

Усталость малоуглеродистых и низколегированных сталей для автомобильной промышленности. Сообщение 1. Влияние концентрации напряжений и фреттинга на долговечность натуральных автомобильных колес и образцов

Г. В. Цыбанев, С. Л. Пономарев

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Приведены и проанализированы результаты эксплуатационных и стендовых испытаний дисковых автомобильных колес. Установлено, что основная причина их отказа в эксплуатации – зарождение и рост усталостных трещин в диске из крепежных и вентиляционных отверстий, а также результат фреттинга в контактирующей паре ступица–диск. Циклическая пластичность, концентрация напряжений и фреттинг исследованы при циклическом нагружении низколегированных и малоуглеродистых сталей, используемых в автомобилестроении. Показана необходимость поиска параметров для оценки работоспособности сталей в условиях фреттинг-усталости.

Введение. В настоящее время в автомобильном транспорте используют колеса различных конструкций, в том числе дисковые. Последние просты в изготовлении и обладают положительными характеристиками в обеспечении управляемости и устойчивости движения автомобиля [1]. С другой стороны, с параметрами колес связаны такие характеристики транспортных средств, как надежность, долговечность, безопасность, экономичность, в связи с чем они должны соответствовать нормативному уровню качества и ресурса. Данные эксплуатационных испытаний колес двух типов показывают, что более 20% колес типа 7,0-20 разрушаются после пробега автомобиля 300 тыс. км, в то время как такое же количество колес типа 6,0Б-20 – при пробеге 165 тыс. км (рис. 1). Это свидетельствует о несоответствии колес нормативному показателю надежности и долговечности, который установлен на уровне 90%-ного γ -ресурса [2], т.е. в течение всего пробега транспортного средства до его списания не менее 90% колес не должны достигать своего предельного состояния. В соответствии с данными, приведенными на рис. 1, предельное состояние достигается у 20% колес при пробеге, составляющем примерно 30% общего ресурса автомобиля при увеличивающейся интенсивности отказов. Показатели P и λ (рис. 1) определяли по следующим зависимостям:

$$P = \frac{n_{\text{кол}}}{N_{\text{кол}}} \cdot 100\%; \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{n'_{\text{кол}}}{N_{\text{кол}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $n_{\text{кол}}$ – количество отказавших колес при заданной наработке; $N_{\text{кол}}$ – количество испытанных колес; $n'_{\text{кол}}$ – количество отказавших колес на интервале наработки l , км.

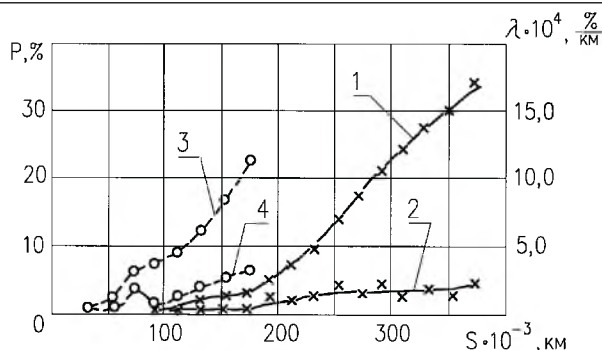


Рис. 1. Вероятность (1, 3) и интенсивность (2, 4) отказа колес в зависимости от пробега S автомобиля: 1, 2 – колесо 7,0-20; 3, 4 – колесо 6,0Б-20.

Экспериментальные данные получены на основе наблюдений находящихся в эксплуатации колес в течение 3–6 лет [3]. Их анализ с точки зрения вида эксплуатационного отказа колес говорит о следующем (рис. 2). Основной причиной отказов является разрушение дисков: 92% – у колес типа 7,0-20 и 97,4% – у колес 6,0Б-20. Поскольку разработка крепежных отверстий происходит в результате нарушений инструкций по эксплуатации (несвоевременная подтяжка крепежных гаек), а разрушение по сварным швам – технологии сварки, повышение надежности и долговечности колес может быть достигнуто в основном за счет улучшения характеристик сопротивления усталости диска колеса. Известно [2], что диск – это та часть колеса, которая соединяет и передает нагрузки с обода на ступицу. Так как дисковые колеса представляют собой неразъемное соединение диска с ободом, разрушение диска приводит к необходимости замены всего колеса вместе с работоспособным ободом, что весьма неоправданно с точки зрения рационального использования металла.

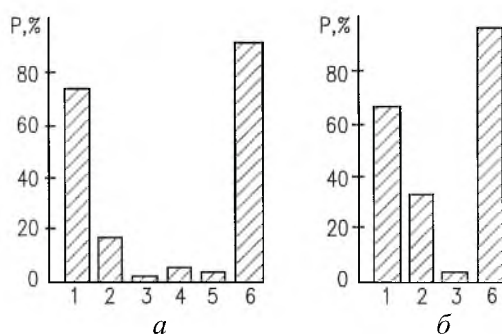


Рис. 2. Вероятность вида эксплуатационного отказа колес 7,0-20 (а) и 6,0Б-20 (б): 1 – трещины из крепежных, вентиляционных или центрального отверстий; 2 – разработка крепежных отверстий; 3 – трещина на бортовой части обода; 4 – разрушение сварного соединения диска с ободом; 5 – разрушение сварного соединения обода; 6 – суммарная вероятность разрушения на диске.

Учитывая вышеизложенное, отметим актуальность задачи повышения надежности и долговечности дисковых автомобильных колес, отказ которых связан в основном с усталостной долговечностью диска.

Испытания на усталость натуральных дисковых колес и анализ их разрушений. Поскольку представленные на рис. 1, 2 результаты эксплуатационных испытаний дают необходимую статистическую информацию по отказам колес, но малоинформативны при выяснении механизмов и причин их разрушения, были проведены стендовые испытания натуральных колес типа 7,0-20 по ранее описанным методикам [4]. При этом использовали схему нагружения колеса изгибающим моментом, при которой вид разрушения испытанных на стенде колес был аналогичен разрушениям, наблюдаемым в эксплуатации [3]. Большая часть усталостных разрушений возникает вследствие зарождения и развития трещин из крепежных отверстий. Наблюдаются также редкие случаи разрушения из центрального или вентиляционных отверстий.

Тщательный анализ фрактографий разрушения и наблюдений за ростом трещин в диске колеса позволил установить истинную причину их зарождения. Результаты анализа показывают, что из-за специфики крепления (рис. 3,а) диск колеса в узле крепления подвержен воздействию как концентрации напряжений, так и фреттинга. Поэтому преобладающим механизмом разрушения определяется уровнем приложенной нагрузки. При высоких нагрузках и, следовательно, малых долговечностях ($< 1 \cdot 10^6$ цикл) основную роль в процессе разрушения играет концентрация напряжений. В области больших долговечностей, соответствующих уровню эксплуатационных нагрузок, механизм разрушения изменяется, и определяющим фактором становится фреттинг-усталость. При этом изменяется и место разрушения: трещина зарождается и растет со стороны контакта диска со ступицей и имеет характерный для трещин при фреттинг-усталости наклон на начальном участке ее роста. В эксперименте наблюдается выделение значительного количества продуктов фреттинг-износа в зоне контакта диска со ступицей в виде порошка окислов железа. Следует отметить, что установление прокладки из алюминиевой фольги между диском и ступицей приводит к некоторому увеличению его долговечности. При этом трещина зарождается и растет из места, наиболее благоприятного для развития фреттинга в результате неравномерного прилегания привалочных поверхностей диска и ступицы: интенсивный фреттинг-износ приводит к протиранию прокладки и непосредственному контакту металлов диска и ступицы, вследствие чего зарождалась фреттинг-усталостная трещина в диске, приводившая в дальнейшем к полному отказу колеса. Рис. 3,б иллюстрирует схему развития такой трещины в узле крепления дискового колеса к ступице, полученную на основе анализа проведенных экспериментов.

Результаты исследования на усталость натуральных колес свидетельствуют, что концентрация напряжений и фреттинг являются основными причинами зарождения трещин. Хотя разрушения наблюдались и в зонах сварки, однако они были связаны с нарушениями в соблюдении технологии сварки или с уменьшенной по сравнению с расчетной длиной шва. В случае концентрации и фреттинга разрушения обусловлены в основном уровнем нагрузки и свойствами использованных материалов. Поэтому дальнейшие исследования направлены на изучение влияния этих факторов на усталость

сталей, используемых или предполагаемых для использования в дисках колес с целью повышения их долговечности при снижении материалоемкости. Такая постановка задачи предполагает применение низколегированных сталей в качестве перспективных для получения деталей путем холодной штамповки [5, 6].

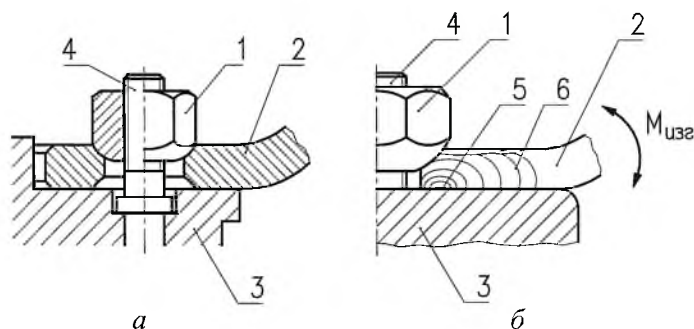


Рис. 3. Узел крепления диска к ступице по одному из нормированных типов (а) и схема роста фреттинг-усталостной трещины из зоны контакта диска со ступицей (б): 1 – крепежная гайка, 2 – диск колеса; 3 – ступица; 4 – шпилька, 5 – очаг зарождения трещины; 6 – линия фронта развития трещины; $M_{цикл}$ – циклический изгибающий момент, действующий на соединении.

Проводимые в течение более 20 лет в центральном конструкторско-технологическом бюро колесного производства (Челябинск) опытно-технологические работы по применению низколегированных сталей для изготовления дисков автомобильных колес показали следующее. Экспериментальные данные, полученные при испытаниях колес с дисками из низколегированных сталей 12ГС, 09Г2, 09Г2С, 11Ю, 08ГСЮТ, свидетельствуют, что ни одна из этих сталей, несмотря на более высокие прочностные характеристики и сравнительно высокую пластичность, не может претендовать на замену базовой малоуглеродистой стали 15кп с целью повышения долговечности дисков колес при той же или уменьшенной (за счет использования более тонкого листа) металлоемкости изделия. Снижение циклической долговечности дисков из низколегированных сталей по сравнению с таковой дисков из стали 15кп наблюдается в основном в области долговечностей $> 1,0 \cdot 10^6$ цикл, при меньших долговечностях их сопротивление усталости более высокое [3]. Отмечено также некоторое повышение усталостных характеристик низколегированных сталей в дисках колес с увеличением содержания углерода в них [3]. Отсутствие критериев оценки свойств материалов с точки зрения возможности их успешного использования в диске колеса предопределило цикл исследовательских работ по установлению таких критериев.

Исследование и анализ усталости и неупругости базовой стали 15кп. Материалы, обладающие различной степенью неупругости при циклическом нагружении, по-разному реагируют на наличие технологических конструктивных и эксплуатационных факторов [7]. Поэтому, учитывая приведенный выше анализ разрушения дисков колес, по отработанной методике [8] выполнены исследования неупругих циклических деформаций стали 15кп, которая, несмотря на невысокие механические характеристики,

достаточно успешно используется в дисках колес. Однако, поскольку в изделии используется прокатный лист толщиной 11 мм, данные были получены не только для стандартных цилиндрических образцов диаметром 5 мм (далее – образцы малого диаметра), но и для плоских образцов прямоугольного сечения 11 × 40 мм, вырезанных из необработанного прокатного листа, а также для образцов со снятой шлифованием прокатной коркой с обеих сторон плоского образца на толщину 0,5 мм, т.е. для плоских образцов сечением 10 × 40 мм. Шлифование производили в направлении, перпендикулярном к оси нагружения образца, во избежание инициирования остаточных напряжений в направлении нагружения. Результаты испытаний в виде деформационных кривых усталости в координатах амплитуда неупругой деформации – число циклов до разрушения образца представлены на рис. 4. Для плоских образцов за момент разрушения принимали зарождение трещины длиной примерно 3 мм, для цилиндрических – их разрушение.

Приведенные на рис. 4 данные свидетельствуют о существенном различии деформационных кривых усталости образцов малого диаметра (кривая 3) и плоских образцов (кривые 1, 2). В области напряжений, соответствующих долговечностям $N > 10^6$ цикл (для образцов из необработанного прокатного листа) и $N > 2 \cdot 10^6$ цикл (для образцов с удаленным прокатным слоем), неупругие деформации не наблюдаются (с учетом нижнего предела измерения неупругой деформации $1 \cdot 10^5$ мм/мм), в то время как для образцов малого диаметра значения $\Delta \epsilon_n$ остаются высокими. Кроме того, деформационные кривые усталости плоских образцов нелинейны в логарифмических координатах в отличие от деформационной кривой усталости цилиндрического образца. Со снижением долговечности деформационные кривые усталости испытанных образцов сближаются. В силовых координатах кривые усталости всех трех типов образцов статистически мало различаются, хотя кривая усталости плоских образцов с удаленным прокатным слоем (~7...12% по напряжению) лежит несколько выше [4].

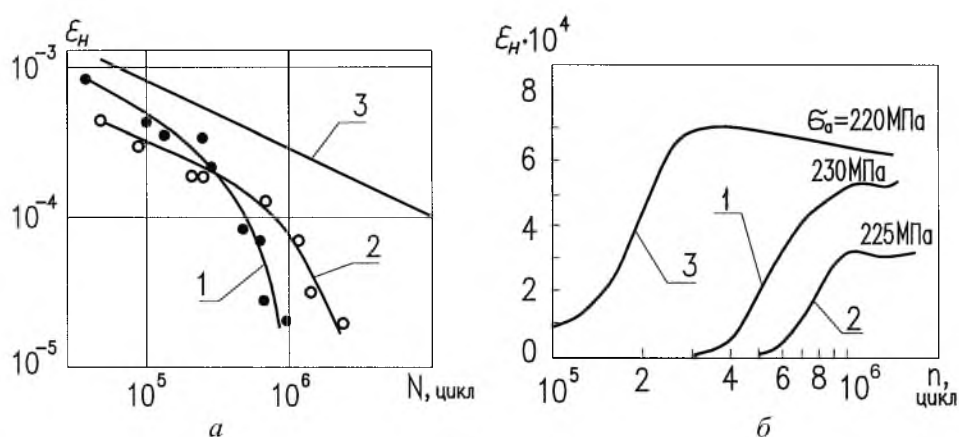


Рис. 4. Деформационные кривые усталости (а) и кинетика неупругих деформаций (б) стали 15кп: 1 – плоские образцы из необработанного прокатного листа; 2 – плоские образцы с удаленной прокатной коркой; 3 – цилиндрические образцы круглого сечения диаметром 5 мм.

Отмеченные выше различия деформационных кривых усталости образцов малого диаметра и плоских образцов с существенно большей площадью сечения можно трактовать следующим образом. Известным фактором является более раннее усталостное повреждение поверхностных слоев в виде образования более густой сетки дислокаций [9, 10], устойчивых полос скольжения [11], микротрещин [12] по сравнению с внутренними слоями испытываемых металлов. При этом показано [12], что величина неупругой деформации за цикл изменяется пропорционально произведению числа трещин на единицу площади поверхности материала на их среднюю длину. Приведенные экспериментальные факты дают основание предположить, что в процессе неупругого деформирования стали принимает участие в основном ее поверхностный слой. Внутренние слои до некоторого уровня амплитуды напряжений образуют упруго деформирующуюся матрицу. У испытанных плоских образцов отношение объема упругой матрицы к объему поверхностного слоя значительно больше, чем у образцов круглого сечения, что в области больших долговечностей и соответственно низких напряжений не дает проявиться неупругости в виде петель гистерезиса. У образцов малого диаметра это отношение намного меньше, поэтому наблюдается их неупругое деформирование. Несколько более высокие долговечности образцов с удаленной прокатной коркой по сравнению с долговечностями образцов из необработанного прокатного листа связаны с наличием в поверхностном слое дефектов проката.

При больших напряжениях и соответственно долговечностях $N < 10^5$ цикл к процессу неупругого деформирования подключаются внутренние объемы материала образца, в связи с чем деформационные кривые усталости испытанных образцов сближаются.

Дополнительным аргументом в пользу предложенной трактовки являются данные о кинетике неупругого циклического деформирования испытанных типов образцов, приведенные на рис. 4,б для близких значений напряжений и циклических долговечностей. Изменение неупругой деформации за цикл в зависимости от числа циклов нагружения соответствует закономерностям, установленным для сталей ферритоперлитного класса [13]. Как следует из представленных графиков, неупругие деформации в образце малого диаметра начинают проявляться при меньших наработках (примерно в 10 раз), чем в образцах с большими размерами рабочей части. Неупругие деформации в образце малого диаметра достигают больших значений (в два раза) по сравнению с плоским образцом с сошлифованной прокатной коркой. Более высокие неупругие деформации образцов с необработанной после проката поверхностью по сравнению с таковыми образцов с удаленной прокатной коркой обусловлены вкладом в общее неупругое деформирование поверхностного слоя локальных пластических деформаций около поверхностных дефектов проката. Эти дефекты можно считать исходными микротрещинами, дополняющими микротрещины, образующиеся в результате циклического неупругого деформирования [12]. В связи с локальной циклической пластичностью около дефектов неупругие деформации образцов с прокатной коркой проявляются при меньших наработках, чем у образцов без прокатной корки (на рис. 4,б кривые 1, 2).

Анализ результатов испытания на усталость и неупругость стали 15кп показывает, что она деформируется со значительными неупругими деформациями во всем диапазоне долговечностей многоциклового усталости (по данным испытаний стандартных цилиндрических образцов диаметром 5 мм). Это свойство в сочетании с особенностью ферритоперлитных сталей, к которым относится испытываемая сталь, деформироваться неупруго с образованием сети поверхностных микротрещин [12] приводит к снижению концентрации напряжений, возникающей около поверхностных дефектов проката, а также незначительному снижению характеристик сопротивления усталости в условиях концентрации напряжений [4]. Высокая циклическая пластичность стали 15кп, проявляющаяся даже на пределе выносливости, по-видимому, позволяет ей быть конкурентоспособной по сравнению с более высокопрочными низколегированными сталями при использовании в конструкции диска колеса грузовых автомобилей.

Из полученных результатов также следует вывод, касающийся методики исследования усталости и неупругости металлов. Учитывая предложенную трактовку о вкладе в неупругое циклическое деформирование металлов поверхностных слоев и внутренних объемов, характеристики неупругости необходимо определять по данным испытаний стандартных образцов малого диаметра, как это рекомендуется в нормативном документе [8]. При этом будут получены необходимые данные по неупругости, которые необходимо использовать при расчете напряженно-деформированного состояния и долговечности в зонах локального изменения напряжений под влиянием конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов.

Принимая во внимание поставленную задачу исследования, далее выполнены усталостные испытания стандартных образцов малого диаметра при наличии концентратора напряжений, очага фреттинга, а также гладких образцов с измерением циклических неупругих деформаций.

Влияние концентрации напряжений и фреттинга. Исследования проведены на цилиндрических образцах диаметром 5 мм из сталей 15 кп, 20кп, 22Г2ТЮ, 08ГСЮТ, 15Г2АФДпс. Концентраторы выполнены в виде отверстий диаметром 1 мм (теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 2,6$), а очаги фреттинга инициировались П-образными накладками из стали 45, прижимаемыми к поверхности образца с номинальным контактным давлением 120 МПа, что отражает условия контакта диска колеса со ступицей.

По результатам испытаний на рис. 5 построены кривые усталости гладких образцов, образцов с концентратором напряжений и очагами фреттинга, а также диаграммы циклического деформирования и зависимости $K_\sigma = f(n)$ и $K_{\text{фр}} = f(n)$, определяемые соотношениями:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_a(N)}{\sigma_{a_k}(N)}; \quad (3)$$

$$K_{\text{фр}} = \frac{\sigma_a(N)}{\sigma_{a_{\text{фр}}}(N)}, \quad (4)$$

где $\sigma_a(N)$, $\sigma_{a_k}(N)$, $\sigma_{a_{фр}}(N)$ – значения амплитуд напряжений, соответствующие одной и той же долговечности, для гладких образцов, образцов с концентратором напряжений и очагом фреттинга, определенные по кривым усталости.

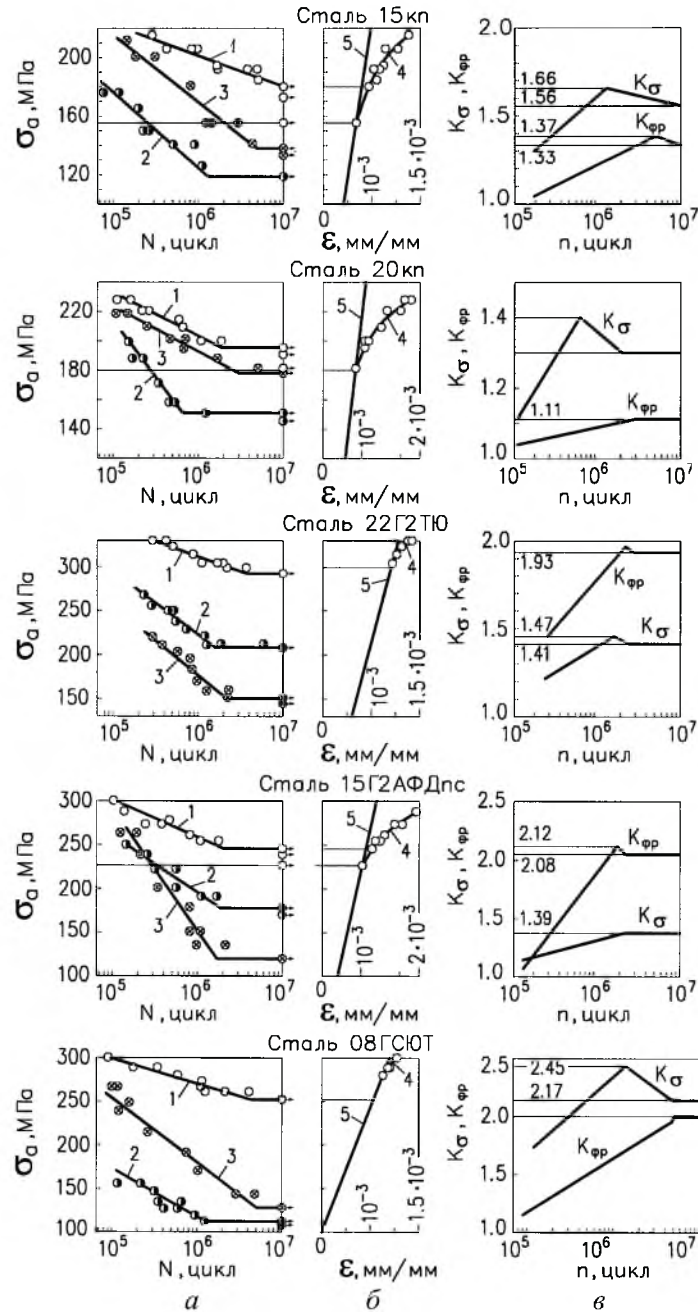


Рис. 5. Результаты испытания образцов круглого сечения из малоуглеродистых и низколегированных сталей: гладких (1), образцов с концентратором (2) и с очагом фреттинга (3) – а, диаграммы циклического деформирования (4) и упругая зависимость $\sigma - \epsilon$ (5) – б, а также зависимости $K_\sigma, K_{фр}$ от долговечности n – в.

Анализ данных (рис. 5) показывает, что наиболее высокие характеристики сопротивления усталости наблюдаются у испытанных низколегированных сталей, среди которых сталь 22Г2ТЮ имеет самый высокий предел выносливости ($\sigma_{-1} = 290$ МПа). Несколько ниже пределы выносливости у сталей 08ГСЮТ и 15Г2АФДпс (250 МПа). Пределы выносливости малоуглеродистых сталей 15кп и 20кп несколько ниже, чем низколегированных, и соответственно составляют 180 и 195 МПа. Этот результат закономерен, так как более высокопрочные стали при статическом нагружении имеют более высокие характеристики сопротивления усталости при испытании гладких образцов.

В случае наличия концентрации напряжений и фреттинга имеют место другие закономерности в соотношениях характеристик сопротивления усталости малоуглеродистых и низколегированных сталей. Так, например, предел выносливости образцов с концентратором из стали 08ГСЮТ составляет 115 МПа, такой же предел выносливости имеет и сталь 15кп, самая низкопрочная из исследуемых. Эффективный коэффициент концентрации напряжений K_σ для стали 08ГСЮТ на пределе выносливости составляет 2,17. Этим она отличается от остальных испытанных сталей, у которых снижение предела выносливости при наличии концентратора меньше, $K_\sigma = 1,3 \dots 1,56$. Некоторое качественное объяснение этого факта может быть дано на основе анализа циклических пластических свойств исследованных сталей. Из диаграмм циклического деформирования следует, что большинство этих сталей характеризуется наличием петель гистерезиса в области ниже предела выносливости гладких образцов (стали 15кп, 20кп, 15Г2АФДпс) или около предела выносливости (сталь 22Г2ТЮ), в то время как циклическая пластичность стали 08ГСЮТ проявляется при более высоких напряжениях. Циклическая пластичность сталей позволяет смягчать их условия деформирования в концентраторе напряжений как за счет актов скольжения в благоприятно расположенных кристаллографических плоскостях [14], так и за счет раскрытия возникших в процессе усталости поверхностных несплошностей [12, 15].

В случае фреттинг-усталости роль неупругости как положительного фактора становится неоднозначной. Из результатов испытаний (рис. 5) следует, что степень снижения предела выносливости в условиях фреттинга у стали 15Г2АФДпс, обладающей наиболее высоким уровнем циклической пластичности среди всех исследованных материалов, такая же, как и у стали 08ГСЮТ с наименьшей циклической пластичностью.

Полученные результаты позволяют также отметить закономерность более значительного снижения пределов фреттинг-выносливости у низколегированных сталей по сравнению с малоуглеродистыми. Так, наиболее прочная из исследованных сталей низколегированная 22Г2ТЮ имеет предел выносливости в условиях фреттинга 150 МПа, в то время как малоуглеродистая сталь 20кп – 175 МПа. Сравнение значений $K_{фр}$ для низколегированных сталей показывает, что их величины на пределе выносливости близки и составляют $\sim 2,0$, в то время как для малоуглеродистых сталей 20кп и 15кп они составляют 1,33 и 1,11 соответственно. Анализ результатов исследования усталости сталей свидетельствует об отсутствии

однозначной взаимосвязи характеристик их сопротивления фреттинг-усталости с циклической пластичностью и характеристиками, получаемыми при усталости в концентраторах напряжений, а также с характеристиками прочности и пластичности при статическом нагружении [4]. Такое обобщение предполагает дальнейший поиск параметров, позволяющих оценивать работоспособность сталей в условиях фреттинг-усталости.

Выводы

1. Несоответствие испытанных типов автомобильных колес нормативному показателю надежности и долговечности обусловлено недостаточным уровнем усталостных характеристик малоуглеродистой стали 15кп, используемой для изготовления диска колеса. Усталостное разрушение диска в эксплуатации – основная причина отказа работы колеса.

2. В большинстве случаев усталостные трещины в диске колеса зарождаются из концентраторов напряжений в виде крепежных и вентиляционных отверстий, а также в результате фреттинг-усталости в соединении диск–ступица. Предложена схема развития усталостной трещины в диске колеса в условиях фреттинга.

3. Изучены усталость и неупругость стали 15кп, традиционно используемой в дисках автомобильных колес. Отмечена ее высокая циклическая пластичность в области многоциклового усталости, позволяющая снижать влияние дефектов проката и геометрических концентраторов напряжений на долговечность. Предложена трактовка реализации неупругого циклического деформирования сталей ферритоперлитного класса. Сделан вывод о правомерности определения неупругих характеристик материалов по результатам испытаний образцов малого диаметра.

4. Циклическая пластичность как малоуглеродистых, так и низколегированных сталей приводит к невысоким значениям эффективных коэффициентов концентрации напряжений. При наличии очагов фреттинга усталостные характеристики низколегированных сталей снижаются более существенно по сравнению с таковыми малоуглеродистых независимо от уровня циклической пластичности. Для оценки работоспособности сталей в условиях фреттинг-усталости требуется дальнейший поиск параметров, отражающих степень совместимости контактирующих материалов во фреттинг-паре.

Резюме

Наведено та проаналізовано результати експлуатаційних і стендових досліджень дискових автомобільних коліс. Установлено, що основна причина їх відмови в експлуатації – зародження і ріст втомних тріщин у дискові з кріпильних та вентиляційних отворів, а також наслідок фреттингу у контактуючій парі маточина–диск. Циклічну пластичність, концентрацію напружень і фреттинг досліджено при циклічному навантаженні низьколегованих та маловуглецевих сталей, що використовуються в автомобілебудуванні. Показана необхідність пошуку параметрів для оцінки працездатності сталей в умовах фреттинг-втоми.

1. Яценко Н. Н. Колебания, прочность и форсированные испытания грузовых автомобилей. – М.: Машиностроение, 1972. – 372 с.
2. Балабин И. В., Вазингер В. К., Васильев А. К. и др. Автотракторные колеса: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 272 с.
3. Трощенко В. Т., Цыбанев Г. В., Зорин В. В. и др. Усталостное разрушение сталей и дисков колес автомобилей и рекомендации по их расчетам на прочность. Влияние различных факторов на характеристики сопротивления усталости сталей и колес. – Киев, 1988. – 46 с. (Препр. / АН УССР, Ин-т пробл. прочности).
4. Пономарев С. Л. Разработка и экспериментальное обоснование метода прогнозирования усталостной долговечности конструктивных элементов с учетом концентрации напряжений и фреттинг-коррозии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1992. – 16 с.
5. Касаткин Б. С., Мусияченко В. Ф., Вахнин Ю. Н. Повышение надежности и долговечности сварных конструкций на основе применения высокопрочных сталей // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 1982. – № 1. – С. 102 – 112.
6. Основные направления экономии и рационального использования металла в автотракторостроении // Докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. (Челябинск, окт., 1994 г.). – Челябинск: Дом научн. техн. пропаганды, 1984. – 395 с.
7. Трощенко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 343 с.
8. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы ускоренного определения предела выносливости, основанные на деформационных критериях. – Киев, 1979. – 37 с. (АН УССР, Ин-т пробл. прочности).
9. Pangborn R. N., Weissmann S., Kramer J. R. Work hardening in the surface layer and in bulk during fatigue // Scr. met. – 1978. – **12**, N 2. – P. 129 – 131.
10. Иванова В. С. Разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 167 с.
11. Pohe K., Mayr P., Macherauch E. Persistent slip bands in the interior of a fatigued low carbon steel // Scr. met. – 1980. – **14**, N 11. – P. 1167 – 1169.
12. Трощенко В. Т., Драган В. И. Исследование закономерностей неупругого деформирования и усталостного разрушения металлов при кручении // Пробл. прочности. – 1982. – № 5. – С. 3 – 10.
13. Трощенко В. Т., Хамаза Л. А., Цыбанев Г. В. Методы ускоренного определения пределов выносливости металлов на основе деформационных и энергетических критериев. – Киев: Наук. думка, 1979. – 175 с.
14. Мак Лин. Механические свойства металлов: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1965. – 431 с.
15. Цыбанев Г. В. Оценка циклической долговечности образцов с концентраторами напряжений по величине раскрытия надреза // Пробл. прочности. – 1987. – № 3. – С. 26 – 30.

Поступила 15. 12. 99