и агрегаты металлургических заводов: учебник для вузов. В 3 т. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката / Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1988. 680 с.
8. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки: (теория, оборудование, технология). М.: ОАО «Черметинформация»; Череповец: ГОУ ВПО «ЧГУ», 2004. 416 с.
9. Боровик Л.И., Добронравов А.И. Технология подготовки и эксплуатации валков тонколистовых станов. М.: Металлургия, 1984. 104 с.
10. РТМ 24.010.20-74. Расчет на долговечность (по усталости) узлов и деталей металлургического оборудования. Определение эквивалентной нагрузки. М.: ВНИИМЕТМАШ, 1974. 31 с.
11. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения. Самара: СГТУ, 2000. 268 с.
12. Р 50-95-88. Рекомендации. Обеспечение износостойкости изделий: основные положения. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. 24 с.
13. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
14. Федоров В.В. Основы эргодинамики и синергетики деформируемых тел: монография. Ч. III. Основы эргодинамики деформируемых тел / под ред. С.В. Федорова. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. 222 с.
15. Кожевникова И.А., Гарбер Э.А. Развитие теории тонколистовой прокатки для повышения эффективности работы широкополосных станов: монография. Череповец: ГОУ ВПО «ЧГУ», 2010. 275 с.
16. Салганик В.М., Полецков П.П. Моделирование деформаций и нагрузок валковой системы кварто и повышение качества листового проката по профилю: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. 133 с.
17. Вирабов Р.В. Тяговые свойства фрикционных передач. М.: Машиностроение, 1982. 263 с.
18. Разработка профилировки валков двухклетового реверсивного стана ОАО «ММК» с учетом размерного, марочного сортамента и стойкости валков / В.М. Салганик, П.П. Полецков, И.В. Виер и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. №3. С. 19-22.
19. Управление качеством горячекатаного проката по профилю и плоскостности на базе использования автоматизированной системы / В.М. Салганик, П.П. Полецков, Ю.Б. Кухта и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №1. С. 59-62.
20. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: справочник. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
21. Модель параметрических отказов валковых систем кварто по различным критериям / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов и др. //

- Производство проката. 2015. №2. С. 35-42.
22. Гарбер Э.А., Хлопотин М.В. Моделирование и совершенствование теплового режима и профилировок валков широкополосных станов горячей прокатки: монография. Череповец: ЧГУ; М.: Теплотехник, 2013. 113 с.
 23. Энергомеханическая концепция прогнозирования долговечности узлов трения по критерию износостойкости элементов / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов и др. // Трение и износ. 2016. Т. 37. №5. С. 636-642. DOI: 10.3103 / S 1068366616050032
 24. Оценка и обеспечение эффективности функционирования основного оборудования широкополосных станов / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, П.В. Макарова, Ю.С. Ляшева // Механическое оборудование металлургических заводов. 2019. №1(12). С. 15-24.
 25. Анцупов А.В. (мл.) Аналитический метод проектной оценки ресурса элементов металлургических машин / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. №1. С. 30-35.

References

1. State standard GOST R 57188-2016. *Chislennoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. Terminy i opredeleniya* [Numerical modeling of physical processes. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform, 2016, 12 p. (In Russ.)
2. State standard GOST R 57412-2017. *Kompyuternye modeli v protsessakh razrabotki, proizvodstva i ekspluatatsii izdeliy. Obshchie polozheniya* [Computer models in design, manufacturing and maintenance. General]. Moscow: Standartinform, 2018, 15 p. (In Russ.)
3. State standard GOST R 27.102-2021. *Nadezhnost v tekhnike. Nadezhnost obekta. Terminy i opredeleniya* [Dependability in technics. Dependability of an item. Terms and definitions]. (IEC 60050-192:2015, NEQ). Moscow: Russian Standardization Institute, 2021, 46 p. (In Russ.)
4. State standard GOST 27.005-97. *Nadezhnost v tekhnike. Modeli otkazov. Osnovnye polozheniya* [Dependability in engineering. Failure models. Main provisions]. Interstate standard of EASC. Minsk: State Standards of the Republic of Belarus, 2005, 43 p. (In Russ.)
5. Utkin V.F., Kryuchkov Yu.V. *Nadezhnost i effektivnost v tekhnike: spravochnik* [Dependability and efficiency in engineering: Handbook]: in 10 volumes. Vol. 3. *Effektivnost tekhnicheskikh sistem* [Efficiency of engineering systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 328 p. (In Russ.)
6. State standard GOST 27.204-83. *Nadezhnost v tekhnike. Tekhnologicheskie sistemy. Tekhnicheskie trebovaniya k metodam otsenki nadezhnosti po parametram proizvoditelnosti* [Industrial product dependability. Technological systems. Technical requirements for methods of reliability evaluation on productivity parameters]. Moscow: Publishing House of Standards, 1984, 41 p. (In Russ.)
7. Tselikov A.I., Polukhin P.I., Grebenik V.M. et al. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov* [Machines and facilities of metallurgical plants]. In 3 volumes. Vol. 3. *Mashiny i agregaty dlya proizvodstva i otdelki prokata. Uchebnik dlya vuzov* [Machines and facilities used for production and finishing of rolled products. Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 680 p. (In Russ.)
8. Garber E.A. *Stany kholodnoy prokatki: (teoriya, oborudovanie, tekhnologiya)* [Cold rolling mills: (theory, equipment, technology)]. Moscow: OJSC Chermetinformatiya; Cherepovets: Cherepovets State University, 2004, 416 p. (In Russ.)
9. Borovik L.I., Dobronravov A.I. *Tekhnologiya podgotovki i ekspluatatsii valkov tonkolistovykh stanov* [Technology of preparation and operation of rolls of sheet rolling mills]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 104 p. (In Russ.)
10. Technical directive RTM 24.010.20-74. *Raschet na dolgovechnost (po ustalosti) uzlov i detaley metallurgicheskogo oborudovaniya. Opredelenie ekvivalentnoy nagruzki* [Calculation of durability (fatigue) of components and parts of metallurgical equipment. Determination of equivalent load]. Moscow: All-Russian Research and Design Institute for Metallurgical Engineering, 1974, 31 p. (In Russ.)
11. Berkovich I.I., Gromakovskiy D.G. *Tribologiya. Fizicheskie osnovy, mekhanika i tekhnicheskie prilozheniya* [Tribology. Physics, mechanics, and technical applications]. Samara: Samara State Technical University, 2000, 268 p. (In Russ.)
12. Recommendations R 50-95-88. *Rekomendatsii. Obespechenie iznosostoikosti izdelii* [Recommendations. Ensuring wear resistance of products]. Moscow: State Committee of the USSR for Standards, 1989, 24 p.
13. Pronikov A.S. *Parametricheskaya nadezhnost mashin* [Parametric reliability of machines]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2002, 560 p. (In Russ.)
14. Fedorov V.V. *Osnovy ergodinamiki i sinergetiki deformiruemyykh tel: monografiya* [Fundamentals of ergodynamics and synergetics of deformable bodies: Monograph]. Kaliningrad: Kaliningrad State Technical University, 2014, 222 p. (In Russ.)
15. Kozhevnikova I.A., Garber EA. *Razvitie teorii tonkolistovoy prokatki dlya povysheniya effektivnosti raboty shirokopolosnykh stanov: monografiya* [Development of the theory of sheet rolling to improve efficiency of hot strip mills: Monograph]. Cherepovets: Cherepovets State University, 2010, 275 p. (In Russ.)
16. Salganik V.M., Poletskov P.P. *Modelirovanie deformatsii i nagruzok valkovoy sistemy kvarto i povyshenie kachestva listovoy prokata po profilyu:*

- Monografiya* [Modeling of deformations and loads of the four-high stand system and improving the quality of rolled sheets according to the profile: Monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2009, 133 p. (In Russ.)
17. Virabov R.V. *Tyagovye svoystva friktsionnykh peredach* [Hauling properties of friction gears]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 263 p. (In Russ.)
 18. Salganik V.M., Poletskov P.P., Vier I.V. et al. Development of profiling of rolls for a double-stand reversing mill at OJSC MMK factoring into the size, grade range and durability of rolls]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2003;(3):19-22. (In Russ.)
 19. Salganik V.M., Poletskov P.P., Kukhta Yu.B. et al. Quality management of hot rolled products by their profile and flatness based on the automated system. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010;(1):59-62. (In Russ.)
 20. Kragelsky I.V., Mikhin N.M. *Uzly treniya mashin: spravochnik* [Friction units of machines: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 280 p. (In Russ.)
 21. Antsupov A.V., Jr., Antsupov A.V., Antsupov V.P. et al. A model of parametric failures of four-high stand systems by various criteria. *Proizvodstvo prokata* [Production of Rolled Products]. 2015;(2):35-42. (In Russ.)
 22. Garber E.A., Khlopotin M.V. *Modelirovanie i sovershenstvovanie teplovogo rezhima i profilirovok valkov shirokopolosnykh stanov goryachey prokatki: Monografiya* [Modeling and improvement of thermal conditions and roll profiling of hot strip mills: Monograph]. Cherepovets: Cherepovets State university; Moscow: Teplotekhnika, 2013, 113 p. (In Russ.)
 23. Antsupov A.V., Jr., Antsupov A.V., Antsupov V.P. et al. An energy and mechanical concept of predicting durability of friction units by the criterion of wear resistance of elements. *Trenie i iznos* [Friction and Wear]. 2016;37(5):636-642. DOI: 10.3103 / S 1068366616050032 (In Russ.)
 24. Antsupov A.V., Jr., Antsupov A.V., Antsupov V.P., Makarova P.V., Lyasheva Yu.S. Evaluating and ensuring efficiency of main equipment of hot strip mills. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical Equipment of Metallurgical Plants]. 2019;(1(12)):15-24. (In Russ.)
 25. Antsupov A.V., Jr., Antsupov A.V., Antsupov V.P. An analytical method for design evaluation of life of elements of metallurgical machines. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of Universities. Ferrous Metallurgy]. 2017;60(1):30-35. (In Russ.)

Поступила 07.06.2023; принята к публикации 17.07.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 07/06/2023; revised 17/07/2023; published 25/09/2023

Анцупов Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: a.antcupov@gmail.com. ORCID 0000-0001-9432-9517

Анцупов Александр Викторович – доктор технических наук, профессор,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.
Email: antsupov.alexander@gmail.com. ORCID 0000-0002-9237-424X

Анцупов Виктор Петрович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: antsupov.vp@gmail.com. ORCID 0000-0002-8187-5479

Рыскина Елена Сергеевна – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: elenresh74@gmail.com. ORCID 0000-0002-7209-8575

Aleksei V. Antsupov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: a.antcupov@gmail.com. ORCID 0000-0001-9432-9517

Aleksandr V. Antsupov – DrSc (Eng.), Professor,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.
Email: antsupov.alexander@gmail.com. ORCID 0000-0002-9237-424X

Viktor P. Antsupov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: antsupov.vp@gmail.com. ORCID 0000-0002-8187-5479

Elena S. Ryskina – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: elenresh74@gmail.com. ORCID 0000-0002-7209-857