

УДК 621.39.1

МНОГОФАКТОРНОСТЬ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ВАЛКОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

© В.В. Ветер

Россия, Липецк, ЛПТУ

Veter V.V. Multi-factor of physical processes in condition of multicycle surface deformation of shaft of rolling mill. The change of physical and mechanical properties of active layer of rolling mill is observed. The profilograms of wear, hardness, microhardness, thermo electromotive force and other characteristics were measured till destruction of active layer. It was established, that change of physical and mechanical properties has wave character. On the base of the obtained results new regulational method of exploitation of shaft of rolling mill was developed.

Прокатные валки являются дорогостоящим инструментом. Их поломка или частичное разрушение (выкрашивания, отслоения) приводят к неплановым остановкам стана, снижению его производительности и значительному увеличению межремонтных периодов. Правильно установленный регламент валка в значительной степени позволяет избежать аварийных ситуаций. Однако это довольно сложная задача, так как учет всех динамических воздействий в период его работы представляется проблематичным.

Нами снимались профилограммы износа и измерялись величины твердости, микротвердости, ТЭДС и др. на разных временных этапах эксплуатации валка до истощения ресурса активного слоя. На рис. 1 и 2 представлены профилограммы износа, графики изменения твердости и микротвердости по длине бочки и глубине рабочего слоя. Рассматривая профилограммы во времени, мы видим, что изменения физико-механических свойств и структурных элементов металла в продольном (по длине бочки) и поперечном (по глубине)

направлениях происходят неоднородно, причем они имеют явно волновую природу. По телу валка распространяются вязко-упругие возмущения, которые представляют собой распространение изменений целого ряда связанных между собой физических величин.

Продольная деформационная волна распространяется вдоль бочки валка до торцевой поверхности, отражается от нее и затухает на $1/15-1/10$ длины бочки валка. В месте наложения прямой и обратной волны возникает резонансный наклеп, и твердость этих зон на $15-20\%$ превышает твердость других участков.

Поперечная волна распространяется перпендикулярно продольной. Существенной особенностью поперечной волны является меньшая скорость распространения в сравнении с продольной и существенная анизотропия свойств по глубине слоя валка.

Скорость поперечной волны $V_1 = \sqrt{G/\rho}$, а скорость продольной волны будет в 2-3 раза больше и определяется как $V_n = \sqrt{E/\rho}$.

Распространение волн в металле под действием периодических нагрузок сопровождается изменением совокупности целого ряда величин: положением частиц среды (износ, выпучивание, деформация), плотности среды, энергоемкости (напряжение, твердость, пластичность) и т. д.

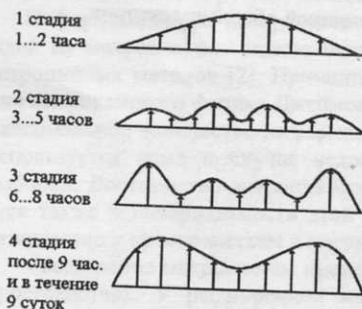
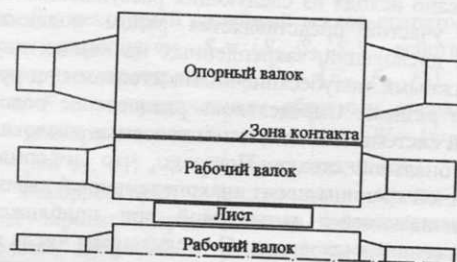


Рис. 1. Распределение напряжений и деформаций по длине бочки валка.

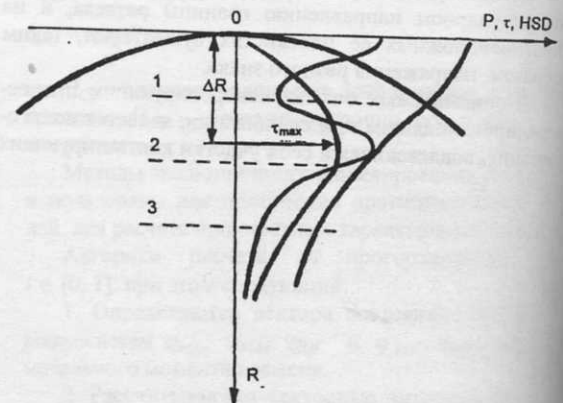


Рис. 2. Распределение контактных напряжений и твердости в поверхностных слоях валка.

Так как физические величины должны быть непрерывной функцией координат, то изменение величины в какой-либо точке должно вызывать изменение этой же величины в прилегающей области. Возмущение в момент времени τ в точках с различными координатами X — различно. Значит ρ — смещение или плотность, представляет функцию двух переменных — X и τ , т. е.

$$\begin{aligned}\rho &= \rho(X, \tau); \quad \tau = \tau - X/V \\ \rho &= (X, \tau) = \rho(\tau) = \rho(\tau - X/V).\end{aligned}\quad (1)$$

Зная закон $\rho(\tau)$ и заменив τ на $\tau - X/V$, мы получим изменение ρ в произвольной точке X .

$$\rho(X, \tau) = \rho_0 \sin(\omega\tau - KX), \quad (2)$$

где ω — амплитуда в начальной фазе ρ_0 , $K = \omega/v$ — волновое число.

Чтобы получить конкретные результаты состояния системы, надо также знать и внутреннюю энергию (энергоемкость) тела, определяющую его состояние.

Макроскопическое состояние системы описывается с помощью различных параметров: давление, плотность, температура, концентрация, объем, напряженность и т. д., которые в общем виде могут быть вычислены из уравнения состояния.

Непрерывное смещение нормальных и касательных напряжений в процессе эксплуатации приводит к тому, что в зонах, прилегающих к торцевым поверхностям, наблюдаются повышенные деформации и напряжения, что приводит к максимальному наклепу. Исследования показали, что уже в первом периоде эксплуатации опорных валков износ по длине бочки и уровень наклепа неравномерны. Процесс деформации, смещение материала по образующей бочки и его разрушение протекают одновременно с его структурно-химическими и фазовыми превращениями и носят колебательный характер. Устойчивым является процесс массопереноса за счет сдвиговых процессов и аномально высокой диффузии перераспределения легирующих элементов, флуктуации плотности и насыщения поверхности газами. Организация износостойкой структуры трения под воздействием внешних параметров происходит в первые 3–5 часов работы после установки валка в клет. При дальнейшем увеличении числа циклов (за 16 часов) интенсивность упрочнения и износа замедляется и экспоненциально приближается к предельно возможной. Макропрофиль образующей бочки валка за этот период претерпевает существенные изменения от выпуклого до гангельного, оставаясь последующие 9 суток эксплуатации практически неизменным. Этот профиль можно рассматривать как суперпозицию стоячих волн, причем выпуклые части профиля, расположенные на расстоянии 200–400 мм от торцов валка, имеют твердость на 15–20 % выше средней части впадины, где соответственно плотность снижена по сравнению с торцевой и центральной зоной валка. Зоны имеют и различный химсостав. Микро рельеф за период приработки претерпевает меньшие изменения. Пространственно-временная гетерогенность рельефа полностью не исчезает до конца процесса эксплуатации, однако происходит осаживание вершин и выпучивание впадин микро рельефа, в которые устремляются легирующие элементы, преимущественно хром и углерод, а из атмосферы кислород, азот и

водород, что понижает плотность и увеличивает микротвердость. Наблюдается изменение формы микро рельефов с их периодическими затуханиями и возникновением новых синусоидальных рельефов, при этом их количество на единицу длины остается практически постоянным и не меняет общей картины профиля. Возмущение и релаксация уравновешиваются, и энергетический баланс стабилизируется.

При исследовании твердости, микротвердости, плотности и напряженного состояния по глубине активного слоя опорного валка из стали 9ХФ были обнаружены существенные колебания их значений (рис. 3). Величины эти меняются по глубине (на расстояние до 8 мм) по затухающему закону, описываемому выражением

$$X = \exp(-n\tau) \text{Asin}(k\tau + \alpha). \quad (3)$$

Характер изменения средних значений межплоскостных расстояний по глубине наклепанного слоя и обусловленные этим колебания напряжений (микротвердости) и плотности свидетельствуют о формировании в процессе работы валка слоя, состоящего из чередующихся областей с различными механическими и физическими свойствами. Это, по-видимому, и есть проявление способности систем к самоорганизации в ходе неравновесных процессов при некотором значении внешнего потока энергии.

По распределению твердости, величины КТР, механическим свойствам различных зон по глубине валка, а также по исследованию точек фазовых превращений при нагреве и охлаждении, проводимых на образцах, вырезанных через 1 мм от поверхности



Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине валка.

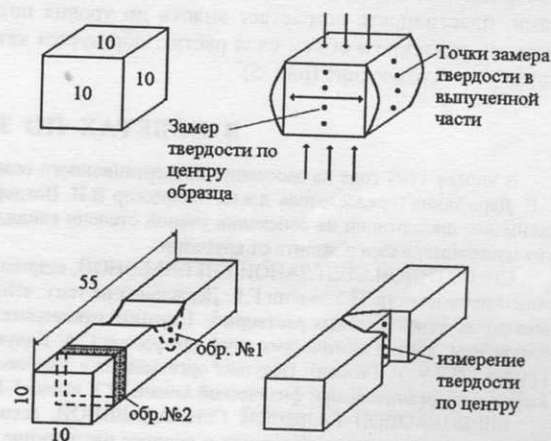


Рис. 4. Схема измерений твердости после многоцикловых ударных нагрузок.

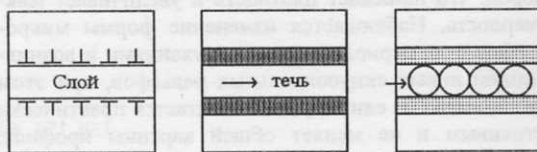


Рис. 5. Схема течения пластифицированного слоя.

валка, было определено, что деформации после завершения регламентируемого цикла работы вглубь валка распределены следующим образом:

1 – зона упругопластической деформации и разрыхления структуры;

2 – зона пластической деформации;

3 – зона упругопластической деформации;

4 – зона упругой деформации;

5 – зона исходного металла.

Для проверки этих положений были проведены исследования на образцах двух типов: $10 \times 10 \times 10$ мм, и $10 \times 10 \times 55$ мм с исходной твердостью 41–42 HRC.

Образцы подвергались наклепу с помощью молота весом 10 кг, высота падения – 250 мм, количество ударов – более 25. В месте ударов образовывалась вмятина, а боковая поверхность выпучивалась после 20-кратных нагружений (рис. 4). Замеры твердости и плотности показали, что в центральной зоне выпученного образца твердость снизилась до 10–20 HRC, а на периферийных участках осталась практически без изменений – 41–43 HRC. Плотность центральной выпуклой части образца, определяемая методом гидравлического взвешивания, составила $8,1003 \text{ г/см}^3$, а периферийных участков – $7,98637 \text{ г/см}^3$. Замеры твердости, произведенные через 1 мм по центру образца, показали нарастание твердости вглубь от поверхности – 41, 50, 47, 42, 41 HRC. Заметное повышение твердости наблюдали и на расстоянии 5 мм от поверхности у длинных образцов (55 мм). Плотность этих зон составила $7,8728 \text{ г/см}^3$. Это, по-видимому, подтверждает предположение, что распространение упругой деформации от ударной волны и ее отражение от торцевой поверхности приводит к наклепу металла, свободного от непосредственного контакта с внешней нагрузкой.

Таким образом, можно констатировать, что в период предразрушения у пластифицированного слоя, находящегося между устойчивыми твердыми прослойками, пластичность возрастает вплоть до уровня ползучести, давление и объем слоя растут, образуется катковая течь и отслоение (рис. 5).

Итак, в период приработки плотность (масса/объем) и внутренняя энергия в металле при циклических нагружениях пребывают в виде взаимно противоположных волн; напряжение и плотность имеют градиентные значения по очертанию волны, меняя их от точки к точке. Очертания волн, вызываемые изменениями перемещений внутренних и внешних течений, постоянно изменяются под действием внешнего возмущения. Металл при этом обменивается с внешней средой газами, меняя свой химический состав в соответствии с колебаниями плотности. Циклически нагружаемое тело колеблется по всей вертикали втянутого в работу участка взаимодействия, постепенно затухая в глубине, через множество чередующихся возбуждений и схлопываний. Эти процессы протекают согласованно и одновременно на разных структурных уровнях до наступления насыщения деформацией, когда происходит стабилизация внутренних резервов металла, противодействующих внешним воздействиям. Система как бы замораживается, наступает равновесие между энергетическими потоками извне и внутренними противодействиями. Образуется волновой каркас физико-механических свойств, и наступает период стабилизации.

На втором этапе эксплуатации из-за установившегося относительного равновесия между входящими и выходящими энергетическими потоками процессы замедляются на порядок. На этой стадии трудно провести классификацию медленно текущих процессов и определить противоположные и взаимодополняющие факторы, влияющие на прогрессирующую усталость и изменение внутреннего состояния. По чисто формальным причинам динамическую природу этой стадии можно рассматривать по ее энергетическим проявлениям на физическом уровне.

Условно внешние нагружения и внутренние противодействия можно представить как действие центробежных и центростремительных сил, первые из которых приводят к рассеиванию, расширению, рассредоточению, разделению и восходящей диффузии, а вторые – к сжатию, слиянию, поглощению, уплотнению и собирательной организации.

На стадии разрушения и катастрофического износа происходит распад установившегося относительного равновесия и преобладание центростремительных сил над центробежными. Происходят отслоения (разделения) и дальнейшая эксплуатация изделия невозможна.

На основании проведенных исследований был разработан новый регламентированный способ эксплуатации валков прокатных станков.

В СОВЕТАХ ПО ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИЙ

В апреле 1998 года на заседании диссертационного совета К113.49.04 при Тамбовском государственном университете имени Г.Р. Державина (председатель д.х.н., профессор В.И. Вигдорович, ученый секретарь к.х.н., доцент Т.В. Корнеева) успешно защищены две диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 15.07.14 – химическое сопротивление материалов и защита от коррозии.

СИНИУТИНОЙ СВЕТЛАНой ЕВГЕНЬЕВНОЙ, старшим преподавателем кафедры органической химии и основ безопасности жизнедеятельности ТГУ имени Г.Р. Державина на тему: «Ингибирование коррозии и наводороживания углеродистой стали в сероводородно-углекислотных растворах». Научный руководитель: доктор химических наук, профессор Л.Е. Цыганкова. Официальные оппоненты: доктор химических наук, профессор С.А. Калужина (ВГУ, г. Воронеж); кандидат химических наук, доцент Н.А. Абакумова (ТГТУ, г. Тамбов). Ведущая организация – Тамбовский государственный технический университет. Работа выполнена на кафедре неорганической и физической химии ТГУ имени Г.Р. Державина.

БЕРДНИКОВОЙ ГАЛИНОЙ ГЕННАДЬЕВНОЙ, ассистентом кафедры неорганической и физической химии ТГУ имени Г.Р. Державина на тему: «Коррозия и анодное растворение меди в кислых спиртовых средах». Научный руководитель: доктор химических наук, профессор Л.Е. Цыганкова. Официальные оппоненты: доктор химических наук, профессор А.В. Введенский (ВГУ, г. Воронеж); кандидат химических наук, доцент А.И. Рягузов (ТГУ имени Г.Р. Державина, г. Тамбов). Ведущая организация – Тамбовский научно-исследовательский химический институт. Работа выполнена по месту работы соискателя.