



УДК 531.43/46

А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов,
П.В. Макарова, Ю.С. Ляшева
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: antsupov.vp@gmail.com
Дата поступления 01.06.2019

ОЦЕНКА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ

Аннотация

Рассматривая систему "прокатный стан - полоса" с позиций экономической кибернетики, в статье предложена методика аналитической проектной оценки годовой производительности главных линий ШС в функции ресурса и длительности простоев наименее работоспособных элементов. Для проектного расчета ресурса низконадёжных деталей разработаны физико-математические модели их параметрических отказов по различным критериям прочности и износостойкости материалов. Предложенная методика позволяет прогнозировать уровень долговечности ресурсных элементов и соответствующую ему производительность действующих широкополосных станов, а также теоретически исследовать возможные способы продления ресурса лимитирующих элементов по критерию максимальной эффективности функционирования главных приводов.

Ключевые слова: широкополосный стан; главная линия; ненадежные элементы; прогнозирование; ресурс; производительность; повышение; эффективность функционирования.

Описание проблемы

Производительность (годовой объем продукции, доход, суммарный полезный эффект) сложных механических систем, к которым относятся главные (рабочие) линии в первую очередь чистовых клетей широкополосных станов (ГЛ ШС), является одним из основополагающих количественных показателей интенсивности их использования [1]. Полезный эффект, который называют параметром эффективности функционирования сложной механической системы (здесь основного оборудования главных линий чистовых клетей ШС), отображает его главное свойство - выполнять свое функциональное назначение в реальных условиях эксплуатации [2-4].

Параметр эффективности функционирования главной линии - практически возможную годовую производительность стана Q ($m / год$), определяют произведением технической характеристики q ($m / ч$) основного оборудования на число рабочих

часов в году (годовой фонд рабочего времени) T_p ($ч / год$) [5-6]:

$$Q = q \cdot T_p. \quad (1)$$

В качестве технической характеристики q ($m / ч$) принимают средневзвешенную практически возможную часовую производительность по всему сортаменту (по "приведенному" профилю):

$$q = \left(\frac{a_1}{q_1} + \frac{a_2}{q_2} + \dots + \frac{a_j}{q_j} + \dots + \frac{a_n}{q_n} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где $a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_n$ - доли отдельных j -тых профиларазмеров полос в сортаменте стана;

$q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_n$ - практически возможная часовая производительность по каждому отдельному j -тому профиларазмеру, $m / ч$:

$$q_j = 3600 \cdot G_C \cdot k_H / (t_{цj} \cdot \sum k_P), \quad (3)$$

где 3600 и G_C - число секунд в одном часе и масса исходной заготовки или сляба, m ;

$k_H = 0,9$ - коэффициент использования непрерывных станов, учитывающий неизбежные нарушения ритма прокатки, связанные с уровнем организации производства, состоянием оборудования, квалификацией персонала, степенью трудоемкости сортамента и вызывающие внеплановые, нерегистрируемые простои [5];

$t_{цj} = t_{mj} + t_{\Pi}$ - цикл (ритм, темп) прокатки j -той партии полос в последней клетки чистовой группы, c , определяемый для одной из трех схем прокатки полос на стане [6]. (t_{mj} - время прохода полосы в одной клетки чистовой группы, c ; и t_{Π} - время паузы между концом прокатки предыдущей полосы и началом прокатки следующей в одной клетки, c);

$\sum k_p = G_c / G_{г.л} =$
 $= k_{н.о} \cdot k_{с.о} \cdot k_{об.к} \cdot k_{об.б} \cdot k_{об.р} \cdot k_{мп}$ - суммарный ко-

эффициент расхода металла, определяемый производением ряда эмпирических коэффициентов [5]. Здесь $k_{н.о} = 1,01...1,03$ - коэффициент, учитывающий потери металла за счет образования печной окалины; $k_{с.о} = 1,001...1,07$ - коэффициент, учитывающий потери металла за счет образования вторичной (воздушной) окалины; $k_{об.к}$ - коэффициент, учитывающий потери металла из-за обрезки переднего и заднего концов раската перед чистовой группой; $k_{об.б} = 1,05...1,1$ - коэффициент, учитывающий потери металла из-за обрезки боковых кромок; $k_{об.р} = 1,05...1,1$ - коэффициент, учитывающий потери металла из-за обрезки переднего и заднего концов рулона; $k_{мп} = 1,001...1,02$ - коэффициент, учитывающий потери металла на пробы для испытаний.

Широкополосные станы работают по непрерывному графику, поэтому длительность годового фонда рабочего времени T_p в условиях (1) определяется разностью календарного годового фонда T_K времени при 365 днях в году и суммарной годовой продолжительностью остановок стана на

планово-предупредительные и капитальные ремонты T_{PEM} , а также простоев стана T_{Π} по различным (i -тым) причинам:

$$T_p = T_K - T_{PEM} - T_{\Pi} = \left(T_{НОМ} - \sum_{i=1}^{i=k} T_i \right). \quad (4)$$

На широкополосных станах годовую продолжительность ремонтов устанавливают из опыта работы и принимают равной $T_{PEM} = 27 \text{ сут}$, а разность $T_{НОМ} = T_K - T_{PEM} = (365 - 27) \cdot 24 \text{ ч} = 8112 \text{ ч}$ - называют номинальным числом рабочих часов стана в году.

Суммарное время простоев стана $T_{\Pi} = \sum_{i=1}^{i=k} T_i$, предназначенное для проведения перевалок рабочих валков ($i = 1$), опорных валков ($i = 2$), профилактических работ по ТО и восстановлению необходимых ресурсных элементов: шарниров УШ, подшипников, зубчатых механизмов ($i = 3, 4, 5, \dots, m$), настроек и перестроек стана ($i = m + 1$), приемок и сдач смен ($i = m + 2$) и других работ ($i = m + 3, \dots, k$), определяют обычно на основе обобщения опыта эксплуатации конкретного стана.

Для действующих в РФ широкополосных станов значение T_{Π} устанавливают в пределах 7 - 13% от располагаемого фонда времени T_K . Иными словами, длительность годовых простоев на каждом конкретном стане назначают только из опыта эксплуатации имеющегося оборудования, квалификации персонала и вида организованной на стане службы ТОиР в диапазоне $T_{\Pi} = (612...1138) \text{ ч}$. В то же время очевидно, что снижение простоев основного оборудования за счет продления ресурса его низконадежных элементов может привести к существенному повышению производительности исследуемого широкополосного стана и экономической эффективности предприятия.

В этом плане актуальной становится народно-хозяйственная проблема создания научно обоснованного подхода к проектной оценке производительности ШС в функции суммарных наработок до отказа наименее работоспособных (низконадеж-

ных, ресурсных [5]) деталей и узлов и длительности их годовых простоев в заданных условиях эксплуатации. Возможный вариант ее аналитического решения рассматривается ниже с использованием базовых положений экономической кибернетики, физической теории надежности и кинетического подхода к процессам повреждаемости и разрушения конструкционных материалов деталей машин в различных условиях нагружения и внешнего трения.

Методика аналитической оценки и повышения производительности ШС

В основу решения озвученной проблемы могут быть положены базовые идеи системного подхода к исследованию, анализу и улучшению технологии и оборудования листовых станов, предложенные в работах Заверюхи В.Н. и его коллег [7, 8]. Рассматривая систему "прокатный стан - полоса" с позиций экономической кибернетики [7], автор полагает следующее.

Исследуемая система в соответствии с уравнением (1) преобразует годовое рабо-

чее время $T_p, ч/год$ (как разность номинального количества часов в году и количества часов, затрачиваемых на простои, см. (4)) в количество прокатываемых тонн в год $Q (м/год)$ умножением его на часовую производительность $q (м/ч)$, см. рис.1.а;

Если, например, рассмотреть первую группу ресурсных элементов - рабочие валки ($i = 1$), и исследовать время $T_{i=1}$, затрачиваемое в течение года на их перевалки, то по тому же кибернетическому принципу можно полагать, что количество прокатанных тонн в год $Q (м/год)$ может быть преобразовано в "отрицательное" годовое время перевалок рабочих валков $T_{i=1}, ч/год$ в соответствии с уравнением:

$$-T_{i=1} = f \cdot Q, \quad (1.5)$$

где $f = T_{i=1} / Q = t_{i=1} / [Q]_{i=1}$ - передаточный коэффициент цепи отрицательной обратной связи (см. рис.1.б), который определяет долю времени перевалок рабочих валков на одну тонну проката, $ч/м$ [7];

$t_{i=1}$ - длительности одной перевалки рабочих валков, $ч$.

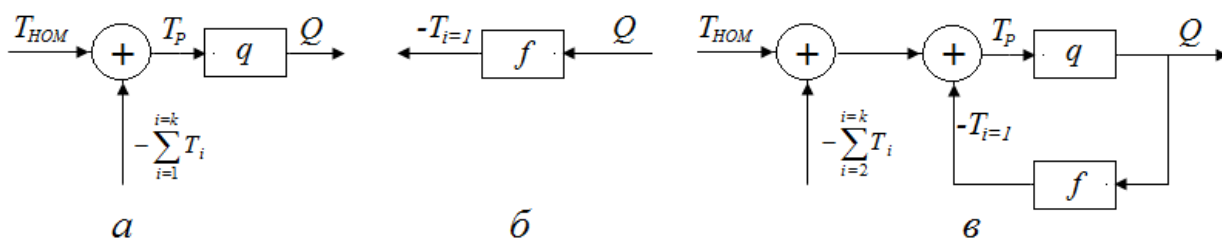


Рисунок 1. Схемы преобразования для расчета производительности ШС [7]
а - времени в количество проката; б - количество проката во время перевалок рабочих валков; в - времени в количество проката с учетом отказов рабочих валков

В условии (5) автор считает неизменной норму количества металла, прокатываемого между перевалками $[Q]_{i=1}$, которая согласно ГОСТ 27.002 [9] называется ресурсом рабочих валков.

Совместным решением уравнений (1) и (5) получаем зависимость [7]:

$$Q = \frac{1}{1 + q \cdot f} \cdot q \cdot \left(T_{НОМ} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i \right), \quad (6)$$

которая отражается структурной схемой на рис.1.в. Эта зависимость описывает взаимодействие двух преобразователей (q и f),

соединенных по схеме отрицательной обратной связи. Учитывая выражение для определения f , уравнение (6) можно представить в виде искомой зависимости, которая связывает годовую производительность Q с ресурсом $[Q]_{i=1}$ и длительностью простоев $t_{i=1}$ (или $T_{i=1}$) исследуемых низконадежных элементов (в данном случае рабочих валков):

$$Q = \frac{Q}{Q + q \cdot T_{i=1}} \cdot q \cdot \left(T_{НОМ} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i \right) =$$

$$= \frac{[Q]_{i=1}}{[Q]_{i=1} + q \cdot t_{i=1}} \cdot q \cdot \left(T_{НОМ} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i \right) \quad (7)$$

Анализ (6) и (7) позволяет сделать ряд интересных заключений.

а). Величина $\frac{1}{1 + q \cdot f}$ показывает во сколько раз уменьшается длительность годового фонда рабочего времени $T_{НОМ} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i$ при учете времени простоев $T_{i=1}$ на перевалки рабочих валков.

б). При неизменных значениях ресурса $[Q]_{i=1}$ рабочих валков и длительности одной перевалки $t_{i=1}$, увеличение часовой

производительности от q_1 до q_2 и далее до q_3 приводит к увеличению числа перевалок в течение года и, соответственно, длительности годовых простоев стана от $T'_{i=1}$ - (за 6 перевалок), до $T''_{i=1}$ - (за 8 перевалок), и до $T'''_{i=1}$ - (за 17 перевалок), см. рис.2. Здесь q_3 равно такому значению, при котором произведение $q_3 \cdot f_3 = 1$, а время годовых простоев на перевалки $T'''_{i=1}$ равно чистому (с учетом пауз между полосами) времени прокатки без перевалок $T_{i=1} = T_p - T_{i=1}$, рис.2, график 3.

в). В связи с необходимостью перевалок годовая производительность увеличивается медленнее по сравнению с ростом часовой (см. рис.2, графики 1 и 2: $q_2 / q_1 = 1,5$, а $Q_2 / Q_1 = 1,3$).

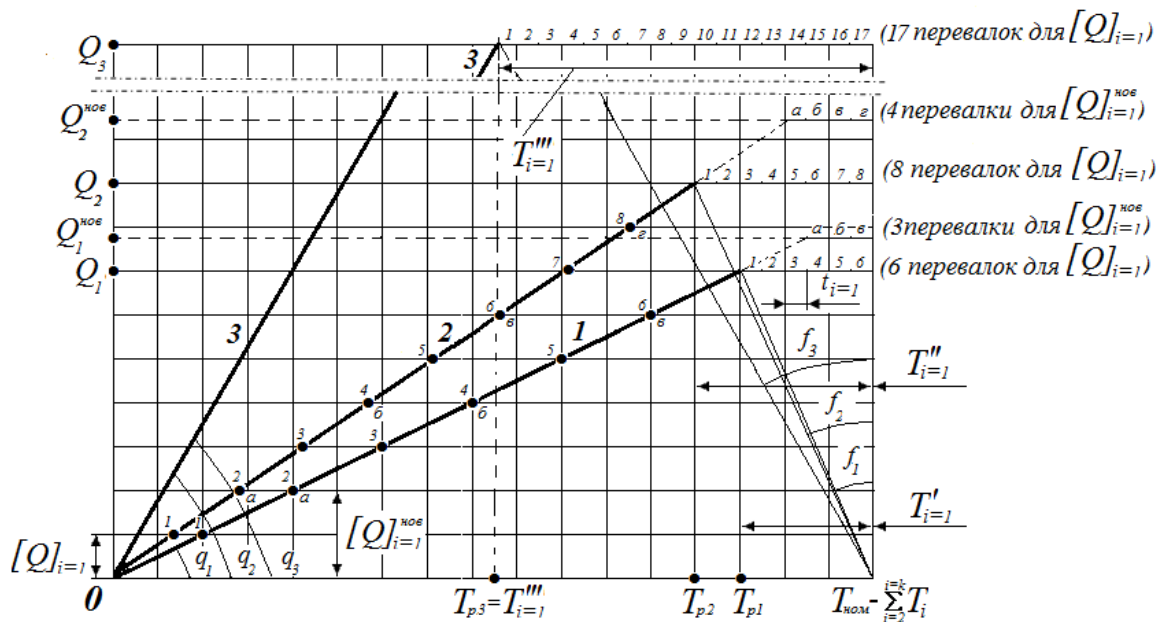


Рисунок 2. Связь производительности Q с длительностью годовых простоев $T_{i=1}$ первого ($i = 1$) исследуемого элемента (рабочих валков)

В связи с тем, что на действующих станах техническая характеристика q остается неизменной ($q = \text{const}$), рост годового дохода Q в рассматриваемом примере возможен только за счет увеличения ресурса рабочих валков $[Q]_{i=1}$ - суммарной их наработки до перехода в предельное состояние [9]. На рис.2 показано, что повышение ве-

личины $[Q]_{i=1}$ в два раза (до нового значения $[Q]_{i=1}^{\text{нов}}$) приводит к увеличению годовой производительности:

- для стана с часовой производительностью q_1 (график 1) от величины Q_1 до значения $Q_1^{\text{нов}}$ за счет снижения числа перевалок рабочих валков с шести до трех в год и уменьшения в два раза соответствующей длительности годовых простоев $T'_{i=1}$ на перевалки;

- для стана с часовой производительностью q_2 (график 2) от величины Q_2 до значения $Q_2^{нов}$ за счет снижения числа перевалок рабочих валков с восьми до четырех в год и уменьшения в два раза соответствующей длительности годовых простоев $T_{i=1}''$ на перевалки.

При решении задачи по влиянию на производительность стана Q ресурса $[Q]_{i=1}$ и длительности перевалки $t_{i=1}$ рабочих валков следует учесть, что на некоторых *станах* ресурс рабочих валков часто определяют не массой прокатанных полос в тон-

нах $[Q]_{i=1}$, а соответствующей этому тоннажу длиной прокатанной полосы $[L]_{i=1}$ в километрах (метрах) или продолжительностью их работы $t_{p\ i=1}$ в часах (сутках). Поэтому, учитывая, что $[L]_{i=1} = [Q]_{i=1} / (\rho \cdot h \cdot B)$ и $t_{p\ i=1} = [Q]_{i=1} / q = [L]_{i=1} / V_{np}$ (ρ , h , B , q и V_{np} - удельный вес стали, толщина и ширина средневзвешенного профиля, часовая производительность и скорость прокатки в последней клети стана), зависимость (7) для проектного расчета производительности *ШС* можно записать в виде:

$$Q = \frac{[L]_{i=1}}{[L]_{i=1} + q \cdot t_{i=1} / (\rho \cdot h \cdot B)} \cdot q \cdot \left(T_{НОМ} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i \right) \quad (8)$$

или

$$Q = \frac{t_{p\ i=1}}{t_{p\ i=1} + t_{i=1}} \cdot q \cdot \left(T_{НОМ} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i \right). \quad (9)$$

Подобный анализ с использованием структурной схемы на рис. 1.в и уравнений (6) - (9) можно повторить для других ресурсных элементов: опорных валков ($i = 2$), шарниров универсальных шпинделей ($i = 3$), подшипниковых опор ($i = 4$), зубчатых зацеплений ($i = 5$) и так далее для $i = 6, \dots, k$.

Универсальность полученного уравнения (9) при подстановке в него требуемого значения индекса i (вместо значения $i = 1$) заключается в том, что оно отвечает поставленной цели и связывает эффективность функционирования Q основного оборудования *ШС* одновременно с ресурсом $t_{p\ i}$ исследуемого низконадежного i -того элемента и длительностью t_i его единичного простоя для восстановления его работоспособности.

Если значения единичных t_i и годовых T_i простоев для восстановления (ремонта) тех или иных i -тых низконадежных элементов определяется продолжительностью операций ТОиР [3] и в проектных расчетах производительности Q по условию (9) выступают в качестве заданных параметров, то проблема аналитического прогнозирования их ресурса $t_{p\ i}$ в современной

литературе находится в стадии разработки. Ниже представлен авторский вариант ее решения.

Модели отказов низконадежных элементов главных приводов ШС

Решение вопросов проектной аналитической оценки ресурса перечисленных выше i -тых наименее работоспособных деталей и узлов *ГЛ ШС* усложняется не только множеством условий и режимов их силового и теплового нагружения, применяемых материалов и конструктивных особенностей, но и, как следствие, большим разнообразием причин их отказов.

Поэтому математические модели отказов для прогнозирования ресурса $t_{p\ i}$ всех исследуемых i -тых наименее работоспособных элементов *ГЛ ШС* следует разбить на два класса:

- модели перехода нагруженных элементов (деталей) *ГЛ* в предельное состояние по критериям прочности;
- модели потери работоспособности узлов трения (трибосопряжений) *ГЛ* по критериям износостойкости.

При построении указанных математических моделей, на наш взгляд, можно использовать систему базовых уравнений физической теории надежности технических

объектов [10-13] в совокупности с основополагающими зависимостями кинетического подхода: термодинамической теории

прочности твердых тел и энерго-механической концепции изнашивания узлов трения [14-17].

Для прогнозирования ресурса t_{pi} исследуемого i -того элемента (детали) по критериям статической или усталостной прочности (при растяжении, сжатии, изгибе, кручении, сложном сопротивлении, контактном взаимодействии и других видах стационарного нагружения) сформулируем модель его отказа [10, 11, 13]. Она включает:

- систему определяющих уравнений для последовательной оценки:

- скорости повреждаемости i -того элемента при прокатке j -той партии полос последовательно для $j = 1, 2, 3, \dots$:

$$\dot{u}_{eij} = k_{cmpi} \cdot \frac{2 \cdot k \cdot T_{ij}}{h} \cdot U'_0(\sigma_{0ij}, T_{ij}) \cdot \exp\left(-\frac{U'_0(\sigma_{0ij}, T_{ij})}{k \cdot T}\right) \cdot sh\left(\frac{A_{fij}^0}{2 \cdot k \cdot T_{ij}}\right);$$

- текущей плотности дефектов его материала: $u_{eij} = u_{ei0} + (\sum \dot{u}_{eij} \cdot t_j)$;

- ресурса i -того элемента: $t_{pi}^n = k_{\Pi i} \cdot \left[(\sum t_{j-1}) + \frac{u_{eij} - u_{ei0}}{\dot{u}_{eij}} \right]$,

при $u_{eij} \geq u_{ei*}$, $j = j^*$, конец расчета;

(10)

- рассмотренные ниже зависимости для расчета входящих в систему (10) параметров, отражающие краевые условия эксплуатации, технологические и конструктивные особенности исследуемой i -той детали.

Параметры, входящие в первое и второе уравнение системы (10) [11, 13, 14].

$\dot{u}_{eij}$ - скорость накопления энергии искажений (дефектов) атомно-молекулярной структуры материала наиболее напряженного локального объема материала i -той исследуемой детали в процессе прокатки j -той партии полос.

u_{eij} - текущая суммарная плотность энергии дефектов, накопленная в локальном наиболее напряженном объеме материала, где действует максимальное расчетное напряжение σ_{ij} , после прокатки партий полос последовательно от первой до текущей j -той.

$t_j = \frac{G_j}{\rho_j \cdot b_j \cdot h_j \cdot V_j}$ - длительность про-

катки j -той партии полос массой G_j с поперечным сечением $b_j \cdot h_j$, плотностью материала ρ_j , со скоростью V_j прокатки.

k_{cmpi} - коэффициент упрочнения структуры материала детали:

$$k_{cmpi} = \frac{2 \cdot (u_{ei*} - u_{ei0})}{3 \cdot u_{ei*} - u_{ei0}}. \quad (10.a)$$

k, h - постоянная Больцмана и постоянная Планка.

u_{ei0} и u_{ei*} - начальное и критическое значение плотности скрытой энергии дефектов u_{eit} структуры материала i -того элемента соответственно [14]:

$$u_{ei0} = \frac{(0,071 \cdot HV_i)^{2,4} \cdot k_{\sigma i}^2}{6 \cdot G_i} \quad (10.6)$$

$$u_{ei*} = \Delta H_{TBi} - u_{Ti j}$$

$$HV_i \text{ и } G_i = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \mu_i)}, \quad E_i \text{ и } \mu_i - \text{исход-}$$

ная твердость по Виккерсу, модуль сдвига, линейный модуль упругости и коэффициент Пуассона материала.

$$k_{\sigma i} = \frac{1}{6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV_i + 0,12 \cdot 10^{-21}} - \text{ком-}$$

плексный структурный параметр.

ΔH_{TBi} - энтальпия плавления материала детали в твердом состоянии при температуре плавления T_{Si} .

$u_{Tij} = \rho_i \cdot c_i \cdot T_{ij}$ - энтальпия материала исследуемого элемента при температуре T_{ij} ; $c_{ij}(T_{ij})$ и $\rho_{ij}(T_{ij})$ - теплоемкость и плотность материала.

T_{ij} - текущая (j -тая) средняя по деформируемому объему температура материала элемента, определяемая по методике В.В. Федорова [14, 13].

$U'(\sigma_{0i}, T_{ij})$ - энергия активации образования дефектов при температуре T_{ij} и напряжении σ_{0ij} (σ_{0ij} - среднее напряжение или шаровая часть тензора напряжений):

$$U'_{ij}(\sigma_{0i}, T_{ij}) = U_i(p_{T,0}) - \Delta U_{Tij} - A^0_{vij}, (10.в)$$

$U_i(p_{T0})$ - начальная энергия активации разрушения структуры с учетом теплового давления p_{T0} при T_{0i} и $\sigma = 0$:

$$U_i(p_{T0}) = \frac{-2,415 \cdot 10^{-28} \cdot T_{0i}^3 + 5,955 \cdot 10^{-25} \cdot T_{0i}^2 + 0,0121 \cdot 10^{-20} \cdot T_{0i} + 12,286 \cdot 10^{-20}}{V_{ami}}. (10.г)$$

V_{ami} - атомный объем материала исследуемого i -того элемента.

$\Delta U_{Tij} = 1,5 \cdot \alpha_{0i} \cdot K_i \cdot T_{ij}$ - изменение энергии активации от температуры саморазогрева локальных объемов от $T = 0, ^\circ\text{C}$ до $T_{ij}, ^\circ\text{C}$.

α_{0i} - коэффициент линейного теплового расширения материала детали;

$K_i = \frac{E_i}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu_i)}$ - объемный модуль упругости.

A^0_{vij} - работа шарового тензора напряжений (среднего напряжения) σ_{0ij} , затраченная на изменение объема локальной зоны деформируемого элемента:

$$A^0_{vij} = \frac{\phi_{\sigma i}^2 \cdot M_{ri}^2 \cdot \sigma_{0ij}^2}{2 \cdot K_i}. (10.д)$$

$\phi_{\sigma i} = k_{\sigma i} \cdot v_{0i}^{0,5}$ - коэффициент перенапряжения на межатомных связях.

$M_{ri} = \left[\frac{\sigma_{Ti} \cdot (65 + 0,46 \cdot HV_i)}{\sigma_{ri}^2} \right]^{0,5}$ - коэффициент эквивалентности циклического и статического напряженного состояния.

σ_{ri} - предел выносливости материала, определяемый в функции предела прочности.

Работа A^0_{fij} девиатора напряжений (интенсивности напряжений) σ_{Dij} , затраченная на изменение формы локального объема деформируемого элемента:

$$A^0_{fij} = \frac{\phi_{\sigma i}^2 \cdot M_{ri}^2 \cdot \sigma_{Dij}^2}{6 \cdot G_i}; (10.е)$$

σ_{0ij} и σ_{Dij} - шаровая и девиаторная части тензора напряжений в условиях (10.д) и (10.е) определяются в зависимости от вида напряженного состояния наиболее нагруженных локальных объемов i -того элемента по известным уравнениям сопротивления материалов [11, 13, 14].

Параметры, входящие в третье уравнение системы (10).

t_{pi}^H - расчетный ресурс исследуемого i -того низконадежного элемента по причине потери прочности (целостности) структуры его материала в том локальном объеме (объемах) материала, где действует максимальное напряжение σ_{ij} .

j_{II}^* - номер партии полос, предшествующей предельной - ($j_{II}^* + 1$)-вой, в процессе прокатки которой произойдет отказ исследуемой детали по энергетическому условию разрушения, см. (10).

$$k_{\Pi i} = \frac{t_j + t_{\text{пауз } j}}{t_j} - \text{коэффициент, учиты-}$$

вающий увеличение длительности прокатки j -той партии полос на время пауз $t_{\text{пауз } j} = n_j \cdot t_{\Pi}$ между полосами (n_j - число полос в j -той партии; t_{Π} - время паузы).

Алгоритмизация математической модели (10) - (10.а-ж) определит методику аналитической оценки ресурса любого исследуемого i -того элемента ГЛШС по требуемому критерию прочности структуры их материала.

В основу построения модели отказа любого i -того низконадежного узла трения главного привода исследуемой клетки ШС при прокатке в ней j -тых партий полос, положим условие износостойкости, записанное в виде единого неравенства: $y_{ij} \leq y_{i*}$. Здесь y_{ij} - текущий максимальный износ исследуемого трибосопрежения, определяемый для стационарных условий трения и усталостного изнашивания [13, 15]; y_{i*} - предельное значение износа узла, установленное в нормативной документации.

В этом случае для расчета предполагаемого ресурса t_{pi} какого-либо i -того сопряжения сформулируем модель его отказа по критерию износостойкости, которая включает [13, 15]:

$$\left. \begin{aligned} & - \text{систему определяющих уравнений для последовательного расчета:} \\ & \quad - \text{скорости изнашивания } i\text{-того сопряжения при прокатке } j\text{-той партии} \\ & \quad \quad \text{полос последовательно для } j = 1, 2, 3, \dots: \\ & \quad \quad \dot{y}_{ij} = \frac{\alpha_i^* \cdot v_i \cdot f_{\text{мех } ij}^y \cdot p_{ij} \cdot V_{\text{ски}}}{\Delta H_{Si} - u_{ei0} - u_{Tij}}; \\ & \quad - \text{текущего износа сопряжения:} \quad y_{ij} = (\sum \dot{y}_{ij} \cdot t_j); \\ & \quad - \text{ресурса } i\text{-того элемента: } t_{pi}^H = k_{\Pi i} \cdot \left[(\sum t_{j-1}) + \frac{y_{ij} - y_{ij-1}}{\dot{y}_{ij}} \right], \\ & \quad \quad \text{при } y_{ij} \geq y_{i*}, \quad j = j^*, \quad \text{конец расчета;} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

- представленные ниже математические выражения для расчета входящих в систему (11) параметров, определяющих краевые условия исследуемого сопряжения при его изнашивании в стационарных условиях трения.

Параметры, входящие в первое и второе уравнения системы (11) [11, 13, 15].

$\dot{y}_{ij}$ - скорость изнашивания, исследуемого i -того сопряжения при прокатке j -той партий полос, которую для сокращения объема статьи будем определять как скорость изнашивания трибоэлемента из менее износостойкого материала.

y_{ij} - текущий суммарный износ сопряжения после прокатки партий полос от первой до j -той.

$\alpha_i^* = A_{ai} / A_{Ti}$ - коэффициент перекрытия площади трения A_{Ti} изнашиваемого трибоэлемента номинальной площадью контакта A_{ai} .

v_1 - коэффициент поглощения внешней энергии трения поверхностным слоем материала изнашиваемого элемента, определяемый по методике Б.В. Протасова [13, 15].

$f_{\text{мех } ij}^y$ - механическая составляющая коэффициента трения, определяемая согласно [13, 15] для установившегося процесса трения и усталостного изнашивания в

функции вида контакта, физико-механических характеристик материалов поверхностных слоев и параметров шероховатости поверхностей при температуре T_{ij} , вычисляемой по методике А.В. Чичинадзе.

p_{ij} - среднее (или максимальное) номинальное давление на контакте возникающее в сопряжении при прокатке j -той партий полос.

V_{cki} - скорость относительного скольжения элементов i -того сопряжения.

ΔH_{Si} - энтальпия плавления материала изнашиваемого элемента в жидком состоянии при температуре T_{Si} плавления;

u_{e0} - исходная плотность скрытой составляющей внутренней энергии материала поверхностного слоя изнашиваемого элемента, см. (10.а).

u_{Tij} - энтальпия материала изнашиваемого трибоэлемента при температуре T_{ij} установившегося режима трения, см. (10.б).

Параметры, входящие третье уравнение системы (11).

t_{pi}^H - расчетный ресурс исследуемого i -того низконадежного узла трения по причине достижения (или превышения) его текущим износом предельного значения:
 $y_{ij} \geq y_{i*}$.

j_H^* - номер партии полос, предшествующей предельной - ($j_H^* + 1$)-вой, в процессе прокатки которой произойдет отказ исследуемого узла по критерию износостойкости изнашиваемого трибоэлемента, см. (11).

Алгоритмизация математической модели (11) и зависимостей для определения входящих в нее параметров, определит методику аналитической оценки ресурса любого исследуемого i -того трибосопряжения ГЛШС по критерию его износостойкости.

Заключение

Обобщая полученные результаты можно заключить, что совокупность уравнений (9), (10), (11) и вспомогательных зависимостей позволяет:

- выполнить проектную оценку ресурса всех наименее работоспособных элементов главных приводов широкополосных станов и определить соответствующий им уровень эффективности функционирования исследуемого широкополосного стана;
- теоретически исследовать влияние различных конструктивных и технологических способов продления ресурса t_i малонадежных деталей и узлов на повышение производительности действующего ШС и выбирать из них оптимальные (по критерию максимальной эффективности функционирования) решения.

Библиографический список

1. Хазов Б.Ф., Дидусев Б.А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования.- М.: Машиностроение, 1986.- 224с.
2. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: Учебник. -М.: Логос, 2003.-208с.
3. Ченцов Н.А. Организация, управление и автоматизация ремонтной службы: Учебник.- / Под ред. д-ра техн. наук, проф. В.Я. Седуша, Донецкий национальный технический университет.- Донецк: Норд-Пресс-УНИТЕХ, 2007.- 258с.
4. Надежность в машиностроении: Справочник 1 / Н17 Под общ. ред. В.В. Шашкина, Г. П. Карзова.- СПб.: Политехника, 1992.- 719 с
5. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник. М.: Металлургия, 1986. 430с.
6. Прокатное производство: 3-е изд., перераб. и доп. /П.И. Полухин, Н.М. Федосов, А.А. Королев, Ю.М. Матвеев. М.: Металлургия, 1982. 686с.

7. Заверюха В.Н. Влияние изнашиваемости рабочих валков на производительность станов горячей прокатки // Известия вузов. Черная металлургия.-1976.- №9.-С. 99 - 101.
8. Заверюха В.Н. Формализация и классификация кинематических структур способов прокатки / В.Н. Заверюха, М.И. Румянцев, В.П. Анцупов // Известия вузов. Черная металлургия.-1983.- №5.-С. 148 - 149.
9. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Москва. Стандартинформ, 2016.- 22с.
10. Анцупов А.В. (мл.). Развитие теории прогнозирования надежности деталей машин / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №2. С.26-32.
11. 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. Том 60. №1. С.30-35.
12. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560с.
13. Оценка ресурса деталей и узлов металлургических машин на стадии их проектирования и эксплуатации: Учебное пособие. / А.В. Анцупов (мл), М.Г. Слободянский, В.П. Анцупов, А.В. Анцупов - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 211 с.
14. Федоров В.В. Основы эргономики и синергетики деформируемых тел / В.В. Федоров; под ред. С.В. Федорова. - Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО "КГТУ", 2014.- Ч.III. Основы эргономики деформируемых тел.- 222с.
15. Энерго-механическая концепция прогнозирования ресурса узлов трения по критерию износостойкости элементов / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, В.А. Русанов // Трение и износ. – 2016, Т. 37, №5, С. 510-516.
16. Выбор износостойких материалов при проектировании узлов трения / В.П. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов и др. // Материалы 67-й научно-технической конференции: сб. докл. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009.- Т.1.- С. 197-200.
17. Модель параметрических отказов валковых систем кварто по различным категориям / А.В. Анцупов (мл), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, А.М. Овсов // Производство проката. 2015. №2. С. 35-42.

Information about the paper in English

**A.V. Antsupov (Jr), A.V. Antsupov, V.P. Antsupov,
P.V. Makarova, Yu.S. Lyasheva**
Nosov Magnitogorsk State Technical University
Magnitogorsk, Russian Federation
E-mail: antsupov.vp@gmail.com
Received 01.06.2019

ANALYSING AND ENSURING THE EFFICIENCY OF THE MAIN COMPONENTS OF A WIDE-STRIP MILL

Abstract

This paper examines the system “rolling mill - strip” from the point of view of economic cybernetics and proposes an analytical technique for estimating the annual capacity of the main lines of a wide-strip mill as a function of its service life and the downtime caused by the least reliable components. For design estimation of the low-reliability parts’ service life, physico-mathematical models of the parametric failures of such parts were developed based on various criteria related to the strength and wear resistance of the materials in view. The proposed technique helps predict the components’ life and the corresponding capacities of the running wide-strip mills. It also enables to perform a theoretical study in order to understand how the life of the bottleneck components can be extended based on the maximum efficiency of the main drive.

Keywords: wide-strip mill, main line, unreliable components, predicting, life, capacity, increase, efficiency.
