
УДК 621.833.031

Приймаков А.Г., Устиненко А.В., Примаков Г.А.

**ВЫНОСЛИВОСТЬ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ
СИЛОВЫХ ВОЛНОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ**

Введение. Актуальность проблемы.

Работоспособность силовых волновых зубчатых передач (СВЗП) определяется выносливостью гибких колес с наружным зубчатым венцом, которые представляют собой металлополимерную конструктивно-ортотропную оболочку (длинную цилиндрическую замкнутую двухслойную) [1, 2].

В последнее время возникает существенная потребность в силовых волновых передачах, состоящих из крупногабаритных гибкого, жесткого колес и генератора волн принудительной или полупринудительной деформации. По статическим данным обследования эксплуатационной надежности металлургического и машиностроительного оборудования и оснастки известно [1-3], что 50...70% деталей и сборочных единиц, являющимися несущими элементами указанных конструкций, выходят из строя по причине усталостных явлений. Последние, как правило, приводят к внезапным аварийным ситуациям, длительным простоям и потерям.

Повышение надежности и ее составляющей – долговечности – при снижении материалоемкости технологического оборудования и приводных систем на стадии проектирования может быть достигнуто либо управлением формой и размерами опасного сечения несущей детали, либо обеспечением заданных величин и постоянства на определенной глубине (толщине) опасного сечения механических, усталостных и прочих эксплуатационных свойств конструкционного материала, в т.ч. и остаточных напряжений, за счет управления технологиями плавки,ковки, термообработки, зубообработки и доводочных операций.

Первый путь реален и организуется на этапе проектирования при помощи современных CAD/CAE-систем, второй (создание конструкционных материалов с заданными свойствами) требует нахождения связи между эксплуатационными показателями, влияющими на общую работоспособность и параметрами технологических операций, хотя бы на макроуровне, что можно установить только на основе экспериментальных исследований.

В настоящее время при конструировании СВЗП материал несущего элемента (гибкого колеса) назначается, исходя из эмпирической (иногда – из расчетной) оценки нагруженности и ответственности гибкого колеса (ГК), а также параметров механических свойств материала ГК. Твердость несущего элемента назначается исходя из марки стали, режима термообработки и габарита ГК. При этом величина достигаемой твердости фиксируется лишь в нескольких точках поверхности, и остается невыясненным вопрос о распределении механических свойств по опасному сечению ГК. Следовательно, ни марка стали, ни твердость не связаны с общей работоспособностью и ресурсом ГК и СВЗП.

На сегодняшний день отсутствуют количественные зависимости, отражающие функциональную или стохастическую связь между механическими свойствами, параметрами легирования и термообработки (макро- и микроструктуры) с конечными эксплуатационными свойствами ГК. При решении краевых задач исследования НДС реологические свойства материала ГК описываются только модулями упругости первого или второго рода и коэффициентом Пуассона, которые структурно-чувствительны к макрохарактеристикам материала ГК и, особенно, к усталостным свойствам крупногабаритных деталей.

Испытания на выносливость материалов колес СВЗП.

Для получения вероятностных (стохастических) диаграмм выносливости материалов СВЗП, определения пределов ограниченной выносливости и количественных соотношений между механическими, структурными и усталостными свойствами материалов несущих элементов СВЗП авторами были выполнены испытания на выносливость. Для гибких колес испытывалась Сталь 40ХНМА, для жестких колес – Сталь 40Х (рекомендованы ГОСТ 23108-78 "Редукторы волновые зубчатые одноступенчатые. Основные параметры для волновых зубчатых редукторов В3-50...В3-315").

Для исследования выносливости СВЗП (пары "гибкое колесо - жесткое колесо") на изгиб с кручением, что соответствует реальному нагружению ГК в процессе зацеп-

ления, авторами были проведены циклы испытаний стандартных образцов в соответствии с ГОСТ 25.502-86 и созданным на его основе ДСТУ 25.502-94.

Стандартные образцы изготавливались из крупногабаритных поковок с наружным диаметром $D=1350$ мм, внутренним диаметром $d=550$ мм и высотой 100 мм из вышеуказанных марок сталей. Поковки были изготовлены по техническим условиям рабочих чертежей гибких и жестких колес СВЗП и прошли весь технологический циклковки и термообработки на ГП "ФЭД" (г. Харьков). Термообработка зубчатых пар – нормализация+улучшение до твердости $HRC\ 28\dots 32$, что не исключает возможности приработки зубчатых пар относительно мелкого модуля.

Из слоя металла толщиной 150 мм от поверхности поковки (по диаметру) на продольно-строгальном станке вырезались заготовки круглого сечения для стандартных образцов; из каждой заготовки изготовлялся стандартный образец типа I диаметром 10 мм, длиной 200 мм с круговой (сегментной) выточкой диаметром 5,5 мм.

Испытания образцов на изгиб с вращением проводились при симметричном цикле нагружения на испытательных машинах УБМ, технические характеристики которых соответствуют ГОСТ 25.502-86. Перед испытаниями были проверены работа счетчиков числа циклов и показания шкалы нагруженности по результатам показаний приборов трех машин; статистическая обработка результатов измерений подтвердила, что расхождение показаний не превышает 3%. Эта точность измерений достаточна для проведения статистической обработки результатов испытаний выносливости [2, 4]. Базой испытаний N_6 служило рекомендованное ГОСТ 25.502-86 значение $N_6=10^7$ циклов; значение предела выносливости σ_{-1} для испытываемых сталей находим по справочной литературе [4-6]. Верхний предел напряжения σ_R не превышал предела текучести σ_T , а нижний уровень соответствовал пределу выносливости σ_{-1} для данной стали. В интервале между этими уровнями брали три значения напряжений (через дискретные интервалы) и на них проводили испытания выносливости по 15 образцов на каждом.

Анализ результатов испытаний.

Статистическая обработка результатов испытаний выносливости, а также корреляционное уравнение распределения долговечности элементов СВЗП осуществлялись по методике Митропольского-Шашина с использованием стандартного пакета из программы MathLab.

Анализ результатов испытаний показал, что на всех уровнях амплитудных напряжений σ_a функции распределения долговечности образцов (N) подчиняются нормальному или нормальному усеченному закону, причем нормальное распределение N фиксируется, когда варьирование рассматриваемой величины происходит под действием большого числа суммирующихся случайных воздействий, квазинезависимых и малых по сравнению со всей суммой этих случайных воздействий. Это означает, что влияние всех технологических факторов на формирование усталостного разрушения образцов равносильно. С другой стороны, сумма всех случайных воздействий и формирует меру поврежденности D материала ГК, что позволяет говорить о таком же нормальном (или нормальном усеченном) законе распределения величины D . Установлено также, что когда напряжения σ_a приближаются к пределу выносливости σ_{-1} , то среднее квадратичное отклонение возрастает, что объясняется большим влиянием на потерю выносливости микроструктуры, поверхностных дефектов и микротрещин на низких уровнях нагружения.

Построение полигона выносливости для обоих материалов осуществлялось традиционным способом [2, 3] в логарифмических координатах $\ln N - \ln \sigma_a$ для доверительных интервалов $P(N)=5; 10; 30; 50; 70; 90; 99,9\%$ с предварительным определением

корреляционной связи логарифмических координат по данным проведенных испытаний выносливости. На рис. 1 показана полигональная вероятностная диаграмма выносливости образцов из Стали 40X при изгибе с кручением для различных доверительных интервалов (1 – $P(N)=5\%$; 2 – $P(N)=10\%$; 3 – $P(N)=30\%$; 4 – $P(N)=50\%$; 5 – $P(N)=70\%$; 6 – $P(N)=90\%$; 7 – $P(N)=99,9\%$), а на рис. 2 – то же для Стали 40ХНМА.

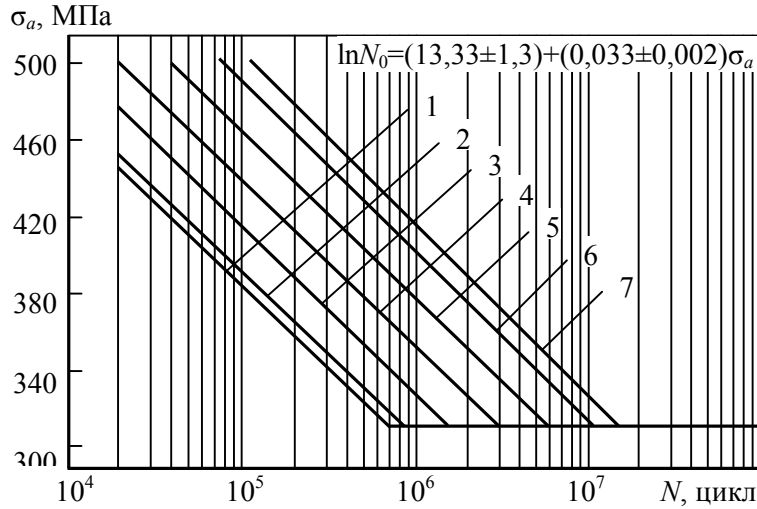


Рисунок 1 - Полигональная диаграмма выносливости образцов из Стали 40X при изгибе с кручением для различных доверительных интервалов (1-7)

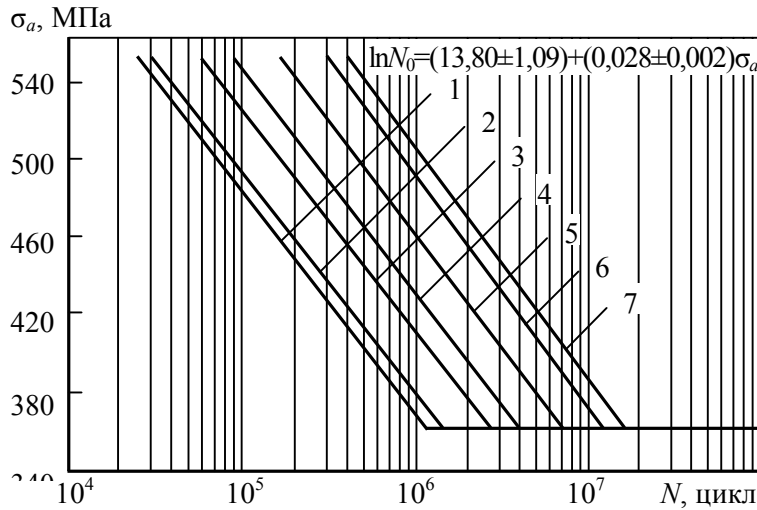


Рисунок 2 - Полигональная диаграмма выносливости образцов из Стали 40ХНМА при изгибе с кручением для различных доверительных интервалов (1-7)

При расчете σ_{-1} неразрушившиеся образцы принимали за образцы с известной долговечностью, что несколько повысило пределы ограниченной выносливости. Точки перелома кривой выносливости N_{0i} получали путем пересечения уравнений регрессии $\ln \sigma_{ai} = f(\ln N_i)$ с пределами ограниченной выносливости.

Функции распределения всех параметров полигонов выносливости – нормальные, но пределами ограниченной выносливости всех марок сталей свойственны отрица-

тельные и существенные показатели асимметрии при несущественном эксцессе. Это обосновывает приближение функции распределения σ_{-1} к логарифмически-нормальной и правомерность ее представления в логарифмических координатах. Коэффициенты вариации σ_{-1} весьма малы и имеют максимальную величину не более 8,2%. Точность параметра σ_{-1} достаточно высокая – доверительные границы в отношении к средней величине изменяются в пределах 3...5%, что еще раз подтверждает объективность существования предела выносливости для любого конструкционного материала. Хотя в результате расчета σ_{-1} с учетом усеченности распределения для стали 40ХНМА предел выносливости понизился с 360 до 340 МПа, но и в этом случае его возможное отклонение не превышает 8,25%.

Абсцисса точки перелома кривой выносливости (N_0) и долговечность на уровне σ_{-1} (N/σ_{-1}), напротив, имеют очень большой разброс: коэффициенты вариации достигают 34 и 82%. Это объясняется большой чувствительностью материала образцов к поверхностным дефектам, включениям и структурной неоднородности (структурной анизотропии). Последние, в свою очередь, определяют время, место зарождения и скорость развития усталостной трещины.

Испытания показали, что в расчетах на выносливость величины предела ограниченной выносливости σ_{-1} следует принимать детерминированными, а параметры долговечности (N_{0i} , N/σ_{-1}) необходимо характеризовать только как существенно статистические величины.

Большие интервалы вариации параметров долговечности являются одной из причин малой надежности прогнозирования ресурса – широкие доверительные интервалы срока службы или количества циклов до разрушения.

Выводы.

1. На образцах, вырезанных из крупногабаритных заготовок для зубчатых пар СВЗП, прошедших весь технологический цикл, аналогичный изготовлению реальных гибких и жестких зубчатых колес, по результатам испытания их на выносливость при изгибе с вращением получены статистические характеристики выносливости СВЗП с оценками точности и надежности самих испытаний.

2. Сравнение со справочными данными выносливости образцов, изготовленных из аналогичных марок сталей, но термически обработанных в малых сечениях, показало, что последние имеют предел выносливости на 12...38% выше, т.е. лишь приближенно отображают крупнозернистую и более чувствительную к нагрузкам структуру металла реальных крупногабаритных деталей СВЗП.

Литература: 1. Поляков Б.И. Усталостные свойства материала крупногабаритных деталей // Оборудование металлургического производства. – 2005. – Вып.5. – С.17–23. 2. Приймаков О.Г. Системне прогнозування працездатності несучих елементів авіаційних конструкцій. – Автореферат дис... докт.техн.наук. – Харків: ІМаш ім. А.М. Підгорного, 2007. – 38с. 3. Жовдак В.А. Прогнозирование ресурса, прочности и надежности элементов машиностроительных конструкций: Учебное пособие. – Харьков: НТУ "ХПИ", 1989. – 95с. 4. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Витривальють конструкційних матеріалів при абразивному зношуванні. – Харків: Оберіг, 2009. – 383с. 5. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Теорія зносостійкої витривалості та її застосування в машинобудуванні. – Харків: Оберіг, 2009. – 336с. 6. Жовдак В.А., Мищенко И.В. Прогнозирование надежности элементов конструкций с учетом технологических и эксплуатационных факторов. – Харьков: НТУ "ХПИ", 1999. – 119с.

Примаков О.Г., Устиненко О.В., Примаков Г.О.

**ВИТРИВАЛІСТЬ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ
СИЛОВИХ ХВИЛЬОВИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ**

Проведені випробування на витривалість матеріалів зубчастих коліс силових хвильових передач. Отримані полігональні діаграми витривалості зразків із Сталі 40Х та Сталі 40ХНМА при згині з крученням для різних довірчих інтервалів.

Prijmakov A.G., Ustinenko A.V., Prijmakov G.A.

FATIGUE OF LARGE-GABARIT DETAILS OF POWER WAVE DRIVES

The fatigue tests for gears materials of power wave drives are conducted. The polygonal fatigue diagrams for Steel 40X and 40XHMA at a bend with turn for different confidence intervals are received.
