

Белодеденко С. В. /д. т. н./, Яцуба А. В.,
Клименко Ю. М.
НМетАУ

Оценка технического состояния и прогнозирование живучести прокатных валков

Рассмотрен путь снижения расхода валков, связанный с применением к ним в полном объеме принципов обслуживания по техническому состоянию, а также сценарий потери работоспособности валков, связанный с постепенным ростом дисковой трещины при чередовании механизмов разрушения. Разработана последовательность изменения нормальных и касательных напряжений в опасных зонах валка за один его оборот. Установлено, что скорость развития кругового дефекта в поперечной плоскости прокатного валка определяется, главным образом, не уровнем нагрузки, а механизмом разрушения. Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: прокатный валок, долговечность, разрушение, усталость

Ways for reduction of roll consumption connected with application to them service principles according to technical condition as well as case of rolls performance loop, connected with gradual increase of disk crack during cycling of fracture mechanisms, are considered. There developed a sequence of changing of normal and shear stress at rolls hazard zone per one its revolution. It has been established that the rate of development of circular defect in transverse plane of forming roll is mainly determined not by the level of load, but by the fracture mechanism.

Keywords: forming roll, longevity, fracture, fatigue

Техническое состояние валков в значительной мере обуславливают экономические показатели прокатного производства. Их ухудшение связано или с ростом расхода валков, или с увеличением их стоимости, которое направлено в итоге на сдерживание этого расхода. Кроме того, низкая стойкость (долговечность) валков ведет к увеличению простоев и снижению производительности, что также негативно отражается на экономике.

Проблема сочетания стоимости и долговечности валков решается путем нахождения минимума функции удельных расходов на их содержание и ремонт, что соответствует оптимальному сроку службы. Для решения такой проблемы следует организовать сбор значительного массива информации, что несвойственно для обслуживающего персонала (по крайней мере, при планово-предупредительной системе ремонтов). На производстве не склонны усложнять задачу, поэтому устанавливаются расходные коэффициенты для валков. Это осуществляется математико-статистическими методами на основе годового количества фактически израсходованных валков. Такой подход, с одной стороны, не дает полной информации о реальном ресурсе валка, поскольку, фактически, он снимается с эксплуатации на основании норматива, хотя при этом может контролироваться его износ. С другой стороны, для обоснованных решений по техническому обслужи-

ванию нужна представительная статистическая выборка, которую возможно получить только для относительно недорогих валков и бракуемых по сравнительно некритичным отказам. В иных ситуациях целесообразно применять вероятностно-физические ресурсные методы, аналогичные методам, используемым для обоснования прочности валков.

Масса отдельных валков составляет несколько десятков тонн, а их стоимость – несколько сотен тысяч (иногда более миллиона) евро. Вследствие наличия парка валков, ущерб от аварийного отказа соизмерим с дополнительным расходом, обусловленным преждевременной (до исчерпания технического ресурса) утилизацией валка. При увеличении стоимости валков и сохранении затрат на их восстановление, доля последних в стоимости основных средств уменьшается. Это увеличивает оптимальный срок службы валка, приходящийся на минимум расходов, связанных с его содержанием. Менеджмент большинства металлургических предприятий ставит в качестве одной из актуальных задач снижение расхода валков, что достигается различными путями. Один из них заключается в применении к валкам в полном объеме принципов обслуживания по техническому состоянию, которые характеризуются широким использованием методов технического диагностирования. Данное направление актуально для крупногабаритных прокатных валков, позволяя путем

оценки остаточного ресурса и надежности снизить их расход [1, 2].

Чтобы иметь такую возможность при эксплуатации, на стадиях проектирования и изготовления следует подготовить соответствующую информационную базу о свойствах валка и его исходном ресурсе. Это требует более детальной разработки моделей деградационных процессов, нежели это делается при расчете запасов прочности. В методологическом аспекте надежности валок обладает признаками сложной технической системы, поскольку на него воздействует ряд повреждающих процессов. При этом не каждый из них ведет непосредственно к утере работоспособности, но любой из них приводит к неисправному состоянию валка, при котором ухудшается качество проката.

Работоспособность валка связана с объемными явлениями: его полным разрушением или отслаиванием крупных массивов металла вследствие глубинной усталости. Их опасность усугубляется отсутствием визуальных диагностических признаков. Поверхностные же явления (контактно-износные, термические) успешно, хотя и хлопотно, диагностируются при эксплуатации. Используя понятия технической диагностики можно считать, что исправность валка поддерживается обслуживанием по техническому состоянию. Однако в целом, валки эксплуатируются до нормативного ресурса (достижение минимального диаметра вследствие износа и перешлифовок для восстановления геометрии). Таким образом, стратегия технического обслуживания и ремонта валков не соответствует стратегии их использования. Это объясняется сложностью распознавания работоспособных состояний и очевидностью диагностирования исправных состояний.

На экономике производства негативно отражается не только высокий расход валков, но и их неплановый выход из строя в процессе эксплуатации. Анализ отказов, проведенный по

четырем непрерывным листопрокатным станам, показал, что примерно треть аварий, происходящих на рабочих клетях и главных линиях, обусловлена разрушениями валков (табл. 1). В сортопрокатных станах иногда валок является слабым звеном главной линии, определяя ее «лимит безаварийной работы» [3].

Цель работы

Построение диагностического алгоритма оценки технического состояния прокатных валков и прогнозирование их остаточного ресурса. Его использование предполагает увеличение степени выработки ресурса валка, как за счет контроля фактического повреждения в отдельно взятой клетке, так и путем оптимизации маршрута перестановки валков по клетям непрерывного стана.

Метод риск-анализа для количественной оценки технического состояния валков

В общем случае моноблочные валки подвергаются циклическим деформациям изгиба, кручения, поперечного сдвига, плющения (сжатия полого рабочего валка многовалковой клетки), что ведет к постепенному накоплению усталостных повреждений в теле (в объеме) валка. Среди повреждений рабочей поверхности доминирует, как правило, износ механического происхождения, а также вследствие окалинообразования. Взаимодействие валков между собой и с прокатом ведет к контактной усталости, которая проявляется в виде выкрашивания поверхности и отслаивания поверхностных слоев. При нарушениях смазочного режима на поверхности валков могут появляться пленки, которые в чистовых клетях снижают качество проката, а также являются источниками разрушений. В результате отклонений от регламентного смазочно-охлаждающего режима на поверхности появляются трещины термоусталости. Указанные процессы ведут к отказам постепенного типа. Отказы внезапного типа вследствие механических и тепловых перегрузок (термошок)

Таблица 1*

Аварийные отказы непрерывных листопрокатных станом, связанные с валками

Стан	Время наблюдения, мес.	Узлы				
		Главные линии и рабочие клетки с валками		Валки в комплекте	Рабочие валки	Опорные валки
		Всего ремонтных воздействий	Из них аварии			
2000	24	69/100 %	10/14 %	-	2/20 %	1/10 %
1680	54	367/100 %	74/20 %	-	25/34 %	1/1 %;
1700	12	-	51'	16/31 %	2/4 %	1/2 %
2500	120	-	51"	8/16 %	3/6 %	1/2 %

Примечание. * – Данные для анализа предоставлены д. т. н. Вереневым В. В.; ' – включая факты застревания полосы в валках; " – вошли только отказы, вследствие разрушения детали. В знаменателе дано относительное число аварийных отказов.

обычно объясняются нарушениями правил технологического регламента.

По интенсивности накопления повреждений выделяются несколько мест валка. Помимо рабочей части (бочка листопркатного валка, калибры сортопркатного валка), опасными местами моноблочного валка являются галтель между бочкой и шейкой, шейка под подшипниками, а также хвостовик для приводных валков. Если не конкретизировать тип стана и рабочей клетки, можно считать, что валок подвергается воздействию более десяти типов повреждающих процессов, локализующихся в разной мере по четырем опасным зонам. Следовательно, потеря работоспособности и исправности валка обусловлена полидеградационным процессом, ведущим к многоочаговому повреждению. Для таких объектов целесообразно применять многомерные модели отказов. Несмотря на это, на практике техническое состояние валков оценивается по принципу слабого звена, как для простой технической системы. Такой подход правомерен, если подавляющее число отказов сопряжено с действием одного повреждающего процесса в определенном месте. Но для оценки работоспособности валков, учитывая их регулярные переточки (перешлифовки), удаляющие повреждения от поверхностных явлений, принцип слабого звена малоперспективен, поскольку не очевиден «лидер» среди конкурирующих деградационных процессов и зон.

В данной ситуации для оценки технического состояния можно применять показатели надежности, в частности, вероятность безотказной работы (ВБР) P для систем. Она определяется по правилу произведения частных ВБР P_{ij} : $P = \prod P_{ij}$, где i – номер повреждающего процесса, j – номер опасной зоны. Известен недостаток этого правила, заключающийся в неподтвержденном экспериментально чрезмерном снижении величины P при увеличении количества элементов системы i и j . Различные модификации этого правила не лишают его этого недостатка. Невозможность корректного определения общей ВБР системы по частным ВБР ее системы побуждает оценивать надежность объекта в целом, не разделяя его на элементы [4]. Это возвращает исследователя на позиции математико-статистических методов.

Оценка ресурсных показателей всей технической системы по частным показателям составляющих ее элементов возможна на основе применения вероятностно-физических моделей совместно с концепцией допустимого риска. Тогда общий риск эксплуатации определяется путем суммирования частных рисков: $\rho_{\Sigma} = \sum \rho_{ij}$. В свою очередь, частный риск ρ_{ij} от i -го процес-

са для j -го места оценивается через повреждение d_{ij} . Если известен прогноз гарантированно го числа оборотов валка до отказа n_{op} (которое учитывает стохастичность процесса нагружения и статистическую природу сопротивления материала) и принять соответствующее ему повреждение за единицу, то текущее значение d_{ij} будет характеризовать степень выработки ресурса $r_{ij} = d_{ij}$. Это дает право использовать линейное суммирование повреждений, а в качестве диагностического параметра удобно принять наработку валка n_{Σ} в количестве его оборотов. Изменение фактического режима и условий нагружения по сравнению с прогнозными отражается в пошаговой корректировке величины n_{op} [5-7]. Не прибегая к прямой оценке ущерба от отказа валка, текущий риск рассчитывается как $\rho_{ij} = U_{ij} \times d_{ij}$, где $U_{ij} < 1$ – значимость отказа. Если для всех видов повреждающих процессов принять $U_{ij} = 1$, то правило суммирования рисков превращается в правило суммирования повреждений, которое ведет к излишне пессимистичной оценке технического состояния и остаточного ресурса.

Оценивать техническое состояние, контролируя непосредственно риск ρ_{Σ} , оказалось неудобно, так как этот показатель малочувствителен к наработке (как, впрочем, и ВБР). Этого недостатка лишен такой показатель технического состояния, как индекс безопасности β , представляющий логарифм гарантированного запаса долговечности и связанный с текущим повреждением: $\beta_{ij} = \lg(1/d_{ij})$ [7]. Общий индекс безопасности валка по правилу суммирования рисков определится как

$$\beta_{\Sigma} = \lg(\sum U_{ij} \times 10^{-\beta_{ij}})^{-1}.$$

Его текущее значение реагирует на наработку, предельно допустимое значение равно нулю, а остаточный ресурс весьма просто определяется по текущему индексу безопасности: $n_r = 10^{\beta_{\Sigma}}$. Таким образом, разработка ресурсных моделей является основой для алгоритмов диагностирования технического состояния валка.

Ресурсные модели и механизмы разрушения валков

Наиболее распространены ресурсные модели, построенные на исследованиях износостойкости валков. Для этого математико-статистическими методами получают апостериорные модели срока службы валков, которые применимы для прогнозирования ресурса валков только стана, являвшегося объектом исследований [8]. Имеется потребность в априорных моделях работоспособности, основанных на вероятностно-физических методах надежности. Этим требованиям во многом отвеча-

ет диагностический алгоритм, основанный на вероятностно-кинетической модели роста радиального износа валка. С его помощью решаются вопросы планирования парка листопрокатных валков, увеличения их межремонтного периода и максимально возможного ресурса для требуемой ВБР [9].

Достаточно подробно проработаны методики аналитической и численной оценки напряженно-деформированного состояния металла в объеме валка, результаты которых используются как для обеспечения конструкционной прочности, так и для определения циклической долговечности [3]. При этом используются основные принципы расчета деталей машин на многоцикловую усталость. Если при расчете напряженно-деформированного состояния, наряду с механическими нагрузками, учитывается воздействие тепловых полей и остаточных напряжений, то тогда переходят обычно к деформационным критериям малоциклового усталости. Подобные расчеты дают возможность прогнозировать долговечность до появления трещины.

Вместе с этим, ресурс многих валков, как до неисправного состояния, так и до потери ими работоспособности, во многом определяется периодом развития в них микротрещины. Она может появиться как трещиноподобный дефект в готовом валке при его производстве. Средства диагностического контроля валка не могут обнаружить все возможные дефекты. Важно, чтобы они не получили развития в процессе эксплуатации. Поэтому для валков стали актуальными модели механики разрушения, связывающие предельный размер дефекта с его местоположением и усилием прокатки. Подобные модели начали использовать с 70-х годов для спроектированного листопрокатного стана 5000. Силовые критерии хрупкого разрушения в настоящее время широко используются для обоснования работоспособности валков. Кроме этого получили развитие методы прогнозирования живучести валка, где рассматривается период развития поперечной дисковой трещины. В указанных моделях поведение валков контролируется коэффициентом интенсивности напряжений (КИН) для *I* моды разрушения в виде нормального отрыва.

Изучая природу отказов валков, специалисты пришли к выводу, что существенную роль в проблеме стойкости играют процессы взаимодействия рабочих валков с металлом и опорными валками. При этом в зоне контакта, наряду с областью сцепления, имеется область скольжения, в которой происходят фреттинг-процессы, где начало и распространение разрушения про-

исходит по *II* моде (поперечный сдвиг). Установлено, что пороговое значение КИН для сталей $\Delta K_{III} = 3 \div 6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$, что в 1,5÷3 раза меньше, чем пороговое значение КИН для *I* моды разрушения (нормальный отрыв). При контакте валков между собой в их подповерхностных слоях появляются знакопеременные касательные (реверсные) напряжения, составляющие сотни МПа. Поскольку эти напряжения в пределах площадки контакта поверхности изменяются циклически, то для инициирования разрушения достаточно иметь несплошность в сотые доли миллиметра или несколько структурных единиц материала. Для таких крупногабаритных деталей как валки прокатных станов это значит, что разрушение начинается, практически, от начала эксплуатации. Реверсные напряжения отвечают за появление внутренних трещин, которые ведут к отслаиванию массивов металла валков (spalling), распространенному виду отказов валков чистовых клетей. Наличие тангенциальных сил трения в площадках контакта ведет к тому, что касательные напряжения с глубины выходят на поверхность. Особенно это ярко проявляется при нарушении процесса прокатки в виде складывания полосы (cobble). В результате появляются стреловидные трещины, уходящие с поверхности под наклоном вглубь тела валка. Трещины *II* моды, возникающие в результате контактной усталости, не могут привести к разрушению валка, так как при их росте КИН снижается. Это же относится и к трещинам термоусталости. На некоторых металлургических предприятиях наличие поверхностных трещин не является браковочным признаком. Для дальнейшего развития таких трещин нужны дополнительные условия с новыми механизмами разрушения. Например, выкрашивание валков (pitting) связано с развитием стреловидной трещины по *I* моде из-за ее гидрорасклинивания со стороны смазывающе-охлаждающей жидкости, которой орошают валки. В конкретных условиях деформирования реальной детали возможны различные сценарии чередования механизмов разрушения, благодаря которым образуется последующая стадия ресурса. Выявлению механизмов окончательного разрушения валка после развития в нем дефектов от поверхностных явлений посвящена данная работа.

Таким образом, раннее трещинообразование делает целесообразным построение диагностических моделей валков на основе методов механики разрушения. Имеются несколько источников, инициирующих появление макротрещины в валках.

1. Неметаллические включения размером от 10 до 60 микрон в приповерхностных слоях полу-

чают возможность развития вследствие касательных напряжений от переменного контактного взаимодействия. Исследования, проведенные средствами микрокомпьютерной томографии, показали, что в подшипниковых сталях при контактной усталости в условиях качения трещина от исходного дефекта начинает расти не позднее 10 000 циклов нагружения, хотя долговечность до разрушения составляет в таком режиме более 1000 000 циклов. При питтинге валков смена механизмов разрушения происходит в такой последовательности: II → I → I + II. При спеллинге валков механизмы разрушения чередуются в следующей последовательности: II → I → I + II → II → I. Начальная фаза повреждений валков в обоих случаях одинакова. Однако дальнейшая траектория трещины зависит от соотношения действующих КИН по первой K_I и второй K_{II} модам. Она может пойти из глубины к поверхности, и тогда появляется неглубокий кратер; или при высоких контактных давлениях она может расти на глубине параллельно образующей валка, пока не получит условий для выхода на поверхность, и тогда отслаивается крупный массив валка.

2. Чрезмерные локальные деформации в поверхностных слоях вследствие ратчетинга (ratcheting – накопление остаточных деформаций) под действием кольцевых напряжений термического и (или) фрикционного происхождения ведут к микроразрывам поверхности. Эксперименты по сопротивлению термоусталости, имитирующие температурный режим в валках горячей прокатки из высокохромистого чугуна, показали, что термотрещины в них появляются уже после 500 циклов теплосмен (фактически, оборотов валка). Аналогичные результаты приведены в исследованиях [10], где расчетом на малоцикловую усталость обосновано, что высокотемпературные трещины глубиной 0,5 мм в валках клетей непрерывного широкополосного стана образуются после 100-200 циклов.

3. В свободных от контакта зонах валка (шейки) могут возникать дефекты поверхности коррозионной и гидроабразивной природы от воздействия охлаждающей жидкости. Выходящие при этом на поверхность валка сульфиды существенно снижают его усталостную прочность.

Таким образом, ресурс валка можно определять как сумму периодов развития трещины (живучести) под действием сменяющихся друг друга механизмов разрушения (чистых или смешанных).

Особенности напряженного состояния валка

Однако II мода разрушения для валков не ограничивается только зонами контакта. Ее присутствие обусловлено тем, что валок пред-

ставляет собой короткую балку, работающую в условиях поперечного изгиба. От поперечных сил появляются касательные напряжения, которые в инженерной практике можно оценить по напряжению среза $\tau_{sh} = P/2A$, где P – усилие прокатки, A – площадь поперечного сечения. Для валка, нагруженного по классической схеме (рис. 1), соотношения между касательными напряжениями от момента прокатки τ_{tr} и нормальными напряжениями изгиба σ выглядят так: $\tau_{sh} / \sigma = 1/8\gamma_{lb}$, $\tau_{sh} / \tau_{tr} = 1/8\gamma_{lh}$, где $\gamma_{lb} = L/D$, $\gamma_{lh} = h/D$ – соответственно, коэффициенты плеча при изгибе и кручении. Для обычных валов величина $\gamma_{lh} > 1$ и величиной τ_{sh} можно пренебречь. Для фрикционных передач, как и для прокатных валков, величина $\gamma_{lh} \ll 1$, и тогда величины рассматриваемых напряжений становятся сопоставимы. Поскольку при расчете прокатных валков по запасам прочности учитывается напряжение τ_{tr} , то нет основания не учитывать напряжения τ_{sh} . Тем более, что напряжения кручения изменяются периодически в зависимости от выхода металла из валков, а частота изменения напряжений τ_{sh} относительно дефекта, как внутри, так и на поверхности стержня, соответствует частоте оборота валков (рис. 2а). Это относится не только к бочке валка, где активны поверхностные деградационные процессы.

В шейках валков нормальные напряжения, как правило, несущественны и с помощью традиционно используемой модели прочности валков в виде сопротивления совместному изгибу и кручению сложно объяснить разрушения в этих

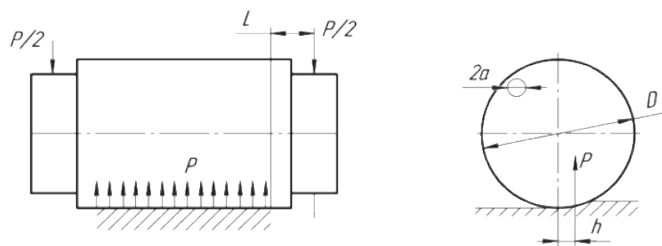


Рис. 1. Схема нагружения листопрокатного валка и расположения сферического дефекта в приповерхностном слое

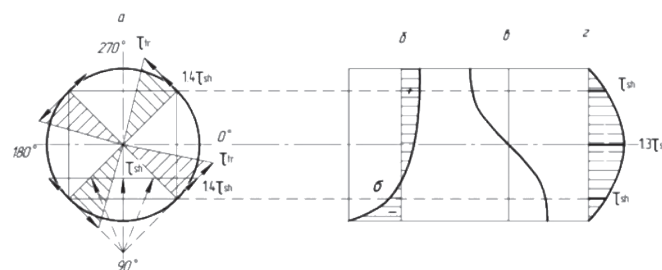


Рис. 2. Распределение касательных (а, г) и нормальных (б) напряжений, искривление сечений (в) в поперечном (а) и продольном сечении (б, в, г) валка при поперечном изгибе

зонах. Но именно состояние шеек во многом определяет полный ресурс валка до его списания, поскольку их сложно восстанавливать при ремонтах, а трещиноподобные дефекты здесь, как уже говорилось, имеют место. Все это свидетельствует об актуальности исследований, посвященных вкладу II моды разрушения в реализацию ресурса валков.

Кроме этого, стремление технологов улучшить плоскостность проката путем увеличения жесткости клетки побуждает использовать в опорах валков многорядные подшипники, зазоры в которых выбираются при относительно малых усилиях прокатки и дальнейшее деформирование валка происходит по принципу заземленной балки. Хотя в инженерной практике обычно валок представляют как шарнирно закрепленную балку. В результате, под подшипниками валок подвергается дополнительному усталостному процессу от нагружения изгибом с вращением, амплитуда которого равна изгибающему моменту в бочке валка. Поскольку диаметр шеек меньше, чем бочек, то напряжения и повреждения здесь выше.

Определение скорости развития дефекта и периода живучести

Металл валков находится в условиях сложного напряженного состояния, для которого обычно устанавливается эквивалентный критерий предельного состояния. Для крупных сечений такие модели не всегда достоверны. Более эффективным сейчас признается локально-деформационный подход, предполагающий, что элементарный объем металла (дефект) последовательно подвергается различным типам деформаций, в результате чего образуется комбинированная (смешанная) история нагружения. В этом аспекте разработаны истории изменения напряжений за оборот валка в зонах, где контактные и остаточные напряжения уже не оказывают существенного влияния (рис. 3).

Для рабочих валков клетей кварто напряжения изгиба и среза определяются по усилиям системы противоизгиба, а для опорных валков

напряжения кручения определяются моментом холостого хода.

Проинтегрировав уравнение среднего участка диаграммы усталостного разрушения, получают зависимость между периодом роста трещины N и действующими номинальными напряжениями σ или τ . В качестве параметра здесь выступает диапазон между начальным и конечным размером трещины. По аналогии с кривой усталости, такую $\sigma(\tau)$ - N диаграмму можно назвать кривой живучести. Получив кривые живучести для каждой моды разрушения, можно рассчитывать итоговую долговечность для смешанного нестационарного процесса, суммируя относительные долговечности.

В аналитическом виде указанное интегрирование можно осуществить, если тарировочная поправка к КИН не зависит от глубины трещины. В данном случае – это круговая трещина, которая применительно к валкам принята для модели предельно допустимого дефекта. Для валковых материалов разработана схематизированная диаграмма усталостного разрушения для различных мод. Приняв пороговое значение КИН для второй моды $\Delta K_{lim} = 4 \text{ МПа} \times m^{0.5}$, используя полученную модель, определяют остальные параметры диаграмм. Найденные по принятому алгоритму кривые живучести подчиняются степенному уравнению $t^m \times N = const$ с показателем наклона $m = 2$. Тогда для блока напряжений с параметрами ступеней τ_{shi} и C_i (относительная длительность) по формуле $\tau_{she} = \sqrt{\sum C_i \times \tau_{shi}^2}$ определяется его эквивалентное значение, после чего можно найти эквивалентные скорости роста трещины (табл. 2).

Равенство показателя степени уравнения кривой живучести $m = 2$ однозначно следует из принятых моделей сопротивления разрушению. Это обуславливает довольно крутой наклон кривых живучести, говорящий об относительно слабом влиянии напряжений на период роста трещин.

Разработанный диагностический алгоритм включает расчет начальных радиусов дефекта

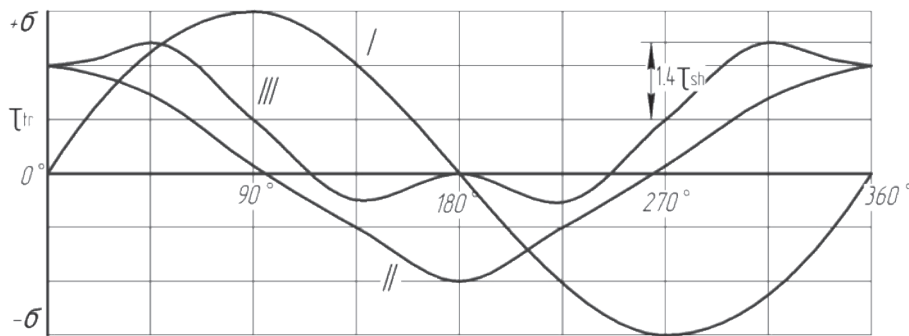


Рис. 3. Изменение напряжений при смешанном нагружении валка для I, II, III мод разрушения

a_{0II} , a_{0IV} , a_{0III} для каждой моды. Критические значения радиуса a_c в данном расчете установлены не по критериям механики разрушения, а из возможностей диагностирования – 100-кратное увеличение исходного дефекта обычно обнаруживается и валок бракуется.

Таблица 2

Определение скоростей развития кругового дефекта для зоны валка, где $\gamma_{ib} = 0,25$, при $\gamma_{ib} = 0,0025$ и $a_{cII}/a_{0II} = 100$

τ_{she} , МПа	a_{0IV} , мм	a_{0III} , мм	$N_{II} \times 10^{-7}$, об.	$N_{\Sigma 2} \times 10^{-7}$, об.	$v_{II} \times 10^{10}$, м/об.	$v_{\Sigma 2} \times 10^8$, м/об.
5	40	148	38,5	30,4	2,8	1,0
10	10	37,0	9,6	7,6	2,8	1,27
15	4,5	16,7	4,1	1,9	2,98	2,2
20	2,5	9,2	2,4	1,9	2,8	1,27
25	1,6	6,0	1,5	1,2	2,85	1,28
30	1,1	4,1	1,1	0,9	2,8	1,25
35	0,8	3,0	0,8	0,6	2,8	1,2

Также по кривым живучести определяется число циклов N_{II} для 1-го периода разрушения, когда дефект увеличивается только за счет II моды, и число циклов $N_{\Sigma 2}$ для 2-го периода, когда на него воздействует смешанное нагружение по II и III модам. На этих периодах разные скорости роста v_{II} и $v_{\Sigma 2}$, но их значение, как следует из результатов, практически, не зависит от уровня касательных напряжений. На 1-м периоде можно принять $v_{II} = 2,8 \times 10^{-10}$ м/цикл, а на 2-м периоде $v_{\Sigma 2} = 1,25 \times 10^{-8}$ м/цикл. Этот вывод имеет важное практическое значение. В рабочих клетях непрерывного листопрокатного стана (НТЛС) обычно валки черновых клетей вращаются с низкой частотой, но воспринимают усилия прокатки большие, чем валки чистовых клетей, которые вращаются с высокой частотой. Возникает вопрос, в каких клетях валки повреждаются интенсивнее. В рассмотренном случае наработка валка (общее число оборотов) является достаточным прямым диагностическим параметром для оценки его технического состояния.

Частота вращения валков НТЛС находится в диапазоне от 20 до 500 мин⁻¹. Для значения $\tau_{she} = 20$ МПа, которое образуется в шейках опорного валка черновой клетки НТЛС 2000 при усилии прокатки 30 МН (прокатка «тяжелого» сортамента) по полученным данным (табл. 2), остаточные сроки службы составляют от 1433 до 35833 часов. При $\tau_{she} = 10$ МПа (усилие прокатки 16 МН – рядовой сортамент) сроки службы опорного валка находятся в промежутке от 5740 до 143500 часов. Отношение минимальной долговечности к максимальной составляет 1:100. Причем вклад вариации загрузки в это рассеяние незначителен – 1:4. Основная часть рассеяния обусловлена вариацией частоты вращения.

Это подтверждает актуальность постановочной задачи о необходимости оценки поврежденности парка валков и рациональном маршруте их перестановки по клетям.

Выводы

1. Техническое состояние прокатных валков оказывает влияние на экономику производства, как за счет влияния на качество (брак) проката, так и через затраты на их техническое обслуживание. Также дополнительные утраты сопряжены с внеплановыми простоями от аварийных отказов. В главных линиях рабочих клетей непрерывных широкополосных станков около трети аварий обусловлено узлами валков.

Улучшить ситуацию с расходом валков возможно путем применения к ним принципов обслуживания по техническому состоянию, где существенную роль играют диагностические количественные модели. Поскольку валки подвергаются комплексу деградационных процессов, приводящих к многоочаговым повреждениям, для количественной оценки их технического состояния целесообразно применять правило суммирования рисков, на котором основано вычисление общего индекса безопасности по частным индексам безопасности для деградационных процессов в опасных зонах валка. Данные показатели технического состояния получают на основе ресурсных вероятностно-физических моделей, учитывающих природу отказа, что не требует наличия представительной статистической выборки, формируемой фактами эксплуатационных разрушений валков.

2. В прокатных валках микротрещины от технологических дефектов или эксплуатационных повреждений начинают расти, практически, от начала эксплуатации. Установив последовательность сменяемости механизмов разрушения для соответствующего вида отказа, число оборотов валка до него можно рассматривать как сумму периодов живучести. Рассмотрен сценарий потери работоспособности валков, связанный с постепенным ростом дисковой трещины при чередовании механизмов разрушения по формуле $II \rightarrow I + III \rightarrow II + III + I$. Для нее разработана история изменения касательных и нормальных напряжений в объеме валка от силовых параметров прокатки.

3. В данной статье разработан алгоритм определения ресурса для заключительных периодов живучести, когда трещина «уходит» из зоны влияния контактных и/или термических напряжений и уже не может увеличиваться под их действием. Впервые обращено внимание на цикличность изменения напряжений среза от усилия прокатки относительно поперечной круго-

вой трещины, что приводит к возникновению механизма разрушения II моды. В этих условиях скорость роста дефекта, практически, не зависит от его расположения внутри валка. В отличие от традиционно учитываемых механизмов разрушения по I и III модам, данный механизм может служить причиной развития дефектов, находящихся не у поверхности, а вблизи оси валка.

4. Скорость развития кругового дефекта в поперечной плоскости прокатного валка определяется, главным образом, не уровнем нагрузки, а механизмом разрушения. Силовые параметры прокатки, наравне с характеристиками трещиностойкости металла валков, обуславливают период живучести, на котором действует соответствующий механизм (механизмы) разрушения. Тем самым они влияют на долговечность валка.

5. В непрерывных полосовых станах валки вращаются с разной частотой, которая увеличивается от черновых клетей к чистовым. Валки в клетях, имея одинаковые номинальные размеры, настраиваются на восприятие усилий прокатки одного порядка. Но поскольку влияние этого фактора на скорость роста трещины невелико, период живучести, выраженный через время эксплуатации валков, будет меньше в чистовых клетях, чем черновых. В них же валки интенсивнее «приобретают» поверхностные трещины от экстремальных условий эксплуатации. Поэтому очень важно полностью их удалять в процессе восстановления. Полученные в черновых клетях и не убранные во время перешлифовки повреждения валков интенсивнее будут развиваться, если их установить после этого в чистовые клетки. Такой маршрут перестановки не является рациональным.

Библиографический список

1. Fatigue of backup rolls, length of campaign dressing amount / D. Hajduk, P. Simecek, M. A. Rabellato, G. T. Cornelio // Southern African roll users conf. (SARUC 2011). – Vanderbijparc, South Africa. – 2011. – P. 84-86.

2. Лебідь В. Вплив фретинг-процесу на працездатність великогабаритних складених деталей // Машинознавство. – 2003. – № 6. – С. 36-38.

3. Гусев А. С., Вафин Р. К., Мальцев А. А. Расчет усталостной долговечности конструкций с учетом снижения пределов выносливости // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 2004. – № 5. – С. 35-40.

4. Переверзев Е. С. Методы учета зависимости между элементами при расчете показателей надежности // Надійність машин та прогнозування їх ресурсу: Доповіді міжнар. наук.-техн. конф. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2000. – Т. 1. – С. 112-119.

5. Прогнозирование технического состояния и обеспечение безопасности при эксплуатации механических систем в металлургии / С. В. Белодеденко, В. И. Ганущ, С. В. Филипченков, А. В. Попов // Вибрации машин: измерение, снижение, защита. – 2011. – № 1. – С. 15-22.

6. Мониторинг состояния технологического оборудования и ресурсные подходы к диагностическим моделям / С. В. Белодеденко, В. Ю. Богдан, Е. И. Хребто, А. В. Ларионцев // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2007. – № 6. – С. 94-98.

7. Белодеденко С. В., Яцуба А. В. Диагностирование усталостных повреждений и прогнозирование остаточного ресурса технологического оборудования с соблюдением требуемой безопасности // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2013. – № 1. – С. 80-87.

8. Надежность и эффективность в технике: Т. 7.: Качество и надежность в производстве / Под. ред. И. В. Апполонова. – М.: Машиностроение. – 1989. – 280 с.

9. Анцупов А. В., Слободянский М. Г. Прогнозирование долговечности опорных валков и оценка эффективности способов продления их ресурса // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. – 2011. – № 3. – С. 74-79.

10. Investigation of thermomechanical behavior of work roll and roll life in hot strip rolling / C. G. Sun, C. S. Yun, J. S. Chung and S. M. Hwang // Metallurgical and materials transactions A. – 1998. – № 9. – P. 2407-2424.

Поступила 02.02.2015

Metallurgical and Mining
Industry

www.metaljournal.com.ua