

УДК 621.7.011.(045).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛИ

Загороднюк Т.С.

Шаршау айнымалы кернеулер әсерінен жарықтардан пайда болуы, олардың улкеюі нәтижесінде бөлшектің күйреуі және қасиеттерінің өзгеруіне әкелетін материал булунерінің біртіндеп жиналу процесі.

Weariness – process of gradual accumulation of damages of a material under action of the variable pressure, leading change of properties, formation of cracks, their development and destruction of a detail.

Усталость – процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению детали.

Преобладающая часть деталей машин и различных механизмов в процессе эксплуатации работает в условиях переменных напряжений. Многочисленные опыты и анализ поломок различных деталей машин и сооружений позволили установить, что при переменных напряжениях разрушение деталей происходит при напряжениях, значительно меньших предела прочности, а в ряде случаев и предела текучести материала, причем срок службы детали до момента ее разрушения зависит от возникающих в ней максимальных напряжений. Так, чугунные балки, способные в течение ряда лет выдерживать без разрушения статическую нагрузку, близкую к ее предельному значению, при переменной нагрузке, составляющей лишь половину от предельной статической, разрушаются менее чем через 1000 циклов нагружений, в то время как значительная часть деталей машин за время их эксплуатации испытывает миллионы циклов нагружений. Например, по данным, систематизированным Н.Н. Давиденковым, железно-дорожный мост за время его эксплуатации в среднем выдерживает $2 \cdot 10^6$ циклов нагружений, коленчатый вал авиационного двигателя - $1,8 \cdot 10^7$, ось подвижного состава железных дорог - $2 \cdot 10^8$, вал паровой турбины - $1,6 \cdot 10^{10}$, лопатки паровых турбин – 10^{11} циклов нагружений [1].

Процесс разрушения начинается с появления микротрещины, которая с течением времени увеличивается. Под влиянием переменных напряжений края образующейся трещины то расходятся, то сходятся, нажимая друг на

друга, благодаря чему происходит обмятие краев трещины, сглаживание поверхности. С увеличением трещины уменьшается размер неразрушенной части детали, воспринимающей всю нагрузку. Когда же сечение вследствие роста микротрещины ослабнет настолько, что возникающие в нем напряжения значительно возрастут и материал не сможет их выдержать, происходит внезапный излом. Эффект усталостного разрушения материалов имеет место только в том случае, если напряжения превысят определенный уровень, причем в зависимости от того, насколько будет превышен этот уровень, число циклов до разрушения будет различным. При больших напряжениях будет достаточно небольшого количества циклов нагружения, при малых напряжениях деталь может проработать практически бесконечно долгое время. Для того, чтобы оценить способность какой-либо детали противостоять усталостному разрушению, необходимо иметь такую механическую характеристику, которая могла бы количественно охарактеризовать способность материала сопротивляться усталостному разрушению. С этой целью проводятся испытания на усталость. Испытанию подвергаются лабораторные образцы, имеющие в пределах рабочей части строго цилиндрическую форму. Их диаметр обычно составляет 5...10 мм, шероховатость поверхности не грубее $R_a = 0,32$. По результатам испытания строят кривую усталости, т.е. кривую зависимости числа циклов нагружений до разрушения от максимального напряжения, создаваемого в образце.

Многочисленные эксперименты показали, что при переменных напряжениях в расчетах на сопротивление усталости необходимо учитывать ряд факторов, которые существенным образом влияют на сопротивление усталости детали, в то время как на статическую прочность они оказывают незначительное влияние. К наиболее существенным факторам относятся концентрация напряжений, абсолютные размеры поперечных сечений детали, состояние поверхности – ее шероховатость, наличие коррозии, окалины и др. Теоретические и экспериментальные исследования позволили установить, что в местах расположения концентраторов напряжений, т.е. в тех местах, где деталь имеет разного рода отверстия, выточки, переходы от одних размеров и форм сечений к другим, какие-либо внутренние или внешние пороки в материале, а так же в зоне контакта деталей наблюдается значительное возрастание действительных напряжений по сравнению с номинальными. Зона распространения повышенных напряжений носит чисто местный характер, т.е. ограничивается небольшой областью, непосредственно прилегающей к очагу концентрации. Различные материалы обладают различной чувствительностью к концентрации напряжений. Более хрупкие высокопрочные стали чувствительнее к эффекту концентрации напряжений, которая сильнее сказывается на снижении предела выносливости, а чугун, наоборот, малочувствителен к концентрации напряжений [1].

Для уменьшения концентрации напряжений используются различные конструктивные методы: внешние обводы деталей делают по возможности более плавными, радиусы закругления в местах резкого изменения размеров

по возможности увеличивают и, если возможно, вводят разгрузочные канавки.

То, что шероховатость поверхности оказывает существенное влияние на снижение предела выносливости материала, связано с тем, что более грубая поверхность детали создает дополнительные места концентрации напряжений и, следовательно, возникают условия для появления микротрещин. На поверхности всегда имеют дефекты, связанные с качеством ее механической обработки. Поэтому усталостные трещины в большинстве случаев начинаются с поверхности.

Опытным путем установлено, что с увеличением размеров поперечных сечений образцов предел выносливости падает. Испытания на гладких образцах показали, что эффект влияния абсолютных размеров поперечного сечения существенно проявляется при изгибе и кручении и практически отсутствует при растяжении. В большей степени изменение размеров сказывается у алюминиевых и магниевых сплавов и в значительно меньшей степени у углеродистых и легированных сталей. Но, если провести испытание на образцах с концентрацией напряжений, то влияние абсолютных размеров скажется более заметно, причем не только при изгибе и кручении, но и при растяжении [1].

Знакопеременную нагрузку воспринимают вращающиеся валы, детали подвесок и кузовов. Среди вращающихся деталей наиболее подвержены усталостному разрушению коленчатые валы. Усталостные повреждения в них накапливаются из-за кратковременных перегрузок двигателя, неравномерного износа шеек, неравномерной подачи топлива в цилиндры и несоосности коренных опор блока цилиндров, что приводит к нагрузкам на детали, превышающим расчетные. Усталостные повреждения проявляются в виде микротрещин на поверхностном слое детали, которые затем превращаются в макротрещины. Поэтому предел выносливости в отличие от других прочностных характеристик (жесткости, пределов упругости, текучести и прочности) во многом зависит от состояния поверхности детали. Уменьшение шероховатости контактирующих поверхностей повышает предел выносливости детали, а также снижает удельные нагрузки в сопряжении, а значит и изнашивание трущихся поверхностей.

Предел изношенные коленчатые валы по сравнению с новыми деталями имеют следующие значения относительного остаточного предела выносливости: Д-240, СМД-14, ЯМЗ-236(238) и СМД-60 соответственно 0,79; 0,75; 0,70; и 0,83. Значения этой величины для деталей, шлифованных последовательно под ремонтные размеры, находятся в пределах 0,77...0,94. Новые коленчатые валы двигателя Д-50, шлифованные сразу под четвертый ремонтный размер, теряют 9,7% предела выносливости. Следовательно, в большей степени усталостная прочность коленчатого вала снижается при эксплуатации в связи с накоплением усталостных повреждений в опасных

сечениях. Как правило, усталостные трещины у дизелей находятся в зоне перехода галтелей щеки вала в плоскости кривошипа, а у карбюраторных двигателей – в центральной части шеек в зоне маслопроводных отверстий. Опасную нагрузку у дизеля создает изгибающий момент, а у карбюраторного двигателя – крутящий. Более половины трещин расположено на шатунных шейках. Трещины в зависимости от места их расположения оказывают разное влияние на предел выносливости коленчатого вала дизельного двигателя. *Опасны* трещины, находящиеся: на галтелях шеек и на их цилиндрической части на расстоянии < 6 мм от торцев щек; на кромках отверстий масляных каналов при длине >15 мм, расположенные под углом 30° к оси шейки; на расстоянии < 10 мм друг от друга. Детали с перечисленными повреждениями подлежат выбраковке. *Неопасными* являются: продольные трещины (не более трех) длиной >5 мм на поверхности каждой коренной шейки; не выходящие в зону галтели и находящиеся на расстоянии >10 мм друг от друга; расположенные под углом $< 30^\circ$ к оси вала.

Таблица 1. Влияние способа восстановления на усталостную прочность коленчатых валов Д-240, СМД-14 и А-41 [2].

Техническое состояние, технологические способы	Коэффициент выносливости стальных коленчатых валов
Новые	
- упрочненные обкаткой роликом	1,21
- после холодной правки	0,89
Предельно изношенные	0,81
Наплавленные порошковой проволокой ПП-3Х2В	0,77
Наплавленные проволокой Нп-30ХГСА под слоем флюса с последующими нормализацией, закалкой ТВЧ, отпуском, упрочнением галтелей поверхностным пластическим деформированием	1,09
То же, без упрочнения галтелей	0,90
Наплавленные проволокой Нп-65Г с последующими нормализацией, закалкой ТВЧ, отпуском, упрочнением галтелей поверхностным пластическим деформированием	0,98

Шлифование шеек карбюраторных двигателей удаляет поверхностные слои с усталостными повреждениями, а нанесение покрытий разгружает наиболее напряженные слои металла. Все это способствует восстановлению их ресурса. Но полностью снять шлифованием разрушенные слои металла коленчатых валов дизельных двигателей в зоне галтелей затруднительно, поэтому их ресурс целиком восстановить не удастся.

Трещины, отнесенные к разряду безопасных, подлежат разделке абразивным кругом по всей длине для образования канавки радиусом 1,5 мм и глубиной 0,2...0,4 мм, т.е. заведомо меньшей, чем глубина залегания трещины. Острые кромки следует притупить по периметру. Трещина не появится вновь при эксплуатации детали, если в зоне канавки будет создан наклеп. Ложе канавки у разделанной трещины упрочняют виброударным инструментом в течении 5...8 с для создания сжимающих напряжений. Наклеп проводят с помощью пневматического инструмента (марок 57, КМП-2М, КМП14М) с энергией удара 2,5...5 Дж. Местное упрочнение является эффективной мерой по восстановлению нарушенного упрочненного слоя после снятия уставшего металла в зоне концентраторов напряжений.

Для повышения усталостной прочности восстанавливаемой шейки рекомендована наплавка ее цилиндрической части и галтели проволоками различного химического состава. С целью повышения срока службы валов для насосов и редукторов на ТОО «Прикаспийский машиностроительный комплекс» применяют высококачественную электродуговую наплавку на установке УН-2Г. Установка для высококачественной электродуговой наплавки DN 50 - 600 мм в среде защитных газов с вращающимся столом УН-2Г ПФ 0869-4181-01 – предназначена для наплавки изделий в автоматическом режиме с поперечными колебаниями электрода или без них в среде аргона или смесях на основе аргона. Питание электрооборудования установки осуществляется от трехфазной сети переменного тока напряжением 380 В частотой 50 Гц. Установка предназначена для эксплуатации в закрытых помещениях с местной вытяжной вентиляцией при температуре окружающей среды от +1°C до +35°C, при относительной влажности воздуха 60% при +20°C.

Галтель наплавляют проволокой Св-08 под флюсом АН-348, а цилиндрическую часть - проволокой Нп-ЗОХГСА под смесью флюсов (30% АН-348 + 70% АНК-18). При этом твердость металла имеет значения соответственно 20...24 и 50... 56 НРС. Предусмотрена наплавка цилиндрической части шейки вала, исключая галтель. В этом случае применяют порошковую проволоку ПП-АН-122 или ПП-АН-128, проволоку Нп-ЗОХГСА и смесь флюсов АН-348 и АНК-18. После наплавки зону галтелей шлифуют по радиусу, равному радиусу скругления у нового вала, с

углублением в тело шейки на 0,4...0,5 мм. Полезно зону галтелей после шлифования обработать дробью. Перед установкой и приваркой дополнительной ремонтной детали в виде стальных закаленных полуколец на шейки коленчатого вала из высокопрочного чугуна необходимо нанести разгружающие выточки на галтелях в плоскости, перпендикулярной плоскости кривошипа.

Усталостную прочность восстанавливаемых деталей повышают наклепом, который создает в поверхностном слое металла сжимающие остаточные напряжения. Применяют следующие виды механического упрочнения поверхностей деталей: обкатывание, дробеструйную и центробежную обработку, чеканку, выглаживание.

Механическое упрочнение рекомендуется и для повышения усталостной прочности элементов деталей, восстановленных наплавкой, гальваническими покрытиями и напылением. В ходе поверхностного пластического деформирования значительное число трещин, находящихся в поверхностном слое, смыкается, а объем этого слоя становится более цельным. Поверхностный наклеп выравнивает значения физико-механических свойств различных участков поверхности, местные растягивающие напряжения подавляются вновь созданными сжимающими напряжениями, которые повышают предел выносливости материала. Аналогично влияет на поверхность выхаживание при шлифовании. Его необходимо заканчивать раньше, чем будет снят натяг в технологической системе от действия сил шлифования.

Наибольшее применение нашло обкатывание роликами. В качестве оборудования служат станки, имеющие механические продольную и поперечную подачи. Приспособление устанавливают на суппорте станка. Инструмент (накатник) обычно подпружинен и прижимается к детали усилием поперечной подачи. При обкатывании поверхностей в контакте между инструментом и деталью имеет место трение качения.

Повышения предела выносливости коленчатого вала двигателя Д-50 в 1,57...1,67 раза достигают в результате обкатывания галтелей профильным подпружиненным роликом, изготовленным из твердого сплава Т15К6. Усилие упрочнения 7,5...11 кН, ось ролика составляет угол 36° к оси детали.

Дробеструйная обработка применяется для увеличения усталостной прочности сложных элементов деталей (шатунных, деталей сварных соединений). В качестве оборудования для обработки дробью используют механические или пневматические дробеметы. В механических устройствах дробь выбрасывается со скоростью 60... 100 м/с за счет центробежной силы вращения барабана с лопатками. В пневматических устройствах дробь переносится струей сжатого воздуха под давлением 0,4...0,6 МПа. Применяют стальную или чугунную дробь диаметром 0,4...2 мм. Время наклепа 3...10 мин, а его глубина < 1 мм. Распространение получили ме-

ханические установки, которые обеспечивают более высокую производительность при меньшем расходе энергии и позволяют регулировать скорость полета дроби. Основным недостатком обработки дробью заключается в опасности перенаклепа. Процесс состоит в разрыхлении поверхностного слоя, его шелушении, появлении трещин и отслаивания при превышении установленного времени обработки. Увеличение частоты вращения ротора, диаметра дроби и продолжительности дробеструйной обработки ухудшает шероховатость поверхности.

Упрочнение пневматическим молотком еще больше ухудшает шероховатость обрабатываемой детали. В этом случае на поверхности возникают значительные неровности, соответствующие профилю бойка.

Дробеструйной обработке подвергают также основания зубьев шестерен, коромысла клапанов, звенья цепей, поворотные кулаки и другие детали. Упрочнение дробеструйным наклепом увеличивает срок службы сварных швов в 4 раза, крупномодульных зубчатых колес в 15 раз.

Наклеп ротационным упрочнителем применяют, например, для упрочнения коленчатых и торсионных валов. Процесс ведут с помощью приспособления (см. рис.), установленного на суппорте токарного станка.

Инструментом является диск с радиальными отверстиями, в которые вмонтированы шарики с возможностью перемещения вдоль оси отверстий. Диск получает вращение от электродвигателя. Линейная скорость обода диска 13...25 м/с. В течение одного оборота диска каждый шар наносит удар по упрочняемой поверхности. Размер детали практически не изменяется, шероховатость поверхности улучшается на один - два класса, твердость увеличивается на 25...45 % для стали и на 30...60 % для чугуна. Способ высокопроизводителен.

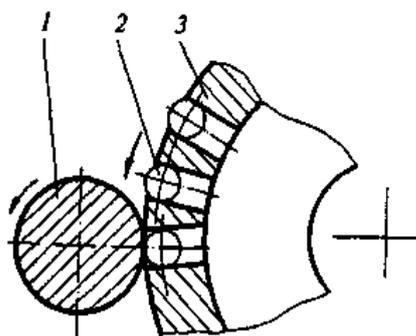


Рисунок. Схема устройства для ротационного упрочнения:

1 - деталь; 2 - шарики; 3 - корпус.

Усталостная прочность в результате наклепа повышается на 30...60 %. Этому способствует увеличение нормального давления (силы удара) и продолжительности упрочнения, однако до определенного предела.

Эффективным способом упрочнения галтелей на коленчатых валах является их чеканка. Наклеп на упрочняемых поверхностях в этом случае создают при помощи бойков, которые приводятся в движение от вращающегося кулачка. Глубина наклепа при использовании чеканки больше в несколько раз, чем при обкатке.

Структура и твердость поверхностного слоя в результате механического упрочнения изменяются в среднем на глубину 0,1...0,7 мм. Структура в этом случае приобретает направленное строение (текстуру), а твердость среднеуглеродистых незакаленных сталей увеличивается на 30...40%. Термически обработанные стали, имеющие твердость 40...45HRC, в процессе наклепа увеличивают ее всего на 5... 10 % [2].

Алмазное выглаживание придает восстанавливаемым поверхностям высокие износостойкость и усталостную прочность. С увеличением силы выглаживания высота микронеровностей уменьшается до определенного предела, а затем может несколько возрасти за счет перенаклепа поверхности и ее разрушения.

Поверхность под алмазное выглаживание предварительно шлифуют или растачивают. Усилие выглаживания < 300 Н. В зону обработки подают индустриальное масло И-20А. Скорость выглаживания для сталей с твердостью 35...67 HRC 200...280 м/мин, а подача 0,02...0,05 мм/об. Качество выглаживания определяется формой и радиусом рабочей части инструмента, величиной радиального усилия, числом ходов, подачей и скоростью выглаживания. Рабочая часть иглы имеет радиус сферы 0,8...3 мм. Крепление инструмента пружинное. Шероховатость обработанной поверхности достигает Ra 0,1...0,05 мкм, микротвердость увеличивается 50-60 %, глубина наклепанного слоя достигает 400 мкм, на поверхности остаются значительные напряжения сжатия. Алмазное выглаживание рекомендуется для упрочнения наплавленных и гальванических покрытий. Усталостная прочность при этом повышается более чем в 2 раза.

После алмазного выглаживания поверхностные слои приобретают более однородное строение, резко сокращается число поверхностных дефектов и концентраторов напряжений.

Предел выносливости деталей с электролитическими и детонационными покрытиями повышают электронно-лучевой обработкой при нагреве до 1100... 1300 °С. Этот показатель повышается до 140 против 80 МПа для детали с покрытием без обработки [2].

Одно из перспективных направлений повышения усталостной прочности деталей основано на использовании неравновесной термодинамики. Самоорганизующиеся технологии обработки материалов связаны с обеспечением условий, при которых создается, воспроизводится или совершенствуется структура материала в процессе обмена системы энергией и веществом с окружающей средой. Материалы, полученные в этих условиях, имеют однородную структуру и химический состав.

Основы теории самоорганизации заложены в 30-40 годах прошлого века применительно к живой природе. Развитие кибернетики, а затем синергетики как теории самоорганизующихся структур предопределило универсальность механизма самоорганизации, являющегося общим как в живой, так и в неживой природе. В основе этой теории лежит принцип минимума производства энтропии, объясняющий процессы самоорганизации диссипативных структур с реализацией обратной внутренней связи. Роль этих связей играют структурные элементы, контроль за которыми позволяет управлять свойствами материала [2].

Примером материалов подобного типа являются сплавы с памятью формы (или сверхупругие сплавы). В них структурным элементом, служащим обратной связью, является термоупругий мартенсит. При деформации сплава подводимая энергия расходуется на мартенситное превращение, а при снятии нагружения ввиду обратимости превращения она диссипируется. Созданные сплавы с памятью формы составляют основу для получения на базе неравновесной термодинамики «неуставаемых» материалов, способных бесконечно долго работать в условиях циклических нагрузок.

Литература:

1. Ицкович Г.М. Соппротивление материалов. -М.: Высшая школа, 1998.-368с.
2. Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П., Константинов В.М.
3. Восстановление деталей машин. – М.: Машиностроение, 2003. – 672с.