

**АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ИЗНОСА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ РУДОРАЗМОЛЬНЫХ
МЕЛЬНИЦ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ИХ СРОКА СЛУЖБЫ**

В промышленности широкое распространение находят крупногабаритные и крупномодульные зубчатые передачи. Например, шаровые мельницы, предназначенные для измельчения различных руд, угля и другого сырья, оборудуются открытыми зубчатыми передачами. Они также как и все открытые передачи работают в условиях ударно-циклических контактных нагрузок. Характерные причины снижения несущей способности определяется не только разупрочнением зуба у его основания, но и усталостным выкрашиванием контактной поверхности и износ профиля зуба. Ключевыми вопросами при проектировании зубчатых передач является выбор материала зубчатой передачи и способа его упрочнения. В статье проведен анализ видов изнашивания и поврежденности зубьев открытых зубчатых пар рудоразмольных мельниц. Выполнены экспериментальные исследования изнашивания и поврежденности зубьев открытых зубчатых передач рудоразмольных мельниц. Сопоставлением экспериментальных скоростей изнашивания с расчетными величинами, характеризующими геометрию и кинематику зацепления, получен параметр, учитывавший абразивное воздействие среды и физико-механические свойства материалов зубьев для данных условий эксперимента. Произведен критический анализ подходов для решения проблемы повышения надежности и долговечности открытых крупномодульных передач шаровых рудоразмольных мельниц. Определено влияния физико-механических свойств материалов зубчатых колес на интенсивность изнашивания в период приработки и установившегося равномерного износа контактных поверхностей зубьев, а также обоснованы возможности их производительной поверхностной плазменной закалки. Разработан способ плазменной поверхностной закалки зубьев шестерен большого модуля, при котором нагреву подвергают не только боковые поверхности зубьев, но и поверхностные слои материала, расположенные у впадин между зубьями.

Ключевые слова: открытые зубчатые передачи, абразивный износ, поверхностная плазменная закалка.

Проблемы и ее связь с научными и практическими задачами. Зубчатые передачи занимают ведущее место в механических системах (машинах и механизмах) и от их текущего технического состояния зависят безопасность производства и качество выпускаемой продукции. Они работают в условиях ударно-циклических контактных нагрузок, что вызывает высокие требования к несущей способности зубчатой передачи. Снижение несущей способности определяется такими причинами: разупрочнение зуба у его основания, усталостное выкрашивание контактной поверхности и износ профиля зуба. Открытые зубчатые передачи подвержены абразивному износу рабочих поверхностей зубьев при попадании на зубья пыли, грязи, которые играют роль абразивного материала. Анализ и оценка абразивного износа зубьев, производится в зависимости от характеристики абразивного воздействия физико-механических свойств материалов, геометрических и кинематических параметров сопряжений. Снижение интенсивности абразивного изнашивания, как на участке приработки кривой износа, так и на участке равномерного изнашивания, является актуальной проблемой.

Анализ исследований и публикаций. Абразивному изнашиванию, как наиболее распространенному виду посвящено ряд экспериментальных исследований, учитывающих специфику горных машин, в частности - рудоразмольных мельниц, занималось большое число исследователей из научно-исследовательских, проектно-конструкторских и высших учебных заведений Украины и мира.

Наибольший интерес представляют исследования направленные на установление общих закономерностей абразивного изнашивания. Ряд работ в этом направлении основаны на использовании методов теории подобия.

Большой интерес представляют исследования основанные на изучении механики абразивного зерна в зоне контакта зубьев (Гавриленко В.А., Ермичев В.А., Кашеев В.Н.). Данные работы в дальнейшем углублены Г.Я. Ямпольским, А.П. Натаровым, И.В. Крагельским и рядом иностранных ученых [1-6].

Анализ литературных данных по проблеме исследования свидетельствует о том, что существующие рекомендации по критериям предельных состояний высоконагруженных зубчатых передач противоречивы и не в полной мере учитывают взаимосвязь между характеристиками контактных повреждений зубьев и эксплуатационными свойствами передач, при комплексной

оценке факторов, влияющих на долговечность открытых зубчатых передач, в том числе, параметров упрочненных рабочих участков зубчатых колес.

Постановка задачи. Для повышения надежности приводов и трансмиссий актуальным является: разработка научно обоснованных и достоверных критериев оценки предельных состояний зубчатых передач; разработка методика оперативной оценки интенсивности изнашивания рабочих поверхностей зубьев; усовершенствование технологии их поверхностного упрочнения.

В связи с этим необходимо, применительно к крупномодульным передачам шаровых рудоразмольных мельниц, выяснить влияние физико-механических свойств материалов зубчатых колес на интенсивность изнашивания в период приработки и установившегося равномерного износа контактных поверхностей зубьев, а также обосновать возможность их производительной поверхностной плазменной закалки.

Изложение материалов и результаты. Изнашивание зубьев можно разбить на три периода: приработочный, установившийся и катастрофический.

Рассматривая величину износа зубьев во времени, в пределах каждого из периодов действительную зависимость замены линейной (рис. 1).

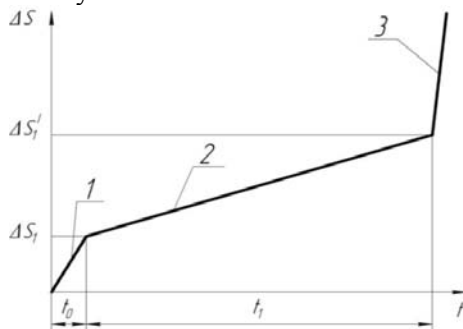


Рис. 1. Идеализированная кривая износа зубьев шестерни. ΔS_{10} , t_{10} – величина и продолжительность приработочного износа; $\Delta S'_1$ – допускаемая величина износа зубьев одной активной поверхностью; t_1 – продолжительность периода установившегося изнашивания

Интенсивность изнашивания и величина износа в приработочный период в открытых зубчатых передачах рудоразмольных мельниц в значительной степени определяется взаимными перекосами зубьев, приводящих к значительным концентрациям нагрузки по ширине зубчатого венца и является случайной величиной.

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что величины приработочных износов зубьев шестерни и венца в основном лежат в пределах $\Delta S_{10}=0,6 \div 1,5$ мм, $\Delta S_{10}=0,3 \div 0,6$ мм. Скорость приработочного изнашивания шестерни в среднем равна $V_{n1} \approx 5V_1$ (V_1 – скорость в период установившегося изнашивания шестерни), а его продолжительность $t_0 \approx \Delta S_{10}/5V_1$.

За срок службы шестерни наиболее продолжительным является установившейся период изнашивания. Начиная с величины износа зубьев шестерни $\Delta S'_1=3 \div 4$ мм начинается катастрофический период изнашивания. Скорость изнашивания в этот период примерно равна $V_{x1} \approx 25V_1$.

В связи с этим допускаемую величину износа зубьев шестерни целесообразно назначать $[\Delta S_1] \leq 8$ мм (по 4 мм с каждой активной поверхности зуба).

Опыт эксплуатации и экспериментальные исследования показывают, что долговечность зубчатого венца определяется не физическими его возможностями, а экономическими факторами. При определенной величине износа венца долговечность шестерен настолько снижается, что дальнейшая эксплуатация его нецелесообразна. На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость скорости изнашивания шестерен мельниц МБ-7000х2300 в условиях Ингулецкого ГОКа от усредненной величины износа зубьев венца.

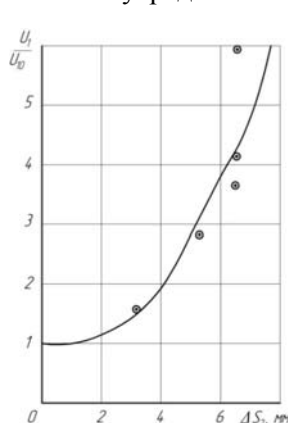


Рис. 2. Зависимость скорости изнашивания зубьев шестерни мельницы МБ-7000х2300 от величины износа зубьев венца, U_{10} – скорость изнашивания в начальный момент (при $\Delta S_2 \approx 0$)

Предполагая, что такой же закономерности подчиняется скорость изнашивания венца, экспериментальную зависимость аппроксимируем степенной функцией.

$$U_{1(2)} = U_{1(2)0} [1 + (K\Delta S_2)^x] \quad (1)$$

Так, в начальный период эксплуатации мельниц МБ-7000х2300 долговечность приводной шестерни составляла 3-3,5 года. После износа зубьев венца на величину $\Delta S_2=6,6$ мм, срок службы шестерни сократился до 6-8 месяцев.

В данном случае коэффициенты $K=0,237 \text{ мм}^{-1}$, $x=2,8$, где $U_{1(2)0}$ – скорость изнашивания зубьев шестерни и венца в начальный период.

При проектировании в эксплуатации мельниц, выборе того или иного варианта привода необходимо определять долговечность зубчатых передач, оценивать эффективность мероприятий, направленных на ее увеличение.

Для тяжело нагруженных элементов пар трения, к которым относятся зубчатые зацепления открытых передач мельниц скорость изнашивания в зависимости от условий абразивного воздействия A , физико-механических свойств материалов $M_{1(2)}$, геометрических и кинематических параметров сопряжений K можно представить в виде

$$U_{1(2)} = 6,8 \frac{AK}{M_{1(2)}} \quad (2)$$

где $U_{1(2)}$ – износ за одно нагружение; $A=q_a^{2/3} A^{0.5} \sigma^{2.5}$; (q_a – концентрация абразивных примесей в смазке или воздухе, %; R – их средний радиус, мм; σ – предел прочности, кгс/мм²); $M_{1(2)} = \delta_{1(2)}^{1.5} HB_{1(2)}^{1.5} HB_{2(1)}$ ($\delta_{1(2)}$ – характеристика пластичности поверхностных слоев – относительное удлинение при разрыве; t – коэффициент контактно-фрикционной усталости; $K = \sqrt{\rho^*} \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2}$; $\rho^* = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$ – приведенный радиус кривизны сопрягаемых поверхностей, мм;

V_1, V_2 – скорости скольжения сопрягаемых поверхностей, м/с).

Учитывая (2) и результаты экспериментальных исследований анализ и оценку скорости изнашивания открытых зубчатых передач рудоразмольных мельниц будем производить по формуле

$$U_{1(2)} = 60 N_{1(2)} K n_{1(2)} v_2 L_{1(2)} \quad (3)$$

где $N_{1(2)}$ – параметр характеризующий абразивное воздействие среды и физико-механические свойства материалов зубьев для данных условий эксперимента (для мельниц, работающих примерно в равных условиях, усредненные величины $N_1=3,4 \cdot 10^{-10} \text{ мм}^{1/2}$, $N_2=6,4 \cdot 10^{-10} \text{ мм}^{1/2}$), $n_{1(2)}$ – частота вращения, об/мин, v_2 – число зацеплений зубьев венца за один оборот; L – коэффициент, учитывающий отличие абразивного воздействия среды, физико-механических свойств материала и условий нагружения зубьев для расчетного случая

$$L = \frac{\xi}{K_{q_a}^{2/3} K_R^{0.5} K_\sigma^{2.5} \mu_{\delta_{1(2)}}^2 \mu_{HB_{1(2)}}^{1.5} \mu_{HB_{2(1)}}} \quad (4)$$

$$K_{q_a} = \frac{q_{a_N}}{q_{a_P}}; K_R = \frac{R_N}{R_P}; K_\sigma = \frac{\sigma_N}{\sigma_P}; \mu_\delta = \frac{\delta_P}{\delta_N}; \mu_{HB_{1(2)}} = \frac{HB_{P(1)2}}{HB_{N(1)2}}$$

(величины с индексами N соответствуют тем, для которых определен параметр $N_{1(2)}$, а с индексом P – расчетному случаю).

В выражении (4) предполагается, что при снижении или повышении нагрузки в зацеплении возможно заметное проявление сопутствующих видов износа, влияние которых будем учитывать коэффициентом ξ . Зубчатые передачи, исследуемых мельниц испытывают примерно равные нагрузки, что позволяет принять $\xi=1$.

Особенностью работы открытых зубчатых передач мельниц является то, что за срок службы она может испытывать ряд приработочных режимов, в период которых имеет место ускоренный износ. В ряде случаев, ремонт барабана (перифутеровку) осуществляют на специальном стенде. По этой причине, в условиях, например Ингулецкого ГОКа, зубья венца и шестерни мельницы МБ-7000х2300 испытывают приработочные режимы через каждые 5-6 месяцев.

Пусть за срок службы шестерни зубчатое зацепление испытывает r_i приработочных режимов. Усредняя скорость изнашивания, долговечность шестерни определим из выражения

$$r_i \Delta S_{10} + U_{1(2)_{\text{исп}}} t_i \leq [\Delta S_1], \quad (5)$$

где $i=1,2,3,\dots,n$; (количество шестерен, работавших с венцом за срок службы); t_i – суммарное время изнашивания зубьев в установившемся режиме за срок службы шестерни; $[\Delta S_1]$ – допускаемая величина износа.

Учитывая, что долговечность шестерни равна $T_{li} = t_i + r_i t_{0i}$, из (5) получим

$$T_{li} = \frac{[\Delta S_1] - r_i \Delta S_{10}}{U_{1(2)_{\text{исп}}}} + r_i t_{0i} \quad (6)$$

Величину износа зубьев венца можно представить как сумму износов, которые они претерпевают при работе с каждой шестерней

$$\Delta S_2 = \sum_{i=1}^n (v_2 r_i \Delta S_{20} + U_{2icp} t_i) \quad (7)$$

Тогда, долговечность венца будет

$$T_2 = \sum_{i=1}^n T_{1i} \quad (8)$$

Переходя к практическим расчетам заметим, что срок службы i -ой шестерни зубья венца изнашивается на величину

$$\Delta S_{2i} = v_2 r_i \Delta S_{20} + U_{2icp} t_i \quad (9)$$

Подставляя в (9) t_i из (6), получим

$$\Delta S_{2i} = v_2 r_i \Delta S_{20} + \frac{U_{2icp}}{U_{1icp}} \{ [\Delta S_1] - r_i \Delta S_{10} \} \quad (10)$$

$$\frac{U_{2icp}}{U_{1icp}} = \frac{U_{20}}{U_{10}} = const \quad (11)$$

Выражение (10) и соотношение (11) показывают, что несмотря на различную скорость изнашивания и долговечность шестерен величина износа зубьев венца за срок службы каждой шестерни будет постоянной ($\Delta S_{2i} = const$) и, при всех прочих неизменных параметрах, будет определяться отношением U_{20}/U_{10} . В выражениях 5 и 7

$$U_{1(2)icp} = U_{1(2)0} \left\{ 1 + \frac{K^x}{x+1} \Delta S_{2i}^x [i^{x+1} - (i-1)^{x+1}] \right\} \quad (12)$$

Выражения (10) и (12) позволяют в начальной стадии расчета определять ΔS_{2i} и $U_{1(2)icp}$.

В том случае, когда задано время τ , через которое зубья испытывают приработочные режимы, задача решается методом последовательных приближений. Долговечность шестерни определена правильно, если выполняется условие $T_{1i}/r_i \tau \leq 1$.

В зависимости от условий эксплуатации возможны случаи когда зубья изнашиваются с одной и двух сторон. Приработочные режимы изнашивания зубья могут претерпевать всего два раза за срок службы шестерни и через интервалы, продолжительностью каждый τ .

Анализ показывает, что оптимальными являются режимы эксплуатации при которых допускаемая величина износа активных поверхностей зубьев шестерни с каждой стороны не должна превышать 4 мм. Независимо от модуля передачи необходимо обеспечить выполнение условия $[\Delta S_1] \leq 8$ мм. Для мельницы ММС-9000×3000 назначение величины допускаемого износа зубьев шестерни $[\Delta S_1]=16$ мм (по 8 мм с каждой стороны зуба) приведет к снижению долговечности шестерен и венца в среднем на 40%. Кроме того, необходимо в процессе эксплуатации использовать активные поверхности зубьев венца с обеих сторон. Несоблюдение этого условия приведет к снижению долговечности открытой зубчатой передачи так же на 40%.

Как видно из (2), (4) концентрация механических примесей существенно влияет на скорость изнашивания. При снижении примесей в 2,3,4 раза скорость уменьшается в 1,6;2;2,5 раза.

Из анализа выражений (5), (7) можно заключить, что эффект снижения скорости изнашивания сказывается на долговечность зубчатых колес тем меньше, чем большая роль приработочного износа в общем балансе.

При оценке влияния физико-механических свойств материала зубчатых колес, как было отмечено выше, согласно (2) на скорость абразивного изнашивания влияет величина, характеризующая физико-механические свойства материала зубчатых колес $M = \delta' HB_{1(2)}^{1,5} HB_{2(1)}$. Величина σ составная величина параметра, характеризующего абразивное воздействие среды. Тем не менее, σ , кроме того является функцией твердостей активных поверхностей зубьев. Поэтому, рассматривая влияние физико-механических свойств материалов будем учитывать, что скорость изнашивания

$$U_{1(2)} \approx \frac{\sigma^{2,5}}{\delta' HB_{1(2)}^{1,5} HB_{2(1)}} \quad (13)$$

Повышение твердости активных поверхностей зубьев приводит к снижению σ . Как видно из (13) повышение твердости зубьев одного из колес ведет к снижению скорости изнашивания так же зубьев другого колеса зубчатой пары.

Повышение твердости активных поверхностей зубьев открытых зубчатых передач, кроме того способствует снижению сопутствующих видов износа, повышению их контактной прочности.

Экспериментальное исследование влияния твердости активных поверхностей зубьев на их долговечность было проведено в условиях Приднепровской ГРЭС на мельницах Ш-50. Зубья шестерни подвергались поверхностной закалке токами высокой частоты. В результате несовершенства технологического процесса твердость поверхности различных зубьев резко отличалась. В процессе работы шестерни измерялась скорость изнашивания зубьев в зависимости от твердости их активных поверхностей. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.

Следовательно, повышение износостойкости и долговечности работы крупномодульных зубчатых передач является актуальным для всех машиностроительных предприятий.

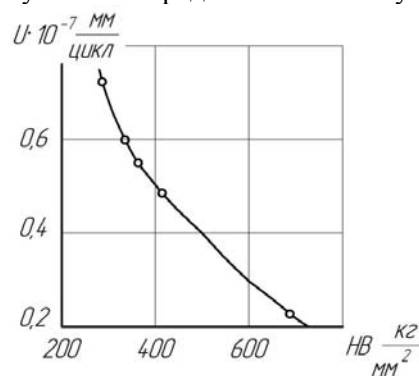


Рис. 3. Зависимость скорости изнашивания зубьев шестерни от твердости их активных поверхностей (ст.35, мельница Ш-50, Приднепровская ГРЭС)

Изложенное, приводит к необходимости исследования существующих технологий для решения проблемы повышения работоспособности, срока службы, износостойкости рабочих поверхностей зубьев крупномодульных зубчатых колес. Перспективным направлением на этом пути представляется упрочняющая термическая обработка рабочей поверхности концентрированным потоком энергии [7,8,9,10]. Образующиеся при скоростном нагреве и охлаждении структуры закалочного типа обладают высокой твердостью, износостойкостью,

сопротивлением разрушению.

Широкое промышленное применение большинства известных способов упрочняющей обработки концентрированным потоком энергии (лазерной, электроннолучевой, катодно-ионной и др.) сдерживается высокой стоимостью и сложностью оборудования, недостаточными его надежностью и производительностью, необходимостью использования вакуума, специальных помещений с особыми требованиями, потребностью в квалифицированном обслуживании, высокими эксплуатационными расходами. В этих условиях, для продления эксплуатационного ресурса быстроизнашивающихся деталей рациональным по параметрам универсальности, доступности, экологичности и экономической эффективности представляется способ поверхностной термообработки плазменной дугой [7,8]. Не изменяя параметров шероховатости поверхности, такая термообработка легко встраивается в технологический процесс подготовки и ремонта деталей, являясь финишной операцией, малозатратна, достаточно производительна и позволяет эффективно увеличить их эксплуатационную стойкость. Вследствие чего авторами статьи предлагается применять плазменное упрочнение профиля зубчатого колеса для повышения контактной прочности рабочих поверхностей зубьев.

Целью плазменной закалки является повышение эксплуатационного ресурса деталей машин за счет упрочнения их поверхностного слоя (толщиной до нескольких миллиметров) термической обработкой плазменной дугой при неизменном общем химическом составе материала и сохранении во внутренних слоях первоначальных свойств исходного металла.

Упрочнение является результатом высокоскоростного локального нагрева плазменной дугой поверхностного слоя изделия до высоких (выше A_{C_3}) температур и быстрого его охлаждения со сверхкритической скоростью в результате теплоотвода в глубинные (внутренние) слои материала изделия. Образующиеся при скоростном нагреве и охлаждении структуры закалочного типа обладают высокой твердостью, износостойкостью и сопротивлением разрушению. Эффект от плазменной закалки определяется повышением эксплуатационных свойств детали благодаря изменению физико-механических характеристик поверхностного слоя, вследствие образования специфической структуры и фазового состава металла, а также получения на поверхности сжимающих остаточных напряжений.

Структурные превращения в целом соответствуют происходящим при объемной закалке, однако, высокие скорости нагрева и охлаждения вызывают изменение соотношений между структурными составляющими, изменение их морфологии вследствие повышенной дефектности кристаллического строения (увеличение плотности дислокаций, измельчение блоков и рост напряжений в кристаллической решетке) [7].

Задача состоит в том, чтобы создать способ термической обработки (поверхностного упрочнения) шестерен, который может позволить получить переменную твердость по высоте зубьев, понижающуюся в направлении впадины (рис. 4). Это позволяет управлять процессом изнашивания зубьев с целью поддержания постоянства качественных показателей зацепления зубчатых колес.

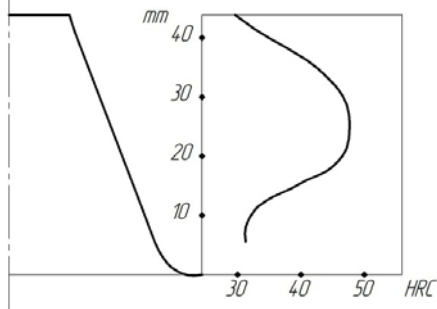


Рис. 4. Модель изменения твердости поверхностного слоя зуба шестерни в результате упрочнения

Структура упрочненного слоя, характеризующаяся большой твердостью и высокой дисперсностью, оказывает определяющее влияние на изменение эксплуатационных характеристик упрочненных материалов - износостойкость, механические свойства (прочность, пластичность, трещиностойкость, выносливость), тепло- и коррозионную стойкость.

Выводы и направление дальнейших исследований.

1. Проведен анализ видов изнашивания и поврежденности зубьев открытых пар рудоразмольных мельниц. Установлено, что ведущим видом является абразивное изнашивание.

2. Выполнены экспериментальные исследования изнашивания зубьев открытых зубчатых передач рудоразмольных мельниц.

В результате обработки и анализа экспериментальных данных получены усредненные величины, характеризующие различные этапы изнашивания. Установлена зависимость скорости изнашивания от величины износа зубьев.

3. Разработан метод расчета открытых зубчатых передач рудоразмольных мельниц на износ, учитывающий особенности их эксплуатации.

На основании разработанного метода дан анализ и оценка факторов влияющих на долговечность открытых зубчатых передач.

4. На основании экспериментальных данных и разработанного метода расчета открытых пар установлено, что предельные величины износа зубья шестерни и венца должны определяться не способностью выполнять эксплуатационные функции, а экономическими соображениями.

5. Разработан способ плазменной поверхностной закалки зубьев шестерен большого модуля ($m > 10$ мм), при котором нагреву подвергают не только боковые поверхности зубьев, но и поверхностные слои материала, расположенные у впадин между зубьями.

Список литературы

1. **Каргельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.** Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526с.

2. **Натаров А.П.** Исследование влияния геометрических параметров зубчатых передач, работающих в средах с наличием абразива на их долговечность: автореферат дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук / А.П. Натаров – Харьков, 1978. – 28 с.

3. **Ямпольский Г.Я., Крагельский И.В.** Исследование абразивного износа элементов пар трения качения. – М.: Наука, 1973. – с. 63.

4. **Ямпольский Г.Я., Натаров А.П.** Расчет абразивного износа зубьев зубчатых передач. – В кн.: Расчетные методы оценки трения и износа: Брянск, 1975, с. 186-204.

5. **Antoni Skoc and Jacek Spalek.** Contemporary directions and methods of studying bevel gears working in mining machines drives / S. Antoni, S. Jacek // Acta Montanistica Slovaca, 2002. - Vol. 3. - P. 205-207

6. **Harris, T. and W. Yu.** Lundberg-Palmgren Fatigue Theory: Considerations of Failure Stress and Stressed Volume / Transactions ASME Journal of Tribology, 1999. - Vol. 121. - 85-89.

7. Нечаев В.П., Рязанцев А.А. Модификация свойств поверхностных слоев тяжело нагруженных деталей горных машин посредством плазменного упрочнения. – Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Вип.32. Кривий Ріг, 2012. – с.123-127.

8. Mohd Idris Shah Ismail, Zahari Taha. Surface Hardening of Tool Steel by Plasma Arc with Multiple Passes/ International Journal of Technology, 2014. – Vol. 5 No 1. - p.79-87

9. Kazuhiro Yagita, Chikara Ohki. Plasma Nitriding Treatment of High Alloy Steel for Bearing Components/ NTN Technical Review, 2012. - No.78. –p. 33-40.

10. Yang, L.J. Plasma Arc Surface Hardening of ASSAB 760 Steel Specimens with Taguchi Optimization of the Processing Parameters, Journal of Material Processing Technology, 2001. - Vol. 113, p. 521-526

Рукопись поступила в редакцию 16.03.15

УДК 69.057.693: 624

А.В. ПАРШИН, С.А. ХАРЧЕНКО, В.И. АСТАХОВ, кандидаты техн. наук, доц.,
И.В. ГИРИН, ст. преподаватель, С.А. ЖУКОВ, д-р техн. наук, проф.
Криворожский национальный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ХРУПКИМ РАЗРУШЕНИЯМ

Представлены результаты исследования сопротивляемости фундаментных болтов хрупким разрушениям для элементов болтовых соединений фундаментов, которые были выполнены из разных марок стали и имели различную конфигурацию. На основании анализа низкотемпературных диаграмм, полученных в результате исследований, было установлено, что разрушающие напряжения для фундаментных болтов, соответствующие температуре вязко-хрупкого перехода, во всех случаях - на 10-20% выше, чем при температуре +20°C. Этот результат предопределен ограничением нижней границы эксплуатационной пригодности фундаментных болтов температурой вязко-хрупкого перехода. Установлено, что в качестве материала для фундаментных болтов диаметром до 48 мм, эксплуатируемых в климатических районах с расчетной температурой до -65°C, можно использовать сталь марки 09Г2С-6, а в климатических районах с расчетной температурой до -50°C – сталь марки ВСтЗ или ВСтЗГ с дополнительным требованием по ударной вязкости при температуре -20°C не менее 30 Дж/см². Результаты экспериментальных исследований позволили разработать предложения по повышению расчетных сопротивлений фундаментных болтов растяжению.

Ключевые слова: фундамент, болт, хрупкое разрушение, сопротивляемость, соединение.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Исследование сопротивляемости фундаментных болтов хрупким разрушениям для позволяет установить разрушающие напряжения, соответствующие температуре вязко-хрупкого перехода. Очевидно, что при установлении количественных показателей сопротивления хрупким разрушениям целесообразно рассматривать диаграммы деформирования элементов болтовых соединений, что позволит более адекватно рассчитывать крепления металлоконструкций к фундаментам.

Анализ исследований и публикаций. Отмеченный подход был использован в исследованиях Беляева С.В., Биргера И.А., Горпинченко В.М., Григорьева В.Н., Ивашкова И.И., Каленова В.В., Кармалина В.В., Кочерговой Е. Е., Мацелинского Е.Р., Павлова А.Б., Стрелецкого Н.Н., Трофимова В.И. Иоселевича Г.Б. и др. [1-6]. Из них следует: чтобы решить задачи, поставленные в данном контексте, необходимо для каждого образца иметь полную информацию о деформациях на всех этапах нагружения. Так как диаграмму деформирования нельзя строить без анализа особенностей разрушения болтового соединения, то окончательно в качестве расчетных сопротивлений хрупкому разрушению принимаются величины, вычисленные по деформационному критерию.

Постановка задания. Анализ исследований хрупкого разрушения элементов болтовых соединений из сталей повышенной и высокой прочности, а также сопоставление требований отечественных и зарубежных норм проектирования показал, что применяемые формулы недостаточно точны, поэтому нуждается в уточнении, что и обусловило направление и содержание представленного исследования: построение и анализ диаграмм деформирования до хрупкого разрушения элементов фундаментных болтовых соединений.