

ДАГЕСТАНСКИЙ ФИЛИАЛ ЛКИ

Н. М. АБАЧАРАЕВ

**ТРЕНИЕ И КАВИТАЦИЯ
В ЗУБЧАТЫХ
ПЕРЕДАЧАХ — ПАРАХ КАЧЕНИЯ**

МАХАЧКАЛА 1972

18733

Н. М. АБАЧАРАЕВ

ТРЕНИЕ И КАВИТАЦИЯ
В ЗУБЧАТЫХ
ПЕРЕДАЧАХ—ПАРАХ КАЧЕНИЯ

6П15.3

A13

34
839

43-19733

Гос. публичная
научно-техническая
библиотека СССР
ЭКЗЕМПЛЯР
ЧИТАЛЬНОГО ЗАЛА

ВВЕДЕНИЕ

Повышение народнохозяйственной эффективности машин, оборудования и целых технических комплексов достигается установкой в них структурных единиц, функциональных элементов оптимального качества.

Как показывает опыт эксплуатации, значительная часть из всех типов механизмов и узлов требует повышения надежности и долговечности для реализации достижимой на сегодня (по меньшей мере научно-технически) народнохозяйственной эффективности технических систем.

Требования к качеству входящих систем, предъявляемые на основе директивно или научно обоснованных установленных требований к качеству всей технической системы, определяются известными методами оптимизации надежности и эффективности [1].

Зубчатые передачи множеством входят в состав сложных технических систем, машин, станков. Механизмы с зубчатыми передачами применяются во многих отраслях народного хозяйства притом в самом большом, нарастающем множестве. Поэтому эффект даже от незначительного улучшения зубчатой передачи (колеса, смазки) преумножается в миллионы раз. Повышение долговечности зубчатых передач является одной из основных и в то же время трудных научно-технических задач.

Расчет и конструирование, производство зубчатых передач поставлено на довольно высокий уровень. Передачи получают развитие не только в долговечности и точности за счет новых материалов, более прогрессивных технологических процессов изготовления передач, за счет усовершенствования методов расчета и творческого их применения, но и на принципиальной основе, свидетельством чего являются волновые передачи.

Вместе с тем нельзя сказать, что имеющимися техническими решениями использованы все известные на сегодня и даже ранее

научно-технические возможности для повышения долговечности зубчатых передач, что использованы все способы улучшения передач, вытекающие из существующих представлений о природе явлений, вызывающих разрушение зубьев.

Сопряженные зубья представляют собой пару качения, работающую со скольжением. Зубья подвергаются износу и заеданию, излому и выкрашиванию, наблюдаются пластические сдвиги мягких и отслаивание твердых поверхностных слоев. Все виды разрушения зубьев ранее связывали только с трением скольжения. Трение качения при этом совершенно не учитывалось. Возможно потому, что (по общепризнанному мнению) природа трения качения не находила удовлетворительного объяснения.

Исследования по трению скольжения, особенно в зубчатых передачах, тоже были недостаточными для объяснения различных видов разрушения зубьев.

Отсюда возникла необходимость исследований по трению качения, по трению скольжения зубьев, в том числе по жидкостному трению, результаты которых излагаются здесь.

Автором впервые раскрыта кавитационная природа выкрашивания зубьев (см. работу [3]). Ранее имелся только намек на возможность кавитационного разрушения (наряду с усталостным выкрашиванием), как на незначительный, вспомогательный фактор [59, 50]. Очевидно, кавитационную природу выкрашивания ранее не могли предусмотреть по той причине, что даже до сих пор нет, как признается [40 и др.], общей теории кавитации и кавитационного разрушения «даже в самой приближенной постановке».

Здесь приводятся результаты исследований, выполненных автором, по некоторым вопросам кавитации и КР, систематизированы результаты ранее выполненных исследований, благодаря чему излагаемый обобщенный материал приобрел, как представляется, признаки структурно оформившейся теории кавитации и кавитационного разрушения тел.

На основе перечисленных исследований разработана представляемая здесь новая теория расчета зубчатых передач.

Выполненные исследования открывают собой принципиально новое направление в исследовании пар качения, зубчатых передач в частности. Разработанная теория вместе с вытекающими из нее рекомендациями послужит практическим вкладом в решение сложной научно-технической и народнохозяйственной по масштабу задачи — разработки более долговечных зубчатых передач.

О ПРИЧИНАХ РАЗРУШЕНИЯ ЗУБЬЕВ

В открытых зубчатых передачах, работающих со скудной смазкой, встречаются все виды разрушения зубьев, кроме выкрашивания. Закрытые передачи, работающие с обильной смазкой, как правило, являются более ответственными, более распространенными, чем открытые.

Выкрашивание, наблюдающееся в условиях только достаточной смазки, является наиболее опасным видом разрушения поверхностей зубьев. Поэтому расчет закрытых передач на усталостную стойкость обычно предопределяет стойкость зубьев и против других видов разрушения.

Продолжительным опытом эксплуатации зубчатых передач и многочисленными исследованиями установлены следующие характеристики и причины возникновения различного рода повреждений на зубьях. Эти причины ранее связывали только с трением скольжения и контактными напряжениями.

§ 1. ВЫКРАШИВАНИЕ ЗУБЬЕВ

На поверхности зубьев через определенное время работы закрытой передачи появляются мелкие оспинки, которые затем растут, превращаясь в раковины [17, 22, 48, 59, 50 и др.]. Различают временное (начальное) выкрашивание, которое прекращается после приработки зубьев (что происходит при НВ менее 350), и прогрессирующее выкрашивание — когда оспинки превращаются в раковины.

В передачах, работающих со значительным износом, выкрашивание не наблюдается. Объясняют это тем, что якобы поверхностные слои истираются раньше, чем появляются трещины усталости — выкрашивания.

Ранее полагали, что усталостное выкрашивание обязано своим происхождением исключительно статическому действию герцовских контактных напряжений. Затем нашли, что смазка играет роль фактора, совершенно необходимого для появления выкрашивания. Однако эта роль ограничена только расклинивающим действием смазки [17, 18, 59, 50, 31 и др.].

Статическое давление смазки (в усталостной трещине) не превосходит давление на контактирующих поверхностях зубьев, поэтому «расклинивающее» действие — роль смазки в выкрашивании, можно сказать, не была раскрыта.

Путем такого анализа автор пришел к закономерному предположению, что действие смазки кавитационное, что выкрашивание по своей природе кавитационное.

Подтверждением гипотезы о кавитационной природе выкрашивания зубьев является признанное кавитационное разрушение (КР) деталей, работающих в аналогичных условиях, например, втулок цилиндров ДВС, подшипников скольжения, подпятников, мембран.

Все внешние признаки усталостного выкрашивания, в том числе: форма раковин на зубьях, характерные периоды этого процесса, условия возникновения — свидетельствуют о кавитационной природе выкрашивания.

Как в случае выкрашивания — кавитационного разрушения зубьев, так и в перечисленных случаях общими являются следующие условия работы деталей:

- контакт разрушающейся поверхности с жидкостью,
- наличие повторяющихся перепадов давления жидкости или вибрация разрушающихся поверхностей.

Эти условия считаются достаточными для возникновения кавитации в практических жидкостях. Их можно обнаружить также в ультразвуковых, электроискровых, электрохимических и других технологических процессах обработки материалов, построенных, как представляется, на кавитационном принципе разрушения тел, как и при кавитационном разрушении образцов с помощью магнитострикционных установок.

Оказывается, что зубья подвержены сложному колебательно-му процессу, что в той или иной мере влияет на все виды разрушения зубьев.

Для зубчатых передач (редукторов) характерен следующий спектр колебаний, которые совершает поверхность зуба:

- колебания фундамента передачи,
- колебания корпуса передачи,
- колебания внешней (рабочей) нагрузки,

- колебания валопровода с зубчатыми колесами, подшипниками, муфтами и другими деталями,
- колебания (диска) зубчатого колеса,
- колебания тела зуба, как консоли,
- колебания поверхности зуба относительно тела зуба.

Последние возникают благодаря контактным деформациям, изменяющимся вдоль линии зацепления за счет изменения приведенного радиуса кривизны, пересопряжения — изменения нагрузки на один зуб; благодаря искажению профилей зубьев (и наличию микронеровностей на поверхностях зубьев, которые копируются сопряженным зубом, вызывая колебания).

Даже в случае работы передачи под постоянной нагрузкой в ней возникают переменные силы, вызывающие колебания. В основном это связано с периодичностью вступления зубьев в зацепление.

На стойкость зубьев влияют все три вида колебаний: крутильные, радиальные и осевые. Спектр частот свободных колебаний в зубчатых передачах довольно широк — от единиц до 8000 гц.

§ 2. ИЗЛОМ, ИЗНОС, ЗАЕДАНИЕ И ДРУГИЕ ВИДЫ РАЗРУШЕНИЯ ЗУБЬЕВ

По излому и износу зубьев выполнено немало исследований. Тем не менее дальнейшее изучение этих видов разрушения является актуальной задачей, что связано с непрерывным возрастанием требований к долговечности, весу и габаритам зубчатых передач в условиях нарастающей интенсификации режимов нагружения.

Что касается таких видов разрушения зубьев, как заедание, пластические сдвиги, отслаивание твердого поверхностного (азотированного, цементированного, закаленного) слоя зуба, отслаивание слоя покрытия (слоя хрома, например), то они еще недостаточно изучены.

1. ИЗЛОМ ЗУБА

Излом зубьев может происходить от ударных или даже статических нагрузок. Наиболее распространенным является усталостный излом зубьев. Усталость зуба наступает вследствие переменности напряжений растяжения от изгиба и, как правило, на переходной кривой корня зуба.

Изгибающие напряжения могут сконцентрироваться также

на других участках зуба. Концентраторами служат риски обработки, микротрещины, вызванные термообработкой, раковины и трещины внутри тела зуба.

Общими видами предупреждения излома зубьев являются:

- увеличение модуля (снижение σ),
- коррекция зацепления,
- термообработка поверхности или всего тела зуба,
- наклеп поверхности тела зуба,
- конструктивные меры по уменьшению концентрации нагрузок на зубьях, по защите передачи от перегрузок.

2. ИЗНОС И ЗАЕДАНИЕ

Вследствие разрыва смазочной пленки возникают молекулярные связи двух зубьев, при разрыве которых вырываются частицы металла. Последние образуют задиры в направлении проскальзывания зубьев. Наблюдается повышенный износ в моменты пуска передачи, что можно объяснить преодолением (повышенного) трения покоя.

Скорость скольжения зубьев прямолинейно растет от полюса зацепления к ножке и головке зуба. Величина же сил трения и степень износа зависят от скорости скольжения: чем меньше скорость, тем больше коэффициент трения. Но, как известно, к головке и ножке зуба изнашивание происходит более интенсивно, поэтому требуется уточнить, чем это вызвано.

Заедание наблюдается обычно в высоконагруженных и высокоскоростных передачах, где создаются условия (развивается высокая температура, разрушающая масляную пленку) для возникновения точек холодной сварки. Разрыв этих связок происходит вырывом частиц металла, которые, прокатываясь между рабочими поверхностями сопряженных зубьев, образуют на последних борозды. Удары в зацеплении, в том числе кромочный удар, способствуют заеданию.

Причиной износа и задира (заедания) могут быть также частички выкрашивания; раковины, нарушающие сплошность масляной пленки, а также врезающиеся своими твердыми и острыми кромками в поверхность сопряженного зуба.

Меры предупреждения заедания и износа:

- повышение твердости поверхности зуба,
- повышение ЧП зубьев,
- защита от абразивных частиц,
- применение масла с химически активными добавками (гипоидное масло),
- интенсивное охлаждение смазки,

— фланкирование зубьев для предупреждения заедания.

Пластические сдвиги в поверхностном слое зуба возникают в тяжело нагруженных (тихоходных) передачах, зубья которой выполнены из мягкой стали. Сдвиги совпадают с направлением проскальзывания зубьев. Признаком пластических сдвигов является хребет у полюсной линии зуба колеса и канавка на зубе шестерни. Устраняются пластические сдвиги повышением твердости зубьев.

Отслаивание поверхностного слоя возникает, когда внутренние напряжения остаются неснятыми отпуском (некачественная термообработка), когда хрупкая корка зубьев не опирается на достаточно прочную сердцевину зуба. Отслаивание чаще возникает при больших перегрузках.

Специальные методы расчета для предупреждения различных видов разрушения зуба, кроме как для выкрашивания и излома, до сих пор не разработаны или недостаточно обоснованы. Но поскольку лимитирующим для закрытых передач в общем-то является выкрашивание, то расчет по контактным напряжениям в определенной мере является совмещенным расчетом по всем видам разрушения.

КАЧЕНИЕ И СКОЛЬЖЕНИЕ ЗУБЬЕВ

§ 3. СУХОЕ ТРЕНИЕ

Некоторое развитие представлений о природе трения качения содержится в работе [2], где автором установлено, в частности, следующее.

1. Установлена основная причина сопротивления качению — возникновение МЦСО впереди ЛДQ в момент страгивания катка, благодаря чему появляется момент сопротивления нагрузки Q.

Мгновенным центром скоростей в случае абсолютной жесткости пары качения становится вершина крайнего ВМН, лежащего впереди ЛДQ по направлению сдвигающей силы.

В случае реальных тел характер взаимодействия их обусловлен тем, что МЦСО располагается впереди ЛДQ на расстоянии полуширины набегающего участка зоны контакта.

2. МЦСО является центром давления тел пары качения, что в основном и определяет собой распределение Снд в зоне контакта. Установлена несимметричность зоны контакта относительно МЦС и МЦСО и возможность роста максимума эпюры давлений в сравнении с общепринятой расчетной величиной в связи с сокращением участка выбега.

3. Определена роль молекулярно-механических связей (ВМН) тел в сопротивлении качению, сформулирован приведенный коэффициент трения качения. Определено влияние податливости тел на сопротивление качению.

4. Обнаружено возникновение кориолисовых ускорений в деформирующейся части подвижного катка, соответствующих им сил инерции и вызванного ими «гироскопического» эффекта.

5. Впадины микронеровностей представлены как потенциальные микротрещины, влиянием которых и их подобий (различного рода неоднородности — концентраторы нагрузки) объяснено образование шейки на образцах, развитие усталостных явлений.

6. Последствие и гистерезисные явления объяснены на той основе, что толща детали представлена как статически неопределимая система разнородных структур (в т. ч. зерен, отличающихся, помимо всего, своей формой — конструкцией), изменяющаяся в процессе нагружения.

Износ катка и основания происходит по многим причинам. Во-первых, вершины более жестких ВМН пропахивают ответные поверхности. Например, ВМН катка действуют подобно зубьям фрезы. Во-вторых, происходит скол, срез перегруженных выступов — в статически неопределимой системе более жесткий элемент воспринимает большую нагрузку чем остальные. Перегрузка может наступить и вследствие ситуации, когда в контакте окажется меньшее число ВМН, чем требуется из условий прочности. Такой износ можно охарактеризовать как стабильный.

Этап интенсивного износа наступает через определенное время работы пары качения, когда многократно повторяющиеся деформации сжатия и изгиба (игловидных) ВМН приводят к их усталостному выкрашиванию.

Другая причина износа заключается в том, что разрыв механических связей и мостиков холодной сварки при качении сопровождается вырывом частиц из металла.

Прочность ВМН зависит не только от материала тел пары качения, но и от микрогеометрии (чистоты и технологии обработки) поверхностей. Очевидно, для каждой пары качения, работающей в определенном режиме (материалы тел, условия нагружения, скорость качения, внешние условия), существует определенное оптимальное сочетание чистоты поверхности тел. При этом следует учитывать, что ЧП изменяется с течением времени.

Известно, что контактирующая пара зубьев представляет собой пару качения, работающую с некоторым скольжением — проскальзыванием.

Скорость качения зуба равна скорости перемещения точки контакта вдоль поверхности другого зуба. Продольная скорость перемещения точки контакта зуба шестерни (касательная к зубу — составляющая окружной скорости этой точки) определяется, как $v_1 = \omega_1 R_1$, где R_1 — радиус кривизны зуба шестерни в рассматриваемой точке контакта. Аналогично определяется v_2 .

Скольжение зубьев возникает вследствие разности скоростей $\Delta v = v_2 - v_1$. Единственно в полюсе зацепления $\Delta v = 0$, т. е. отсутствует собственно скольжение. Напомним, что при этом все же присутствует скольжение сопрягающихся ВМН ответных поверхностей, вызванное качением [2].

Для углубления существующих представлений о скольжении

зубьев и механики износа их рассмотрим это явление в несколько новом плане.

Как известно, длина дуги эвольвенты находится в следующей зависимости от угла развертки φ основной окружности:

$$S = r_0 \varphi^2 / 2 = R^2 / 2r_0,$$

так как $\varphi = \omega t = R/r_0$, где R — радиус кривизны зуба.

Абсолютное суммарное скольжение, происходящее от момента начала зацепления, определяется разностью $\Delta S = S^*_2 - S_1$, где $S^*_2 = S_2(R_2 = L) - S_2(R_2)$ — длина дуги ЗК, повзаимодействовавшей с ЗШ к данному моменту.

Мгновенное скольжение в данной точке линии зацепления определяется производной (по R_1):

$$\Delta S' = [L - (i+1)R_1] / i r_{01}$$

Приравняв $\Delta S'$ нулю, находим, что (мгновенное) скольжение отсутствует только при $j=i$, т. е. в полюсе зацепления, что соответствует действительности.

Для определения числа ударов ВМН ЗК по одному ВМН ЗШ (и наоборот), очевидно, необходимо оперировать следующим выражением для длины дуги эвольвенты: $S = B \cdot N$, где B и N — средний шаг между ВМН на эвольвентах (на поверхностях) зубьев и полное число ВМН на всей длине эвольвенты.

Тогда $\Delta S = B(N_2 - N_1)$, считая B одинаковым для ЗШ и ЗК (одинаковая чистота обработки). В таком случае $\Delta N' = \Delta S' / B$.

Число же (повторных) ударов ВМН ЗК, приходящихся на одно ВМН ЗШ, представляется отношением $\lambda_1 = \Delta N' / N'_1$, где $N'_1 = S'_1 / B$. Поэтому $\lambda_1 = j/i - 1$. Если учесть и первый контакт (удар), то полное число ударов находим по формуле

$$\lambda'_1 = j/i.$$

Число (повторных) ударов ВМН ЗШ, приходящихся на одно ВМН ЗК, находится аналогично: $\lambda_2 = \Delta N' / N'_2$, где $N'_2 = (S^*_2)' / B$. Поэтому $\lambda_2 = i/j - 1$. Если учесть и первый контакт (удар), то всего ударов $\lambda'_2 = i/j = 1/\lambda'_1$.

Если произвести замену $i = \omega_1 / \omega_2$ и $j = R_2 / R_1$, получим, что $\lambda'_1 = \tau_2 / \tau_1$, где τ_1 и τ_2 — тангенциальные составляющие окружных скоростей точек, контактирующих в данное мгновение, скорости качения зубьев.

Последнее выражение, характеризующее скольжение зубьев, является общепринятым, свидетельствует о правильности вышеизложенных представлений и зависимостей, предназначенных

для качественной и количественной характеристики скольжения зубьев.

Оценивая степень износа ножек и головок зубьев шестерни и колеса, находим, что

$$(\lambda'_1)_1 > (\lambda'_1)_2 \text{ и } (\lambda'_2)_2 > (\lambda'_2)_1,$$

так как j_1 (в начале РУЛЗ) больше j_2 — в конце РУЛЗ; т. е. на ножках зубьев интенсивность износа выше.

Следует заметить, что при $\lambda_1 < 1$ или $\lambda_2 < 1$ происходит резание (резцом) соответствующего участка зуба (головки), а при $\lambda_1 > 1$ или $\lambda_2 > 1$ — фрезерование — опилка (ножки зуба), что подтверждается анализом характера разрушения головок и ножек зубьев.

Если учесть, что зубья шестерни в i раз чаще входят в зацепление, чем зубья колеса, то откорректированная интенсивность износа ЗШ находится как $\lambda^*_1 = j$.

Если учесть большую прочность материалов шестерни на износ коэффициентом α (значение которого можно установить испытаниями образцов), то соотношение между степенями износа ножек зубьев шестерни и колеса оценивается параметром $\beta = j_1 j_2 / \alpha$. Равнопрочность ножек ЗШ и ЗК по износу достигается при условии $\beta = 1$.

§ 4. ЖИДКОСТНОЕ ТРЕНИЕ ЗУБЬЕВ

Наиболее точным выражением для коэффициента жидкостного трения зубьев очевидно является зависимость [31, 19]:

$$\varepsilon = 1/f = 13,4 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2,$$

где

$$\varepsilon_1 = 0,8 \tau v_0^{0,5},$$

$$\varepsilon_2 = (4700 - 4v_0 - 0,13\sigma) v \cdot 10^{-4}.$$

Коэффициенты ε_1 и ε_2 изменяются вдоль линии зацепления, так как скорость скольжения τ , суммарная скорость v и контактные напряжения σ зависят от положения точки контакта на ЛЗ.

Изменение контактных напряжений вдоль линии зацепления определяется коэффициентом $\sigma' = 1/\kappa$, где $\kappa = (R_1 R_2 / L)^{0,5}$.

Коэффициент f снижается при условии $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 > 0$, т. е. при

$$\sigma' < (36\,000 - 31v_0 + 61\,500v_0^{0,5}\varphi) \sigma_5^{-1},$$

где

$$\varphi = |(i+1)R_1 - L| \cdot [i-1]R_1 + L|^{-1}.$$

Коэффициент жидкостного трения f снижается:

— с повышением τ , т. е. в направлении от полюса зацепления;

с повышением быстроходности v зубчатой передачи, если $36\,000 - 31v_0 > \sigma$; с понижением быстроходности — в обратном случае;

— с повышением вязкости, если разность $(0,8\tau v_0^{0,5} - 0,0004vv_0)$ положительна; с понижением вязкости в обратном случае;

— с уменьшением $\sigma = \sigma_5 \cdot \sigma'$, т. е. в направлении к полюсу зацепления (σ_5 — контактные напряжения на середине ЛЗ).

Все же и при жидкостной смазке наблюдается износ зубьев, что можно объяснить вибрацией зубьев, препятствующей ГД и КГД — эффектам — происходит разрыв, разгружение (разжижение) смазочной пленки.

Однако заметим, что возможность течения в зоне контакта между ВМН высотой порядка микрона чрезвычайно тонкой смазочной пленки (толщина h смазочного слоя 0,01—10 мк, пленки — 0,001—0,1 мк; толщина адсорбированной пленки и того меньше); пленки, замыкаемой микронеровностями на сравнительно большой длине $2b/h = 100$ —1000, весьма маловероятна.

В связи с этим возникает сомнение в возможности осуществления гидродинамического эффекта зоной контакта. Возможно, что гидродинамический эффект осуществляется впереди идущим профилем контактирующего тела, а не зоной контакта. В последней же могут быть только лабиринтные или кусочные течения в масштабе (нескольких) микронеровностей, и то за счет выжимания пленки из впадин микронеровностей при внедрении в них ВМН.

Отмеченное подтверждается тем, что максимум кривой $q(x)$ размещается впереди зоны контакта ([50, р. 14 и 17-в в случае применения более вязких масел]).

Очевидно, в ЗК давление распределяется соответственно кривой вязкости (твердости) смазочной пленки, подобно тому, как в статически неопределимой механической системе нагрузка распределяется соответственно жесткостям элементов.

И наоборот, кривая распределения вязкости в ЗК подобна кривой распределения давления $q(x) = q_1(x) + q_2(x) + q_3(x)$, где первое слагаемое — исходное (как в случае без смазки) давление (см.[2]); второе — приращение давления по мере пробега элементом пленки зоны контакта; третье — снижение давления, вызванное ростом внутреннего трения (температуры) по мере повышения вязкости элемента за время пробега ЗК.

Кривая изменения зазора в ЗК очевидно подобна $q(x)$, но только обратного порядка — зазор снижается с ростом q .

В связи с тем, что второе и третье слагаемые представляют собой противонаправленные изменения на кривой $q(x)$, возникает экстремум (возможно, что не один). Максимуму давления соответствует минимальный зазор. Возможно, что наступление минимального зазора несколько опережается или запаздывает по отношению к точке максимума давления, что зависит от скорости протекания противонаправленных явлений.

Приближение $q(x)$ к герцовскому распределению при жидкостной смазке связано с резким уменьшением зазора (толщины масляной пленки) при снижении вязкости или суммарной скорости качения — быстроходности. Снижение h приводит к росту сопротивления, истечению смазки — повышению температуры.

КАВИТАЦИЯ

Кавитация — явление, протекающее в жидкости при изменении её баротермического состояния. Отличают газовую, парогазовую и чисто паровую кавитацию в зависимости от содержания кавитационных ядер и пузырьков, образующихся из них.

Кавитация обусловлена тем, что благодаря сферической схожимости КЯ и КП относительно низкая средняя плотность внешней энергии (звукового поля) концентрируется, фокусируется внутри смыкающихся КП и КЯ и вблизи них, а также тем, что КП, КЯ и другие элементы КСИ сами становятся источниками звуковых полей.

Локализация энергии оказывается столь значительной, что совершенно неощутимые с точки зрения макропрочности материалов усилия приводят к неминуемому разрушению материала микроскопическими объемами.

Внешнее воздействие на кавитационную систему может быть силовым, силовым-звуковым (акустическим). Тепловым воздействием — какой бы ни был источник энергии (электрический разряд, лазерный луч, химическая реакция), в жидкости вызываются силовые импульсы.

Неизменное по величине и направлению силовое воздействие не вызывает кавитацию, кроме как в момент нагружения и разгрузки КСИ. Из силовых воздействий наиболее эффективным в отношении проявления кавитации является акустическое (ультразвуковое) воздействие, наблюдающееся почти во всех механизмах, в т. ч. в зубчатых передачах. В связи с отмеченным исследуем интенсивность только силового воздействия, и при том только акустического.

В случае синусоидально изменяющегося акустического давления звуковое поле полностью характеризуется частотой и амплитудой этого давления. Звуковое поле порождает в жидкости

кавитацию, т. е. такие сильнодействующие явления, как химические реакции, эрозию, люминисценцию и излучение звука.

Кавитационному разрушению (КР) подвергаются все без исключения материалы, хотя и в неодинаковой степени — поверхности тел буквально выедаются, омывающей их кавитирующей жидкостью.

Интенсивность КР тем выше, чем выше интенсивность самого кавитационного явления и чем ниже кавитационная стойкость материала.

Силовая интенсивность кавитационного явления характеризуется в первую очередь максимальными значениями давления и температуры, развивающимися при смыкании пузырьков.

Жидкости характеризуются множеством свойств. Однако до сих пор недостаточно исследовано, какие свойства, в какой определенной степени влияют на кавитационную активность (КА) жидкости. Этот вопрос мы исследуем ниже, учитывая при том, что свойства жидкости изменяются вследствие кавитации, что свойства эти могут различаться в толще жидкости и в зоне деятельности КЯ или КП.

Трудность оценки влияния различных свойств жидкостей на кавитационную активность состояла в том, что состав и свойства испытанных жидкостей отличались резко выраженной нестабильностью.

По сути дела практические жидкости представляют собой целые кавитационные системы (КСИ), если учесть загрязнения, растворенные вещества, взаимообмен с поверхностями тел, омываемых жидкостями. Связанный с этим разброс параметров, характеризующих свойства жидкости, не всегда учитывался (считая, что имеют дело с однородными жидкостями), поэтому анализ результатов испытаний не давал строгие количественные зависимости.

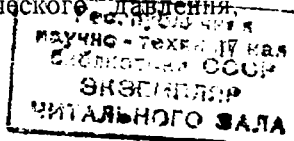
Согласно существующим данным [40, 61], при захлопывании неустойчивых полостей и при максимальном сжатии устойчиво пульсирующих КП и КЯ развиваются давления P порядка 10 000 ат и температуры T порядка 10 000°C.

Предполагается, что при захлопывании неустойчивых полостей развиваются давления и температуры несколько большие, чем при максимальном сжатии устойчивых КП или КЯ.

Известно, что P и T возрастают:

- с повышением амплитуды акустического давления;
- с понижением частоты колебаний давления.

Практические жидкости, прочность которых в десятки, сотни и более раз ниже прочности однородной жидкости, могут кавитировать почти при любой амплитуде акустического давления.



однако же интенсивность кавитации сильно возрастает с повышенной амплитуды.

Благодаря захлопыванию и пульсации КП, в жидкости возникает волновой процесс, усложняемый наводимым и многократно отражающимся (от стенок и неоднородностей жидкости) внешним акустическим полем.

Различные жидкости существенно отличаются кавитационной активностью, что связано с поведением КЯ и КП. Эти вопросы недостаточно изучены, более того, природа КЯ не выяснена окончательно, в связи с чем были выполнены исследования, результаты которых излагаются в настоящей главе.

§5. СОСТАВ КАВИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

На сегодняшний день в некоторой мере исследованы свойства более или менее чистых однородных жидкостей.

В качестве же смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в механизмах применяются сложные, естественно или искусственно загрязненные жидкости, представляющие собой кавитационную систему (КСИ), состоящую из чистых жидкостей, растворенных в них газов, жидкостей и твердых веществ; нерастворенных жидкостей и твердых частиц, отделяющихся от разрушаемых поверхностей. В состав КСИ входят также нерастворенные пузырьки газа, КЯ микропор взвешенных частиц и твердых тел, омываемых жидкостью.

Все, что входит в состав КСИ, кроме основной жидкости, принято называть загрязнениями. Исследование влияния загрязнений, компонентов на свойства жидкостей — очень трудная задача, т. к. эти компоненты и их сочетания составляют чрезвычайное множество [102].

Следует также учесть, что каждое вещество в КСИ может быть представлено разнозначными ионами, рядом изотопов, молекулами различной структуры. Например, вода, по мнению ряда ученых, представляет собой смесь полимерных молекул.

С повышением температуры ионное произведение воды w круто возрастает, увеличивается почти в 100 раз при нагреве до кипячения. Рост w в данной точке жидкости (в корне микропоры поверхности обогреваемого тела) свидетельствует о росте в ней давления ионов, о возникновении ионного ядра — о возникновении КЯ без участия ГЯ. Однако скопление ионов представляет собой своеобразное газовое ядро (кавитации), состояние которого описывается, как и состояние собственно газов, уравнением Ван-дер-Ваальса.

Из всего вышесказанного следует, что КСИ представляет собой чрезвычайно неоднородную систему. Неоднородность, сложность КСИ во многом обуславливается способностью основной жидкости растворять в себе другие вещества, способностью самих веществ растворяться в жидкостях.

§ 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ И ПОВЕДЕНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ЯДЕР И ПУЗЫРЬКОВ

1. Анализ существующих представлений о кавитационных ядрах и пузырьках

По мнению Гарвея и других, рабочая жидкость представляет собой среду, в которой свободные сферические пузырьки исчезают в течение нескольких часов, но в которой малые твердые частицы могут служить местами стабилизации зародышей в течение длительного периода времени. Кавитация начинается за счет этих включений.

«Кипением на зародышах» названо начало кавитации при понижении давления или повышении температуры. Наличие КЯ в микропорах поверхностей тел и взвешенных частиц, омываемых жидкостью, подтверждается данными Гарвея и др. Вестуотер подсчитал, что из отдельных микрошелей в течение 7 дней выделилось около 7 млн. пузырьков размером порядка 10 мк.

По Блейку, КЯ образуются благодаря электрическому отталкиванию одинаковых зарядов, приводящему к образованию полости, на которой распределен электрический заряд одного знака, предохраняющий полость от диффузионного растворения. Найденная Вайбрю, Кинцером и Ганном плотность этого заряда, оказывается, может стабилизировать пузырьки радиусом до 730 мк.

В работе [61] признается существование в толще жидкости (парогазовых) кавитационных ядер с размерами:

- с радиусом до 200 мк, поскольку такой микропузырек всплывает с малой скоростью, равной примерно 5 см/сек;
- с типичным радиусом $r_0 = 50$ мк в свежей водопроводной воде, отстоявшей несколько секунд;
- с радиусом $r_0 = 5$ мк в воде, отстоявшей несколько часов;
- ядра с радиусом менее 0,5 мк, очевидно, могут существовать неопределенное время, если предотвратить диффузию через поверхностную пленку ядра.

Другая модель КЯ, способного сохраняться длительное время, была предложена Фоксом и Герцфельдом. Они считали,

что КЯ — это газовые пузырьки, покрытые органической пленкой, защищающей их от растворения.

Согласно четвертой модели образование КЯ в жидкости обусловлено космическими лучами или какими-либо другими ионизирующими излучениями. В результате экспериментов по исследованию прочности на разрыв жидкостей Бригс пришел к выводу, что космическое излучение может определять предельное отрицательное давление, выдерживаемое жидкостью.

Сетте и другие считают, что микропузырьки, порожденные космическими лучами, могут превратиться в стабильные пузырьки и служить главным источником кавитационных зародышей.

Однако в отношении стабильности зародышей существует и противоположное мнение: полагают, что если бы зародыши были свободными сферическими пузырьками, то поверхностное натяжение жидкости заставило бы их очень быстро раствориться.

Но с этим нельзя согласиться: в высоковязких жидкостях (мед, расплавленный металл) газовые пузырьки ощутимых размеров не исчезают без специальных мер.

Из вышензложенного вытекает важный вывод, что в жидкостях могут существовать:

- а) постоянные ядра, образующиеся с помощью или без помощи микропор;
- б) мгновенные, эпизодически возникающие и тут же исчезающие ядра.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕДЕНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ

Поведение кавитационных пузырьков при их функционировании характеризуется следующим.

1. Размерами, зависящими от условий возникновения КП: от размеров ядер (менее одного микрона, до 0,001 мк в диаметре), соизмеримых с размерами молекул, до размеров кавитационных полостей в несколько кубических метров, образующихся возле гребного винта корабля.

2. Временем смыкания, составляющим сотые, тысячные и десятитысячные доли секунды.

3. Высокими скоростями расширения (40—50 м/сек) и сокращения (90 м/сек). Некоторые авторы допускают возможность сверхзвуковой скорости смыкания КП [38].

4. Высокими внутренними давлениями в тысячи (миллионы предположительно) атмосфер при смыкании.

5. Высокими температурами в сотни и тысячи °С (по меньшей мере 10 000°С), развивающимися при сжатии КП.

6. Высокой частотой пульсации (ω кгц).

7. Резонансным размером — диаметром $d_0 = 6,6/f$ мм; где частота колебаний давления — в кгц.

2. Образование кавитационных ядер в толще жидкости

Первопричиной образования ядра в некоторой точке массы жидкости служит разрыв связи, по крайней мере, между двумя молекулами или другими частицами. Разрывается наименее прочная связь, особенно если внешнее (баротермическое) воздействие на связи частиц имеет сосредоточение.

В момент, когда пространственно сгруппируются несколько активных (легких) частиц, образуется структурно устойчивое кавитационное ядро минимальных размеров.

Продолжительность жизни такого ядра может быть сколько угодно малой, но достаточной в том смысле, что оно за это время может быть задействовано, возбуждено подоспевшим внешним импульсом, звуковым полем.

Активной частицей в газистощенной (жидкости) воде может оказаться наиболее легкая молекула воды-пара, молекула, обладающая вследствие структурной особенности менее прочной связью. Следовательно, в жидкостях возможно возникновение при определенных условиях чисто паровых (молекулярно-ионных) ядер кавитации.

3. Экспериментальные исследования природы кавитационных ядер и поведения пузырьков

Исходя из предположения, что в образовании кавитационных пузырьков должно быть что-то общее с образованием пузырьков в нагреваемой воде, т. к., согласно гипотезе Гарвея-Кнеппа-Перника, КП образуются из КЯ, зарождающихся в несмачиваемых микротрещинах поверхности, и учитывая, что по сути дела микротрещинами являются впадины микронеровностей, как отмечалось в первой главе, были проведены наблюдения за пузырением воды, нагреваемой в открытом сосуде. Результаты следующие.

1. Характерное пение, свист, исходящий как будто из поверхности сосуда, возникал раньше появления на поверхности сосуда едва заметных вздутий — пузырьков.

Вздутия то росли, словно бы выдувались из микроскопических трубок, то прятались обратно. Положение каждой такой точки было строго определенным.

2. Вздутия постепенно вырастали пульсирующим образом в сферические пузырьки. Достигнув максимального размера, пузыри жили некоторое время, не отрываясь от поверхности сосуда. При этом они пульсировали, нередко до полного сокращения.

В одних точках максимальный размер пузырьков достигал 4—5 мм, в других они были помельче.

3. При отрыве пузырька в точке его привязки уже наблюдалось последующее вздутие, либо же оно возникало через секунду-другую и позже.

Пузырение из одной и той же точки ускорялось с течением времени прогревания воды и с прибавлением пламени. С увеличением скорости генерирования пузырьков они становились мельче.

4. Чередующиеся пузырьки в последующем сливались в сплошной поток — образовывался протуберанец с цилиндрообразными очертаниями у корня и конусом на вершине.

Оказалось, что тело протуберанца образовано не только из последующих присоединившихся пузырьков, но и полостей, возникших в результате движения и колебания пузырьков.

До того, как протуберанец достигал зеркала воды (что происходило с течением времени прогрева воды), от вершины конуса его отделялись мелкие пузырьки диаметром 0,5—1 мм. Подрейфовав у вершины, они медленно поднимались к зеркалу воды.

5. Прекращение подогрева воды вызывало сокращение пузырьков пульсирующим образом, они буквально вгонялись в поверхность сосуда. При этом возникало пение сосуда, как и в начале подогрева воды.

6. Размерами (неоторвавшихся) пузырьков можно было играть изменением столба воды и подогрева. Дутьем на зеркало воды пузырьки буквально загонялись в поверхность сосуда, но с прекращением дутья они тут же выползали.

7. После многократных кипячений воды поверхность сосуда переставала пузыриться, пока её не смажешь. Так же обстояло с телами, подержанными над пламенем перед погружением в воду. При скудной смазке пузырение прекращалось быстро (после отрыва 1—2-х пузырьков).

8. В перестававших пузыриться точках наблюдались только мелкие вздутия. В последующем над ними появлялись пяточки отрыва жидкости размерами примерно 3—5 мм в диаметре, что сопровождалось хлопками.

С течением времени (подогрева воды) частота хлопков возрастала, трескотня и свеча, выраставшая над активной точкой, напоминали поведение кавитирующего конца свободно падающей струи. Казалось, что свеча стопкой линз вырастает от поверхности сосуда.

Свеча исчезала, как только к её корню прикасались промасленным стержнем — образовывалось устойчивое пузырение.

9. При особо тщательном обезжиривании поверхности появлялись только мельчайшие вздутия (отрывы жидкости от твердой поверхности не замечались). Затем из тех же точек вырастали свечи, которые с течением времени (прогрева) превращались в пустотелые протуберанцы, расширяющиеся кверху.

10. Блестящие металлические предметы, подержанные в нагреваемой воде, темнели и становились более шероховатыми, благодаря пузырению их поверхности. После 5—10 минут пузырения на ленточке жала лезвия, в точках привязки пузырьков, обнаруживались трудновыводимые скоблением пятна коррозии. Они были темнее, чем после раскалиения лезвия на пламени, чернее надписи на лезвии. При этом жало притуплялось.

На сером поле лезвия, имеющем окисную пленку, следы коррозии в пузырьрившихся точках не замечены.

11. Ориентированная цепочка пузырьков, выступавшая на поверхности сосуда, обнаруживала микротрещину.

12. На поверхности ртути пузырение газоистощенной воды не происходило. Пузырьки газонасыщенной воды на поверхности ртути дрейфовали по поверхности раздела, не имея точек привязки.

ОБЪЯСНЕНИЕ НАБЛЮДЕННЫХ ЯВЛЕНИЙ

Перечисленные явления можно объяснить только на основе признания существования кавитационного ядра Гарвея-Кнеппа-Перника. Корни пузырьков — КЯ образуются на поверхности твердого тела замыканием воздуха в микропорах заливаемой жидкостью. О существовании КЯ свидетельствует появление вздутий и пузырьков из одних и тех же точек поверхности (сосуда) и возврат их туда же.

Сохранение ядра при отрыве пузыря объясняется стягиванием устья ядра в момент отрыва пузыря, как в опытах с мыль-

ными пузырями: конец трубки оставался стянутым пленкой после отрыва пузыря. Кстати, ударами по другому концу этой трубки, колебательными погружениями её в воду можно было воспроизвести картину колебаний мениска жидкости в микропоре, вызываемое колебаниями давления в МП или в столбе жидкости над МП.

Несомненным подтверждением гипотезы Гарвея-Кнеппа-Перника является наблюдение 12, т. е. отсутствие пузырения газоищенной воды на поверхности ртути, не имеющей микронеровностей, микропор. Дрейф пузырьков газонасыщенной воды по поверхности ртути — свидетельство того, что они порождены не микропорами, а являются порождением эпизодических или постоянных ядер, возникающих в толще жидкости (без посредства микропор).

Свист-пение поверхности сосуда, очевидно, объясняется (первым) резонансным режимом колебаний мениска жидкости в микропоре и вызванным им волновым процессом — звуковыми колебаниями в самой микропоре, как в замкнутом сосуде.

Очевидно, критичным в этом процессе является момент перекладки мениска — момент изменения вогнутости мениска с положительного на отрицательное — на вздутие.

Пение сосуда не прекращается, а только гасится запузырившейся толщей жидкости, заглушается шумом пузырения, так как в каждое мгновенные стадии пузырения бесчисленное множество МП находится в различных режимах пузырения, в том числе в первом резонансном режиме. Поэтому, когда пузырение прекращается, снова слышно пение сосуда.

Отсутствие пузырения на поверхности, не имеющей смазочной пленки, очевидно, объясняется тем, что для формирования устойчивого пузырька устьем микропоры неправильной формы необходим элемент, компенсирующий этот недостаток МП, удерживающий еще не сформировавшуюся конструкцию вздутия хотя бы до момента приобретения ею устойчивой формы пузыря. Роль такого элемента играет смазка, с которой вода образует более прочную составную поверхностную пленку, чем поверхностная пленка в контакте с твердым телом, металлом.

Не исключено, как представляется, что роль смазки заключается также в выделении газа или других элементов, могущих составить содержание КП, способствующего образованию скачка потенциала того или иного рода на границе раздела КЯ — жидкость. А как известно, скачок раздельного и совместного баротермо-электродного потенциала, порождаемого химическим потенциалом (возникающим путем адсорбции или обмена заряженными частицами), обуславливает устойчивость КЯ или КП.

Микропора не прекращает своей деятельности даже при тщательном обезжиривании поверхности сосуда (а следовательно, микропор). Допустим, что поверхность микропоры смочена водой полностью, но в воде могут образовываться эпизодические ядра. Кроме того, при нагреве сосуда в более обогреваемых точках — в микропорах может происходить диссоциация воды на ионы или парообразование. Эти ядра, расширяясь, превращают микропору в большое ядро. Электронный газ, выделяемый нагреваемым твердым телом в микропоре, тоже образует КЯ.

Парообразование в первой же точке (на острие микропоры) являет собой скачок давления — микрофронта ударной волны, благодаря чему также становится возможной диффузия и рост большого ядра.

§ 7. ОБОБЩЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ЯВЛЕНИИ КАВИТАЦИИ

На основе анализа имеющихся данных и результатов проведенных выше исследований представляется возможным сформулировать следующее определение явления кавитации.

Под кавитацией понимают комплекс баро-термо-электро-химико и т. д. явлений в жидкости:

— вызываемый такого же рода внешним воздействием на жидкость (на кавитационные ядра и пузырьки),

— действующий разрушительно на кавитсистему, в том числе на омываемые жидкостью поверхности твердых тел.

Кавитация возникает вследствие изменения баротермического и фазового состояния жидкости под влиянием внешних факторов. Изменение фазового состава жидкости заключается в образовании паров воды, диффундирующих как и газы в ядра при понижении давления и повышении температуры жидкости.

Паронасыщенные ядра, пузырьки представляют собой неустойчивую фазу, во много крат колебательно отвечающую на колебания внешней среды — на изменения температуры и давления жидкости, на изменение подводимой тепловой или силовой энергии.

Благодаря этому парогазово-воздушные, парогазовые и паровые ядра вызывают колебательный процесс в жидкости, воздействующий на ядра и пузырьки внешним образом, вызывая скачки уплотнений жидкости — мягкие гидроудары, а также жесткие гидроудары — в случае разрушения пузырьков.

Из анализа имеющихся данных по кавитации и результатов выполненных исследований вытекает, что во всех случаях кави-

тация происходит вследствие разрыва жидкости или отрыва её от поверхности твердого тела:

- — простым механическим растяжением, как, например, в случае свободно падающей струи;

- растяжением внутреннего поверхностного слоя криволинейного потока (отрывом струи от внутренней стороны колена трубопровода), благодаря центробежным силам инерции;

- растяжением, происходящим в толще жидкости, или отрывом поверхностного слоя, благодаря колебаниям столба жидкости или поверхности твердого тела и т. д.

При простом растяжении разрыв жидкости тоже вызывается деятельностью ядер. Во-первых, содержащиеся в жидкости парогазовые ядра разупрочняют жидкость, уменьшая площадь поперечного сечения её образованием пустот, что вызывает рост растягивающих напряжений от внешних усилий — понижение давления. Такую же роль играют любые включения, имеющие худшее молекулярное сцепление с жидкостью, чем молекулярное сцепление самой жидкости.

Во-вторых, понижение давления приводит к расширению ядер и к еще большему сокращению активного сечения жидкости, к падению давления сжатия — давления сцепления молекул жидкости.

В-третьих, возбуждаемый появлением полости или пузырька волновой процесс повышает силовую нагрузку и растяжение жидкости.

При встрече скачков упругой деформации жидкости — фронтов ударных звуковых волн образуется сдвоенный скачок уплотнения жидкости, а при расхождении их — удвоенное разрежение (известно, что за ударной волной следует разрежение), образующее разрывную полость с внезапным паронасыщением парогазовых ядер, имеющих в присоединенном к данному сечению объеме жидкости. Указанные явления протекают более интенсивно на стенке, т. к. ядра МП крупнее ядер толщи жидкости. Очевидно, число КЯ на стенке тоже больше, чем в толще жидкости, они существуют постоянно, тогда как ядра толщи жидкости являются эпизодическими — возникают и тут же исчезают.

Разрушающую роль играют не только удары жидкости по стенке, но и звуковые колебания, возбуждающиеся в ядрах и пузырьках, в столбе жидкости, колебания поверхности твердого тела. Очевидно, характеристики этих колебаний различаются, поэтому можно заключить, что на поверхность тела, на его ми-

кронеровности и зерна действует многомерное (колебания с различной частотой и амплитудой) колебательное поле.

Кавитационные явления принято приписывать целиком кавит-пузырькам. Из вышеизложенного же следует, что ядра не только порождают пузыри, но также играют самостоятельную роль в возбуждении волнового процесса и кавитударов; что ядра понижают прочность жидкости, являются ядрами кавитации во всех отношениях проявления кавитации.

Понижение прочности жидкости на стенке объясняют загрязнением её веществами, адсорбированными на поверхность твердого тела. Например, чистая вода — самая прочная жидкость, лишь в два раза уступающая в этом конструкционной стали, теряет на стенке свое качество более чем в 2 раза.

Понижение прочности жидкости на стенке вызвано также уменьшением контурной поверхности контакта её со стенкой, благодаря наличию ядер МП.

Прочность жидкости зависит от температуры. Вода, например, имеет максимальную прочность при 10°C. При охлаждении её прочность падает почти линейно; при подогреве снижается слабее, но тоже почти линейно.

При криволинейных течениях на внутренней стороне потока давление понижается — ядра поверхности стенки и прилегающего слоя жидкости вырастают в пузыри, препятствующие потоку, образуются присоединенные турбулентные полости, увеличивающие эффект деятельности первичных ядер и их пузырей.

Из изложенного следует, что турбулентность может быть вызвана в любом потоке жидкости активизацией ядер подогревом или колебаниями стенки.

Существует турбулентность, так сказать, конструктивного происхождения, возникающая при постановке на пути потока плохо обтекаемого тела; за этим телом образуется полость, заполняющаяся парами жидкости и превращающаяся в пузыри.

§ 8. ОБОБЩЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О МЕХАНИЗМЕ КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ТЕЛ

Анализ имеющихся сведений о кавитационном разрушении деталей машин, а также выполненные наблюдения и теоретические исследования позволяют сделать некоторые обобщения, привести дополнительные подтверждения ряда ранее выдвинутых гипотез и сделать сообщение о кавитационной природе разрушения деталей передач (зубчатых колес), работающих с обильной смазкой.

Довольно-таки общепризнанной является гипотеза о том, что кавитационное разрушение носит усталостно-коррозионный характер. При этом коррозия играет больше вспомогательную роль.

Основная отрицательная роль коррозии состоит в том, что основной металл превращается в менее прочные окислы, легко поддающиеся разрушению при последующем единичном нагружении или усталостному разрушению. Обусловлена же коррозия окислением чистого металла благодаря физико-химическим превращениям, ускоряемым локальным тепловым полем, являющимся результатом термодинамической деятельности КП или КЯ.

Отрицательное влияние коррозии также состоит в препятствовании окисной пленки восстановлению молекулярных связей, разорванных вследствие усталостного разрушения в процессе работы детали. В этом смысле коррозия выступает в роли фиксатора, достигнутого механическим воздействием разрыва молекулярных связей.

То, что при работе с перерывами детали обрабатывают несколько большее время, очевидно, объясняется отдыхом металла — восстановлением некоторых ранее разрушенных связей, укреплением ослабленных; сопротивлением окисной пленки, образующейся в период отдыха детали, коррозионному (тепловому) воздействию на чистый металл при возобновлении работы.

Благодаря высоким баро-термоэлектрическим потенциалам в зоне деятельности КП и КЯ, возникает высокая (сверхзвуковая) скорость диффузии молекул, ионов жидкости и твердого тела. Поэтому возможно, что именно такое истечение создает свист поверхности сосуда при нагревании в ней жидкости и вызывает газовую эрозию стенок микропор.

Как представляется, газовая эрозия вызывается циклическим тепловым воздействием совместно с внешним силовым — волновым, процессом истекающих газов, приводящим к усталостным разрушениям наименее прочных структур (гранц зерен) металла.

В условиях высоких температур, развивающихся при замыкании КП, и сверхзвуковых скоростей истечения содержания КП действие последних в микропоре вполне можно уподобить кумулятивному (см. [16]).

Усталостное разрушение при кавитации объясняется характером нагружения (развивающимся в волновой процесс при определенных условиях) ВМН, зерен, структур, выступающих на поверхность детали; волновым характером распространения скачка упругой деформации от каждого единичного кавитацион-

ного удара, вызванного высокочастотной пульсацией, давлением, смыканием, захлопыванием кавитпузырька (КП). Эти скачки отражаются от границы любого типа неоднородности микрообъема металла, от границ зерен. При встрече прямых и отраженных скачков возникают всплески напряжений. Очевидно, наиболее опасными будут эти всплески в месте расположения менее прочной структурной составляющей, на границах зерен, как правило.

Граница слоя покрытия детали или поверхностного закаленного слоя детали с её сердцевиной становится местом сосредоточения (торможения) и отражения скачков упругих деформаций металла от кавитударов. Этим можно объяснить отслаивание покрытий и поверхностных закаленных слоев.

Скачок упругой деформации гасится встречающимися на пути менее жесткими структурами и, очевидно, сила его теряется на границе первого же слоя зерен (границы зерен и слабые включения их играют демпфирующую роль). Очевидно, нижележащие слои зерен подвергаются эффективному воздействию кавитударов только после того, как упрочнится первый слой зерен вместе с граничной связкой.

Представляется, что отдельное зерно можно рассматривать как колебательную систему на своих упругих связях, более слабых, чем зерно. В случае, когда границы обладают большей жесткостью, чем тело зерна, роли их будут обратными.

ВМН поверхностей, представляющие собой настоящие консоли в масштабе локальных микроударов, тем более можно рассматривать как колебательные системы.

Представление отдельных зерен или каких-то других структурных блоков и ВМН в качестве колебательных механических систем делают очевидным усталостный характер разрушения их.

Собственная же роль кавитационного явления заключается в возбуждении исключительно локальных термодинамических ударов (более локальные электронно-ядерные удары в ядерных процессах). Привязанность же КЯ к определенным точкам поверхности обуславливает избирательное действие ударов.

Исключительная локальность ударов, вызывающая давления, во много раз превосходящие предел прочности материала, приводит к известным явлениям единичного удара к точечным (зона диаметром в 1—100 мк) деформациям и структурным изменениям. Очаги разрушения металлов при микроударном (единичном) воздействии во много меньше размеров зерен и соизмеримы с отдельными структурными составляющими их [10].

Вряд ли можно найти или создать материалы, не подвергающиеся деформациям под действием сильных единичных кавит-

ударов, а тем более — не подвергающиеся кавитационно-усталостному разрушению.

§ 9. КАВИТАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Впервые было обращено внимание на КР гидротурбин, турбонасосов, гребных винтов. Известны случаи катастрофического разрушения гребных винтов быстроходных судов после нескольких часов работы.

Любой материал рано или поздно повреждается, если только кавитация началась. Наиболее твердые и вязкие материалы не являются исключением даже при самой слабой кавитации.

В механизме кавитационного разрушения всегда наблюдается инкубационный период (ИП) — промежуток времени, в течение которого происходят значительные пластические деформации без потери веса детали.

КС зависит от прочности микрообъемов зерен и границ, разрушение происходит по более слабой из них. Мелкозернистые структуры оказываются более кавитационно-стойкими.

Разрушение тела вызывается работой, производимой против внутриатомных и внутримолекулярных сил, благодаря которым частицы твердого тела держатся вместе. Остаточная деформация, удаление металла означают хотя бы временный разрыв, изменение внутриатомных связей.

Следовательно, возможное сопротивление разрыву представляет собой сумму имеющихся связей. Поэтому энергия деформирования материала определяется числом связей, противодействующих возмущающей нагрузке.

Установить простую зависимость КС только от одной из физических характеристик материала не представляется возможным, так как при кавитации имеют дело со структурными изменениями, с пластическими деформациями зерен и их связей. Первичные (механические) характеристики оказываются непригодными для оценки КС разнородных материалов.

Металлы с небольшой разницей в химсоставе и равной твердостью заметно отличаются кавитационной стойкостью: например, молибденовая сталь разрушается на 35% интенсивней, чем хромо-никелево-молибденовая сталь.

Для деталей машин единичные кавитационные удары, как правило, не представляют опасности; важным является продолжительность кавитационного воздействия (число ударов), подобно тому, как усталостная прочность зависит от числа циклов нагружения образца или детали.

Поэтому ориентировочной характеристикой кавитационной стойкости материала может служить, очевидно, макроусталостная прочность, определяемая в коррозионных условиях.

Более точной характеристикой кавитационной стойкости материала служит удельная работа деформации твердого тела S кг/см². Для определения объемных потерь тела за счет кавитации выводится формула (согласно [15, р. 24]):

$$\Delta = 9,24t/S \text{ см}^3 \text{ или } \Delta/\Delta_0 = S_0/S,$$

где t час. — продолжительность кавитации.

Ниже приводятся значения S для ряда материалов [15, 40]:

Баббит	25
Пластмасса СТЭР	45
Алюминий, чугун	40—81
Мягкая сталь (сталь 3)	200—225
Медь	703
Латунь	630—880
Бронза	1020
Сплав «Нева»	1210
Нержавеющие стали	2750

Для сравнительной оценки КС одностипных материалов найдены зависимости Δ (см³, мг) от предела текучести, предела прочности на сжатие или от твердости по Бринелю (см. табл. 3).

§ 10. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ И ПАРАМЕТРОВ КАВИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ТЕЛ

Свойства жидкости оцениваются множеством параметров. Численные оценки наиболее важных из них с точки зрения влияния на КР тел приведены в таблице 1.

Используя эти и другие сведения, а также известные закономерности, на рис. 1а построены графики $\Delta(x)$ в зависимости от каждого из параметров кавитационной системы. На рис. 1б построены предположительные зависимости.

Масштабы кривых на обоих рисунках не совпадают. Графики $\Delta(x)$ могут служить основанием для выбора или разработки смазочно-охлаждающих жидкостей.

Для строгих расчетов графики рис. 1 непригодны, поэтому необходимо установить более точные зависимости $\Delta(x)$, что составляет содержание настоящего параграфа.

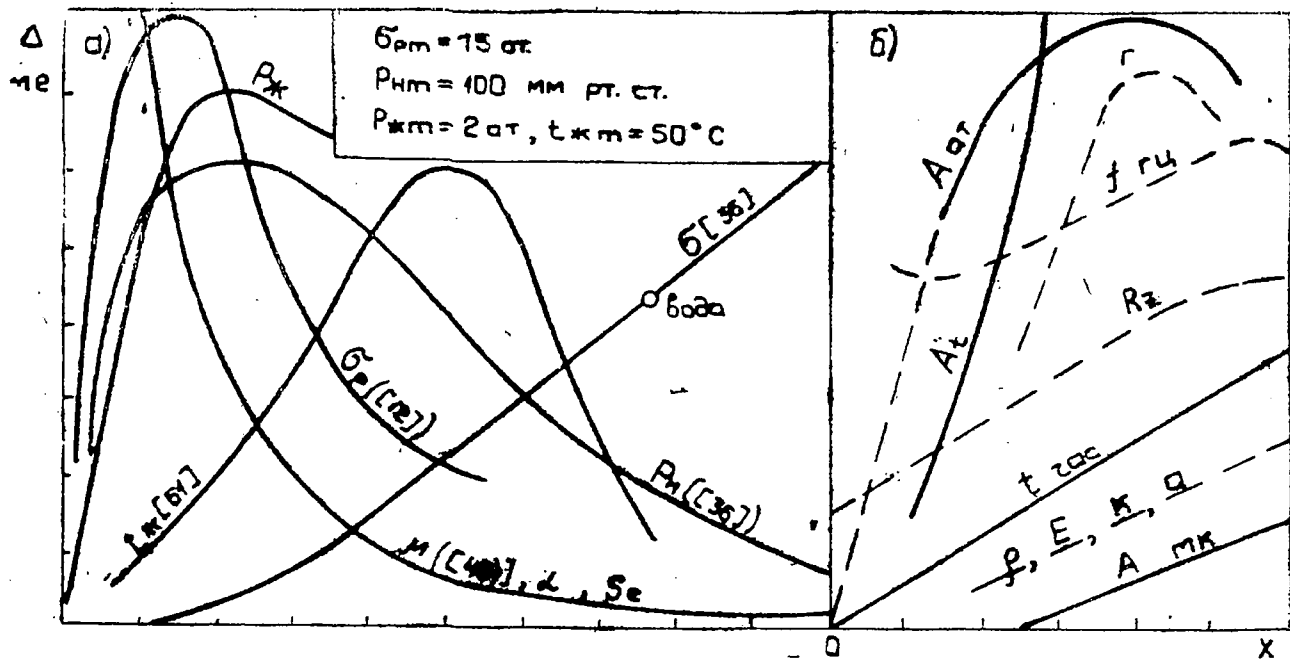


Рис. 1. Зависимость интенсивности кавитационного разрушения тел от параметров КСИ.

Таблица 1

	Δ мг	$\frac{\Delta}{\Delta_1}$	ρ г/см ³	μ спз	μ' спз	μ^* спз	σ дин/см	P' мм. рт. ст. (41 °С)	K дж см.сек.°С	σ ат	E ат	г/г ₁	C ккал. кг.°С	α' непер см.гц ²
	(расч.)				(расч.)			упругость пара	10 ⁻³	(расч.)	10 ⁴	(расч.)		10 ⁻¹⁷
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Вода	190	1	1	0,77—1	1,6—1,8	2,6—3,1	72—76	17,5	6,0	0,02—280	2,06	1	18	25
Масло			0,9	4—1000		5—1500	18—37	(0,4—2)·10 ⁶ —	1,3—1,5		0,8—1,9			(10—20 000)
— трансформат	4,7	0,03	0,9	11			34,7	— апьезо- новое	1,34	7,8	1,79			
— касторовое	(0)	0	0,97	986	(490)	1476	36,4		0,15(50°С)	(3,9)				10900
Керосин-бензин	(25)	0,13	0,83	4			28,9	16		(2,0)	1,34			110 (воздух 30 000)
Спирт	(30)	0,16	0,8				22	40—100						
— амилловый	(17)	0,09	0,82	3			25,5	3			1,36			106
— метиловый	(30)	0,16	0,79	0,6	0,68	1,48	22,6		2,05		1,0	(10)		34
— этиловый	(30)	0,16	0,79	0,3—1,2	0,9—1,5	1,3—3,1	22,8		1,70	37	1,1	(5)		54
Анилин	(76)	0,40	1,02	4,5			42,9	0,25 (3,5)	1,72		2,8		47,7	
Бензол	(30)	0,16	0,88	0,65	64—69	65—70	28,9	100 (26°С)	1,47	157	1,5	(5,5)	32	900
Толуол	(15—32)	0,13	0,89	0,6	5,4—7,5	6—8,3	28,4	27 (67)	1,34		1,5		38	80
Фенол	(65)	0,34		11,6			40,9	(1)						
ССl ₄	(30)	0,16	1,6	0,97	51	52	27,0	100	1,08	(1,75)	1,4	(8)	31	500
Глицерин	(190)	1	1,26	1490	(455)	1945	63,4	25·10 ⁻⁶	2,88		4,6		53,3	1700
Эфир этиловый	(0)	0	0,71	0,24			17,0	500 (26°С)	1,35		0,7			140
Бутанол	(49)	0,26	0,8	1,5			22	20						
Интер. источн.	[15, 36, 40, 61]				[10, 30]			[32, 54]		[10—12]		[55 61]	[10]	[10, 14, 32, 33]

Указанные в таблице 1 значения Δ взяты из работы [40, т. 18], значения Δ/Δ_0 (относительно воды) рассчитаны в соответствии с некоторыми указаниями, содержащимися в работах [15, р. 26; 40, р 15 и 16; 61, с. 131] и в соответствии с графиками $\Delta(p')$ [7] для ряда жидкостей. На основе относительных потерь рассчитаны Δ , приведенные к условиям опытов, послуживших основанием для составления таблицы 2 [40, т. 18].

Расчетные величины ориентировочно приведены к нормальным условиям ($t=20^\circ\text{C}$, $P_0=1$ ат), как и все другие величины таблицы 1.

Выполненными исследованиями установлено, что зависимость интенсивности кавитационного разрушения (Δ мг) от различных (x) свойств КСИ имеет следующее выражение:

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta'_0 (x/x_0)^n.$$

Путем анализа и обработки существующих данных установлены опорные данные Δ_0 , Δ'_0 , n и x_0 , приведенные в таблице 3.

Исследованиями также установлены следующие зависимости вязкости от температуры и давления:

$$\lg \nu \approx (T_0/T)^t$$

при $\nu > 2$ сст и

$$\lg (\mu/\mu_0) = 0,43\alpha p,$$

где α 1/ат — пьезокоэффициент вязкости, $T^\circ\text{K}$, p ат. Значение параметров T_0 , t , μ_0 и α определены (см. табл. 4 и 5) на основе данных, приведенных в работах [60, р. 2] и [50].

Как видно из таблицы 3, зависимость $\Delta(x)$ в случае $n=1$ является прямолинейной и логарифмически прямолинейной в случае $\Delta_0=0$. Наличие двух показателей степени (n_1 и n_2) свидетельствует о наличии излома на логарифмически прямолинейной зависимости (максимума в рассмотренных случаях).

На основе изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Впервые установлены прямолинейные или логарифмически прямолинейные зависимости интенсивности КР от ряда параметров КСИ, удобные для использования в расчетах.

2. Установлено, что вязкость (и звукопоглощаемость, зависящая, главным образом, от кинетической и объемной вязкости) жидкости играет исключительно важную роль в кавитационных явлениях, в КР, чем остальные свойства её. С повышением вязкости снижается интенсивность КР тел.

Ранее роль вязкости в кавитационных явлениях была неопределенной, однако считали ее весьма незначительной.

3. Хотя объемные потери веса тел (Δ мг) за счет кавитации растут линейно с течением времени, максимальная глубина эро-

Таблица 2

№№ п/п	[40, табл. 18]			
	ρ г/см ³	ν сст	σ ди/см	
1.	Вода дист.	1,00	0,77	76,5
2.	H ₂ O+H ₂ SO ₄ (95+5) %	1,058	0,83	76,1
3.	—«— (75+25) %	1,226	1,20	71,2
4.	—«— (50+50) %	1,424	2,99	65,5
5.	Вода+масло (М)	1,00	0,77	34,6
6.	H ₂ O+H ₂ SO ₄ (75+25) % +М	1,226	1,20	32,0
7.	H ₂ O+HCl (75+25) % +М	1,100	0,76	49,1
8.	H ₂ O+HCl (95+5) % +М	1,057	0,86	41,0
9.	Пиронафт	0,838	4,98	32,3
10.	Пиронафт+хлороформ	0,993	1,86	31,5
11.	Трансформаторное масло	0,897	10,95	34,7

$\mu = \nu \rho$			[55]		
Δ мг	Δ' мг/мин	μ спз	спз	σ ди/см	P' мм рт. ст.
190	1,37	0,77	(1,00)	73	(17,5)
174	1,13	0,86	1,21	73,2	17,1
154	1,44	1,47	1,90	74,6	14,1
77	0,73	4,27	4,15	75	6,0
145	1,26	0,77			
166	1,27	1,47	1,90		
156	1,10	0,84	1,08	72,5	15,9
164	2,36	0,91	1,53	71,1	9,3
1,2	0,010	4,16			
39	0,420	1,82			
4,7	0,047	9,80			

Таблица 3

№№ п/п	Параметры КСИ — X	Δ_0 М ²	Δ_0' М ²	X_0	Расчет по форм., в сст			Основание
					ν_{20}	ν_{50}	ν_{100}	
1.	Вязкость — спз	0	100	1,2	—1,4	—	—	[40, 15]
2.	Поверхностное натяжение — дн/см	0	1	25	3	5	—	[40, 36]
3.	Прочность — ат	0	480	67	0,69	—1,29	—	[12]
4.	Упругость пара — р' мм. рт. ст.	0	10	70	0,86	—1,33	—	[36]
5.	Газосодержание	6,5	—0,5		1	—	—	[61, 15]
6.	Температура — °С	0	10	47	1,38	—4,35	—	[36, 61]
7.	Давление — ат	38	—0,1	1	1	—	—	[17]
8.	Амплитуда давления внешне- го звукового поля — ат	0	0,0155	40	2,63	—1	—	[61]
9.	Амплитуда давления звуково- го поля пузырьков — ат	0	Δ_0'	1	2	—	—	[61]
10.	Амплитуда колебаний образца — мк	—25 Δ_0'	Δ_0'	1	1	—	—	[40]
11.	Удельная работа деформации твёрдого тела — кг/см ²	0	0,04 см ³	200	—1	—	—	[15, 40]
12.	Твёрдость по Бринелю кг/см ²	0	10	700—245	—2,5	—	—	[16]
13.	Средняя высота микронеров- ностей — мк	0,5	0,2	1	1	—	—	[66]
14.	Продолжительность кавитаци- онного воздействия — час.	0	Δ_0'	1	1	—	—	

Таблица 4

№№ п/п	Масла	T_0 °К	τ	Расчет по форм., в сст			
				ν_{20}	ν_{50}	ν_{100}	ν_{300}
Нефтяные							
1.	Трансформаторное	315	4,45	22	8	2,8	1,18
2.	ИС-12	330	4,35	40	11	3,5	1,23
3.	ИС-45	370	3,85	200	40	8,3	1,55
4.	Турбинное 22	342	4,75	100	20	4,4	1,23
5.	Турбинное Т Сп 22	337	4,55	63	16	4	1,23
6.	Авиационное МС-20	400	3,60	1000	141	20	1,9
7.	Тракторное АК-15	382	4,10	1000	100	13	1,55
8.	Цилиндровое 52	430	3,65	10000	630	40	2,25
Синтетические							
9.	Полиметил-силоксан	485	1,39	100	56	25	6,3
10.	Полиметилфенилсилоксан	420	2,45	200	70	20	3
11.	Эфирное	320	3,65	22,5	9	3,5	1,3
12.	Фторхлоруглеродное	360	7,4	10000	100	5	1,1

Таблица 5

№№ п/п	Масло [50, т. 2 и р. 3]	°С	μ_0 спз	$1/\alpha$ $\alpha \cdot 10^3$
1.	Керосин	27	1,9	1,07
2.	Нафтовое	38	16	1,65
		100		0,94
3.	Парафиновое	20	2,8	1,10
		100		0,50
4.	МС-20	20		1,15
5.	Турбинное	38	30	1,96
6.	Цилиндровое	54	442	2,42
7.	Моторное	38	40	2,44
		38	105	3,15
		82	7	2,07
8.	Веретенное	20		0,94
9.	Глицерин	34	200	0,57
10.	Касторовое	38	266	1,44
		100	20	0,35
11.	Полисилоксановое	24	13	0,50

зионных повреждений (h мм) растет замедленно, в частности, в соответствии с зависимостью (см [15, р. 32]) $h^2 \approx 0,1 \Delta - 20$, что можно объяснить, как представляется, ростом зазора между излучающей поверхностью (магнитоостриктора) и дном раковины.

КАВИТАЦИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ ЗУБЬЕВ

Как известно, в закрытых зубчатых передачах зубья, рассчитанные на контактную прочность с привлечением совершеннейшего теоретического аппарата, опыта конструирования, производства и эксплуатации, разрушаются, как принято называть, от питтинга.

Притом установлена неизбежность питтинга в случае (обильной) смазки зубьев, составлена довольно убедительная модель действия смазки в явлении питтинга, необходимым условием возникновения которого считают возникновение усталостных трещин на поверхности зуба.

Находит некоторое объяснение избирательное разрушение именно ножек зубьев, хотя объяснение питтинга у полюсной линии довольно-таки неубедительно.

Объяснение же природы питтинга как кавитационной разрешает многие вопросы, касающиеся причин разрушения зубьев, и открывает новые возможности (известные как меры борьбы с кавитацией) для повышения стойкости зубьев закрытых передач.

Возможность кавитации в тонких пленках (толщиной до 70 мк) доказывается в работе [35, стр. 89—96]. Количество же пузырьков при данной толщине масляного слоя увеличивалось с повышением скорости скольжения тел и вязкости жидкости, с уменьшением максимальной толщины масляного слоя (минимального зазора между сферой и плоскостью). Поэтому кавитационное разрушение зубьев вполне возможно.

В закрытых зубчатых передачах присутствуют почти все факторы, вызывающие кавитацию. Например, баротермическое состояние жидкости изменяется скачкообразно в местах, где обычно возникают ямки выкрашивания — кавитационные раковины.

Ядра кавитации присутствуют как на поверхности зубьев (в виде развитых в микротрещины или первоначальных впадин микронеровностей — в виде микропор), так и в толще жидкости в виде мельчайших пузырьков.

Ядра кавитации в смазке образуются также вследствие химических реакций — разложения смазки, ускоряемой не только локальными тепловыделениями, в десятки и более раз превосходящими температурный барьер стойкости смазки, но и высокими давлениями, звуковыми колебаниями в жидкости.

Задействование ядер кавитации вызывают не только вспышки высоких локальных температур, но и, в большей мере, звуковые колебания в жидкости, порождаемые сложными колебаниями поверхности зуба.

§ 11. ПРИЧИНЫ И ХАРАКТЕР КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ЗУБЬЕВ

Характер кавитационного разрушения ряда деталей машин и образцов достаточно изучен, иллюстрации их приведены в работах [14, 12, 40]. Питтинг — усталостное выкрашивание зубьев — наиболее полно описан и иллюстрирован в работе [59]. Сравнение последних с первыми показывает, что характер кавитационного и питтингового разрушения одинаков. Возможность же кавитационного разрушения зубьев была обоснована выше. На основе материалов, изложенных в работе [35], в отношении разрушения подшипников качения также можно заключить, что в этом случае питтинг имеет кавитационную природу.

Кавитационное разрушение рабочих поверхностей зубьев (независимо от материала их) во времени протекает следующим образом.

За время некоторого инкубационного периода на поверхности зуба не появляются такие раковины, которые обнаруживались бы невооруженным глазом. Затем появляется мельчайшая сыпь вкраплин, которые вырастают с течением времени. Наконец, эти зародыши превращаются в натуральные раковины, которые, разрастаясь и сливаясь, образуют канавки, располагающиеся вдоль зуба.

Как правило, раковины разрастаются по поверхности быстрее, чем вглубь тела. Это объясняется следующим: зерна металла, лежащие ближе к поверхности, обладают меньшим числом связей с другими структурами; влиянием сил трения скольжения и касательных напряжений; ростом зазора между дном раковины и поверхностью, излучающей колебания.

В инкубационный период происходит скалывание, срез выступов микронеровностей, вырывы частиц металла при разрыве молекулярно-механических связей, что рассматривается как износ от трения скольжения и качения, природа которых объяснена выше. Явления скалывания и среза ВМН носят в подавляющей степени усталостный характер — разрушаются вследствие многократных деформаций сжатия, растяжения и сжатия при изгибе, вследствие многократных сдвиговых деформаций. Вместе с тем кавитационное нагружение, вызывающее усталостные явления, ускоряет разрушение ВМН, сокращает инкубационный период.

В течение инкубационного периода поверхность зуба подготавливается к интенсивной кавитационной деятельности: обнажаются чистые структуры, на которых ускоряются коррозионные явления, отпадают некоторые связи зерен, растет число КЯ и их мощность (глубина и объем микропор); поверхностный слой материала зуба чуть ли не превращается в слой разрозненных зерен, границы которых поражены коррозией.

В инкубационный период немаловажная роль кавитации также состоит в преодолении поверхностной защиты (окисная пленка и адсорбционный слой препятствуют распространению коррозии); в порождении более мощных кавитационных ядер, чем впадины микронеровностей чисто обработанных зубьев; в микро-микроразрушении поверхностного слоя (зерен и их границ); в разъединении поверхностного слоя материала зуба на микроструктуры коррозионным поражением.

Если даже поверхности зубьев имеют очень высокий класс чистоты, на них образуются микропоры вследствие кавитации, вызванной образованием КЯ и КП при отрыве зубьев. Отрыв зубьев, как уже отмечалось, вызван колебаниями — вибрацией в передаче.

Высокие контактно-кавитационные баротермические нагрузки вызывают усталость зерен и их границ, ускоряют коррозию. Ударные волны, вызванные колебательностью поверхности зуба, приводят к задействию КЯ и КП, имеющих свою частоту пульсаций и смыкания, благодаря чему развиваются колоссальные баротермические напряжения исключительно локального характера.

Таким образом, поверхностные структуры подвергаются нагрузкам, имеющим самый широкий спектр частот колебаний, в условиях которых зерна металла или другие структуры могут оказаться в резонансном режиме нагружения, приводящем к их разрушению даже при невысоких нагрузках.

§ 12. ПРИЧИНЫ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ НОЖЕК ЗУБЬЕВ

На сегодня имеется довольно удачное объяснение избирательного характера разрушения ножек зубьев поведением усталостных трещин на поверхностях зубьев: микротрещины головок зубьев замыкаются до подхода к зоне контакта, тогда как микротрещины ножек зубьев максимально раскрываются к этому моменту. Это вызвано соответствующей направленностью сил трения на головках и ножках зубьев.

Однако попытаемся несколько уточнить и дополнить представления об избирательном характере разрушения ножек зубьев.

Во-первых, впадины микронеровностей играют ту же роль, что и усталостные микротрещины в избирательном кавитационном разрушении.

Во-вторых, вместо статического действия жидкости в трещине надо признать динамическую деятельность КЯ в ней.

В-третьих, микротрещины, впадины микронеровностей первоначально направлены радиально, развитие же их идет по поверхности эффективных напряжений, являющихся трансформированным зеркальным отражением эюпы нормальных напряжений, зафиксированной в момент мгновенной ударной перегрузки.

Отклонение поверхности развития трещины от радиальной происходит, благодаря отрицательному (в глубину) градиенту нормальных напряжений и особенно касательных напряжений, вызванных силами трения, благодаря тому, что нижележащие структуры обладают большим числом связей (менее обнажены), чем поверхностные.

Ориентированный наклон первоначальных микротрещин не может быть столь значительным, каким представляется в существующих описаниях. Набегающие микротрещины ведомого ролика (зуба) раскрываются, а ведущего—замыкаются, если даже отсутствует проскальзывание их. Это видно по модели (рис. 2) с резиновыми роликами, на торцах которых нанесены метки, имитирующие микротрещины.

На ведомый ролик (на его ВМН) действует окружная сила P_{12} . На ведущий ролик в зоне контакта действует сила трения F_{21} — суммарная реакция ВМН ведомого ролика.

Силы молекулярного сцепления роликов в зоне контакта учитываются как реакции ВМН. Силы трения скольжения от качения также замыкают микротрещину ролика 1, раскрывают МТ ролика 2 при попадании их в зону контакта,

На набегающем участке ведущего ролика 1 метки сужаются — трещины замыкаются (КЯ выжимаются), а у ведомого ролика 2 — расширяются.

Вследствие отмеченного поведения микротрещин (ведомого ролика) в них функционируют КЯ под влиянием изменяющихся (колебательно) нагрузок — СНД и сил трения.

Отрыв зубьев вследствие колебательности системы приводит к внезапному замыканию трещин, что также приводит к воздействию КЯ — выдуванию пузыря и последующему смыканию. Перед тем (при расширении трещины) в КЯ диффундируют пары смазки и засасывается воздух, так что имеет место падение давления в КЯ и последующее внезапное нагружение.

Внезапное изменение нагрузки на КЯ происходит также у полюсной линии по причине скачкообразного падения сил трения от максимума до 0 и снова до максимума.

При таком резком скачке сил трения смазочная пленка разрывается, образуя кавитпузырьки, поэтому происходит КР у полюсной линии.

Как видно из рис. 2, раскрытие МТ ведомого ролика происходит благодаря растягивающему действию окружающих сил, а замыкание МТ ведущего ролика — благодаря силам сопротивления ведомого ролика движению ведущего. Подобное происходит и при качении зубьев.

Микротрещины ножек зубьев всегда попадают в зону контакта максимально раскрытыми, тогда как МТ головок полностью замыкаются. По этой причине кавитудары действуют на раскрытые корни МТ ножек и на сомкнутую поверхность головок зубьев. Поэтому поверхности головок только наклепываются и выглаживаются,

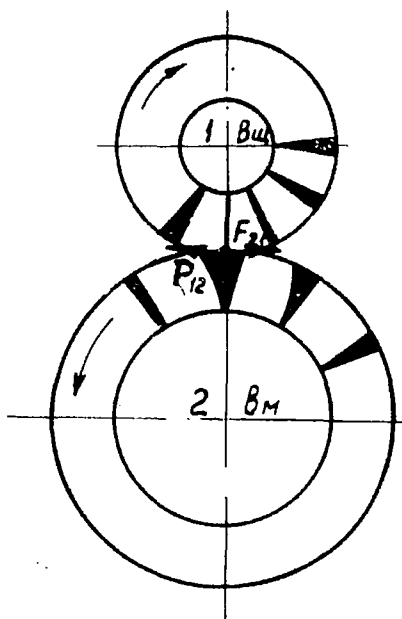


Рис. 2. Схематическое изображение поведения микротрещин под воздействием окружающих сил — сил трения.

Как установлено, микротрещины ножек зубьев развиваются в направлении движения контактной линии, т. е. против направления сил трения скольжения (см. рис. 3), что можно объяснить следующей схемой отрыва зерен, представленных в виде микроблоков. (рис. 4).

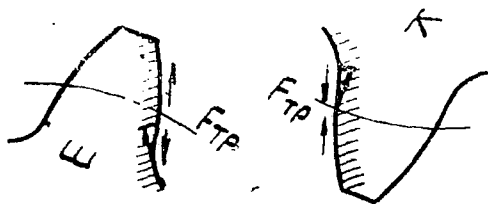


Рис. 3. Рост микротрещины на ножке зуба.

Вследствие наличия первоначальной микротрещины — впадины микронеровности I блок a отжимается силой трения F влево, коррозия и кавитудары разрушают последовательно связи 2—5.

Трещина с течением времени углубляется ступенчато до уровня максимальных эффективных напряжений. Благодаря образованию микроконсоли, нависающей над трещиной блока зерен, поверхность эффективных напряжений получает направление к поверхности детали.

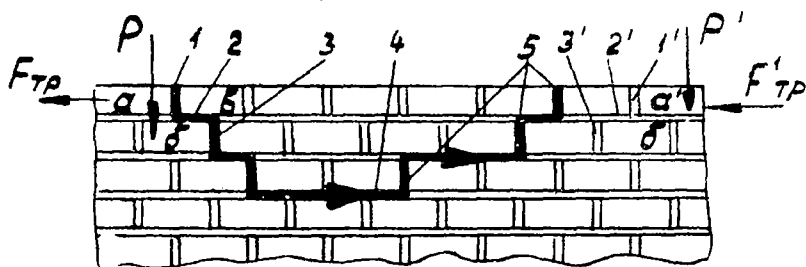


Рис. 4. Схема роста микротрещины в направлении, противоположном направлению сил трения, и схема замыкания микротрещины в направлении сил трения.

Как только осколок выходит из зоны контакта, он выворачивается наружу парогазовым давлением кавитационного ядра и жидкости трещины, преодолев изгибное сопротивление последней связи.

Раковина (и осколок) получается веерообразной, поскольку

фронт электрохимического растворения материала (границ зерен или зерен) расширяется с течением времени.

Развитие же МТ в направлении F' затрудняется самими силами трения, как это видно из рис. 4: микротрещина $1'$ замыкается силами трения; перемещению блока a' в направлении силы P' препятствует даже дополнительная сила трения $F'' = f \cdot F$. Силами трения уплотняются все связи типа $3'$, благодаря чему затруднен разрыв связей типа $2'$.

Однако вследствие цикличности сил трения со временем наступает усталость границ (типа $1'—3'$) — происходит подготовка поверхностного слоя к задиру-заеданию.

§ 13. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЗУБЬЕВ

Задача повышения долговечности закрытых передач является в некотором смысле многомерной. Изменения, вносимые в передачу для повышения одних качеств, вызывают снижение других (хотя в некоторых случаях одновременно улучшается ряд свойств, параметров). Например, смазка снижает износ, но вызывает КР зубьев; повышение твердости поверхностного слоя зуба увеличивает опасность растрескивания его при изгибе; коррекция зубьев связана с ограничением по заострению зубьев и коэффициенту перекрытия; повышение демпфирующих свойств смазки может оказаться сопряженным с понижением прочности смазочной пленки, стойкости (долговечности) смазки.

Заметим также, что в конечном счете является главным, не все меры по повышению долговечности передач могут оказаться экономически эффективны в народнохозяйственном масштабе. Поэтому принимаемые меры должны быть экономически обоснованными.

Кавитационная стойкость зубьев может быть повышена тремя группами мероприятий:

1. Устранением кавитации.
2. Ограничением, снижением вероятности возникновения и интенсивности кавитации.
3. Улучшением сопротивляемости материала зубьев кавитационному разрушению.

Первая группа содержит в себе безжидкостные способы теплоотвода из зоны зацепления зубьев: охлаждение струей тумана, струей сжатого воздуха, внутренним теплоотводом, применением эфиров — испарительного процесса для теплоотвода и т. п.

В качестве нового способа можно предложить применение внешне охлаждаемой, гибкой непрерывной ленты, прокатываемой между зубьями.

Вторая группа включает в себя следующие основные мероприятия.

Гашение колебаний в передаче, в смазке:

— повышением звукопоглощающей способности смазки; повышение вязкости смазки, подвод воздуха — повышение газосодержания:

— применением различного рода демпферов.

Гашение колебаний колеса и тела зуба представляется возможным осуществить, например, постановкой трущегося зубчатого диска на вал этого колеса, применением двойного колеса с пружиной.

Снижение перепада давлений в процессе зацепления каждой пары зубьев:

— корригированием зубчатой передачи;

— применением косозубой передачи с целочисленным значением коэффициента перекрытия и в тех случаях, когда обычно применяются прямозубая передача;

— устранением несовершенства профилей зубьев, порождающих колебания системы.

Уменьшение, устранение поверхностных кавитационных ядер достигается повышением чистоты поверхности зубьев.

Третья группа охватывает ту часть известных мероприятий по повышению кавитационной стойкости материалов, которая согласуется с условиями работы зубчатых передач: цикличность и скачкообразность высоконапряженного контактного и изгибного нагружения — сложный спектр колебаний поверхности зуба, трение качения и скольжения и т. д.

К третьей группе мероприятий относятся:

— повышение прочности зерен и их границ и достижение их равнопрочности;

— нанесение кавитационностойких покрытий (хромирование) и химико-термическая обработка поверхностей зубьев.

Возможно, окажется эффективной оптическая закалка поверхностей зубьев, если учесть к тому же, что при этом должно произойти оплавление ВМН, обуславливающих возникновение первоначальных КЯ.

Ряд мероприятий из перечисленных приводит к уменьшению сил трения скольжения — износа, благодаря чему возникают впадины микронеровностей (источники КЯ) — микроскопические концентраторы напряжений, вызывающие направленный рост микротрещин.

КОРРИГИРОВАНИЕ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ С ЦЕЛЮ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ (КАВИТАЦИОННОЙ) СТОЙКОСТИ ЗУБЬЕВ

Известно, что усталостное выкрашивание поверхностей зубьев закрытых передач происходит тем интенсивней, чем больше максимальные контактные напряжения σ и $\tau=0,347\sigma$. Выше была установлена кавитационная природа усталостного выкрашивания зубьев закрытых передач.

Явление кавитации и кавитационное разрушение обуславливается не столько абсолютными величинами σ и τ , как их изменением, особенно скачкообразным перепадом, вызванным колебаниями зубьев — разрывом контакта (изменением масляного зазора в контакте).

Наибольший скачок σ и сил трения скольжения F наблюдается особенно на ударном входе и выходе зубьев из зацепления. «Плавное» изменение σ происходит вследствие изменения приведенной кривизны пары зубьев вдоль линии зацепления (вдоль профилей зубьев).

Скачкообразным изменением сил трения скольжения от 0 до F в полюсе можно объяснить усталостное выкрашивание — КР у полюсной линии (а не потому, что в полюсе зацепления σ_6 принимает максимальное значение, как принято считать). На самом деле σ_6 в полюсе зацепления меньше напряжений в других точках зацепления.

§ 14. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЙ МАКСИМАЛЬНЫХ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ВДОЛЬ ЛИНИИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ — ВДОЛЬ ПРОФИЛЯ ЗУБА

Максимальные контактные напряжения определяются по известной формуле:

$$\sigma = 0,418(qE)^{0,5}/\kappa, \quad (1)$$

где параметр контактной жесткости

$$\kappa = R^{0,5} = (R_1 R_2 / L)^{0,5}. \quad (2)$$

Соотношение радиусов кривизны контактирующих зубьев R_1 и R_2 , их произведение изменяется от одной точки линии зацепления к другой, хотя сумма их $L = (i+1)R_{16}$ остается постоянной.

Контактное напряжение σ будет наименьшим в точке наибольшей контактной жесткости 5, где κ примет наибольшее значение. Исследованием функции κ (или приведенного радиуса кривизны R) на экстремум находим, что точка 5 располагается посередине теоретического участка линии зацепления (ТУЛЗ), что $R_{15} = R_{25} = L/2$ и $R_5 = L/4$. Приведенный радиус кривизны в полюсе зацепления

$$R_6 = i R_{16}^2 / L = L i (i+1)^{-2}. \quad (3)$$

Как видно из этой формулы, полюс зацепления 6 может совпадать с центром жесткости 5 только при $i=1$.

Обычные расчеты на контактную выносливость выполняются в предположении, что σ_6 превосходят максимальные контактные напряжения всех остальных точек профиля зуба. На самом же деле $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_6 > \sigma_5$, где σ_2 и σ_1 — максимальные контактные напряжения на выходе и входе в зацепление, на концах рабочего участка профиля зуба, где обычно наблюдается КР ножек зубьев обоих колес.

Определим, как изменяется величина максимальных контактных напряжений вдоль профиля зуба. Выразим σ через наименьшие контактные напряжения σ_5 :

$$\sigma = \sigma' \sigma_5, \quad (4)$$

где

$$\sigma' = \kappa_5 / \kappa = (R_6 / R)^{0,5}. \quad (5)$$

Подставим в эту формулу значение $R = 4R_5 q_1 (1 - q_1)$, где $q_1 = R_1 / L$. В результате получим, что

$$\sigma' = 0,5 / (q_1 - q_1^2)^{0,5} = 0,5 (1+j) : j^{0,5}, \quad (6)$$

где $j = R_2 / R_1$ — отношение радиусов кривизны зубьев в рассматриваемой (текущей) точке линии зацепления. График зависимости $\sigma'(q_1)$ приведен на рис. 5. В полюсе зацепления

$$\sigma_6' = 0,5 (i+1) : i^{0,5}.$$

Положение полюса зацепления относительно точки 5 изменяется в зависимости от i в соответствии с формулой $q_{16} = 1 / (i+1)$ и графиком $q_{16}(i)$ на рис. 5.

Для графического определения σ_1' и σ_2' на рис. 5 выделен рабочий участок 1—2 линии зацепления (РУЛЗ). Размер

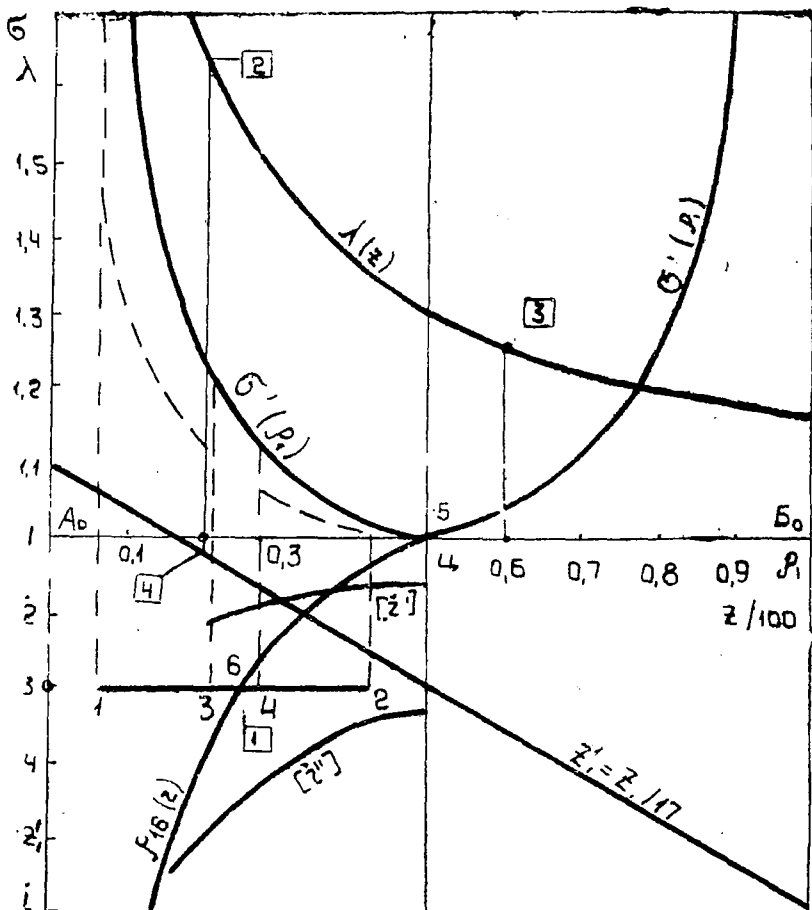


Рис. 5. Графики для расчета коррекции зубчатой передачи.

РУЛЗ и её положение на линии зацепления определяется радиусами кривизны R_{12} и R_{21} , которые вычисляются по формулам:

$$R_{12} = R_{16} \cdot \lambda_1 \quad \text{и} \quad R_{21} = R_{26} \cdot \lambda_2, \quad (7)$$

где:

$$\lambda \approx (1 + 34,2 f_0 / z)^{0,5} \quad (8)$$

при угле зацепления $\alpha_0 = 20^\circ$. График функции $\lambda(z)$ приведен на рис. 5.

Из формулы (6) следует, что при $i > 1$ параметр $\lambda_2 < \lambda_1$, но так как $R_{26} > R_{16}$ в большей степени, то $R_{21} > R_{12}$.

Как показывают расчеты, $L_{16} > L_{26}$, поэтому РУЛЗ 1—2 располагается на линии зацепления с небольшой несимметричностью относительно полюса б. Относительно же центра жесткости 5 РУЛЗ смещается намного с ростом передаточного отношения.

Построение участков однопарного (3—4) и двухпарного (1—3 и 4—2) зацепления выполняются, откладывая от точек 1 и 2 основной шаг $t_0^1 = t_0/L \approx q_{16} z_1 / 17$. Значения q_{16} определяются по графикам рис. 5. Коэффициент перекрытия находится, как отношение отрезков $L_{12}/L_{14} = \epsilon$.

Расчет зацепления производится в порядке номеров в квадратах (рис. 5). Сплошными точками отмечены исходные данные. Напряжения в точках 1—4 находятся на кривой σ' , как ординаты первых. На рис. 5 показано решение задачи для случая $i=3$ и $z_1=20$.

Действительные значения геометрических параметров и напряжений находятся перемножением их относительных величин на действительное значение L для первых и на σ_5 для вторых.

Считают, что в период двухпарного зацепления нагрузка между обими парами зубьев распределяется равномерно. Если исходить из этого, то на участке двухпарного зацепления

$$\sigma = 0,71 \sigma' \sigma_5.$$

В действительности же давление между обими парами зубьев будет распределяться неравномерно, ввиду различной изгибной жесткости каждой пары почти в любой момент двухпарного зацепления.

Более того, вследствие колебания зубьев и примыкающих механических систем (колесо-вал и т. д.) возможен разрыв контакта (перепад давления) в одной из пар зацепления, особенно в начале и в конце зацепления пары зубьев; полная, даже увеличенная вследствие удара, нагрузка воспринимается другой контактной парой.

Об ударном перепаде давлений в точках 1—4 свидетельствуют достаточно четко выраженные цепочки кавитационных раковин вдоль образующих профиля зуба, проходящих через эти точки (кавитацию вызывает именно перепад давления).

Каков перепад давлений контактных напряжений в точках 1—4 (возможен перепад давлений и в других точках, что вызывается колебаниями системы зуб-валопроводы и внешней нагрузки), можно оценить по графику $\sigma'(j)$ после построения этих точек на линии зацепления. При любых передаточных отношениях $\sigma_1 > \sigma_3 > \sigma_5$.

Поэтому расчет на контактную выносливость (по сути дела на КС) следует вести, поставив условие $\sigma_1 \leq [\sigma]$ вместо обычно применяемого $\sigma_6 \leq [\sigma]$.

§ 15. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЬШИХ ЗНАЧЕНИЙ МАКСИМАЛЬНЫХ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Величину σ_1' можно определить по графику рис. 5 или аналитически по формуле 6. В случае плавной передачи, когда нагрузка между двумя парами зубьев распределяется поровну, расчет ведется по условию $\sigma_3 = \sigma_3' \sigma_5 \leq [\sigma]$. Для определения σ_3' найдем

$$j_3 = R_{23}/R_{13} = (L - R_{13})/R_{13}, \quad (9)$$

где

$$R_{13} = R_{12} - t_0 = R_{16}(\lambda_1 - t_0/R_{16}).$$

Величина $t_0/R_{16} = 17/Z_1$ при $\alpha_0 = 20^\circ$. Поэтому $R_{13} = R_{16} \cdot \lambda_{13}$, где $\lambda_{13} = \lambda_1 - 17/Z_1$.

Подставив в формулу (9) выражение для R_{13} , получим:

$$j_3 = (i+1)/\lambda_{13} - 1.$$

Тогда

$$\sigma_3' = 0,5(1+j_3)/j_3^{0,5}.$$

Расчетные формулы

Для вывода расчетных формул необходимо выразить погонную нагрузку q через задаваемые и конструктивные параметры [18, 22]:

$$q = 2 \cdot 97400 \text{ N K/p } d_1 \text{ B Cos } \alpha_0 \text{ кг/см,}$$

где K — коэффициент нагрузки, N квт — передаваемая мощность, p — число оборотов шестерни, d_1 и B в см — диаметр начальной окружности и длина зуба шестерни в прямозубой цилиндрической передаче.

Зная σ' , q и приведенный модуль упругости E , определяются напряжения в характерных точках диаграммы зацепления:

$$\sigma_5^2 = u/(i+1),$$

где

$$u = 294 \text{ 000 ENK/nd}_1^2 \text{ B Sin } 2\alpha_0.$$

§ 16. КОРРИГИРОВАНИЕ ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Из формулы (4) следует, что при $i > 1$ максимальные контактные напряжения могут быть уменьшены: снижением σ' (точнее

σ'_1 и σ'_3) — смещением РУЛЗ до момента совпадения середины участка 1—2 с точкой 5; снижением σ_5 .

Если выравнивание σ' производится равным и противоположным смещением инструментальной рейки, то уменьшение σ_5 может быть достигнуто положительным смещением инструментальной рейки при нарезании шестерни и колеса, точнее при $\xi_0 > 0$.

Корригирование при $\xi_0 = \xi_1 + \xi_2 = 0$ называется высотным, т. к. при этом увеличивается высота головки зуба шестерни, высота же головки зуба колеса убывает, угол давления α_0 не изменяется.

Корригирование при ξ_0 , не равном 0, называется угловым в связи с изменением угла давления в соответствии с формулой [18]:

$$\cos \alpha = \cos \alpha_0 / (2a/Z_0 + 1).$$

При этом изменяется межосевое расстояние: $A = A_0 + am$, где $a = 0,5Z_0 (\cos \alpha_0 / \cos \alpha - 1)$.

Найдем достаточно точное приближенное выражение инволютной функции $\operatorname{inv} \alpha - \operatorname{inv} \alpha_0 \approx 0,465 \cos \alpha (\cos \alpha_0 / \cos \alpha - 1)$ и с учетом формулы (10) преобразуем известную зависимость для ξ_0 ([18]), в результате чего получим, что

$$\xi_0 = 1,2 a / (2a/Z_0 + 1) \approx 1,2a.$$

Ввиду того, что $a < \xi_0$, требуется обратное смещение инструмента $\psi = \xi_0 - a$ для обеспечения нормальных зазоров в зацеплении.

Увеличение угла давления приводит к росту A и L , а также (приведенного) радиуса кривизны любой точки контакта внешним образом (точки A_0 и B_0 как бы занимают новые раздвинутые положения A и B на рис. 5), т. е. к уменьшению σ_5 . При этом относительное положение полюса зацепления на линии AB не изменяется, только увеличивается расстояние h между точками 5 и 6:

$$h = 0,5(L - L_0)(i - 1)/(i + 1).$$

Оптимальная коррекция достигается при выполнении условия

$$\sigma'_1 = \sigma'_2 \quad \text{или} \quad R_{21} = R'_{12}. \quad (11)$$

Графоаналитический расчет (оптимальной) коррекции намного упрощается применением специального планшета с (подвижными) графиками, изображенными на рис. 5.

Выше было установлено, что удельное скольжение и относительный износ возрастает к концам РУЛЗ при сухом трении. В закрытых передачах тоже возникают подобные условия

вследствие разрыва смазочной пленки по причине неизбежных колебаний в передаче. Изгибная жесткость зубьев снижается к концам РУЛЗ — возрастают колебания — чаще разрывается смазочная пленка.

В отношении абсолютного износа заметим, что если скорость скольжения мало влияет на коэффициент сухого трения, то сила трения возрастает в соответствии с зависимостью $dF=f \cdot \sigma \cdot B \cdot dx$, где l тоже растет с повышением σ , особенно в условиях полужидкостного трения.

Величина сил трения скольжения главным образом зависит от давления в контакте. Поэтому предлагаемый способ корригирования, направленный на снижение σ , одновременно решает задачу снижения трения — корригирования по трению.

1. ВЫСОТНАЯ КОРРЕКЦИЯ

Величина σ'_1 убавляется до предела конструктивным способом (изменением геометрии зацепления), совмещением середины РУЛЗ с точкой 5. Это достигается равносмещенным корригированием. Притом ω_5 и σ_5 остаются неизменными.

Обычное корригирование с целью выравнивания удельных скольжений тоже выполняется смещением РУЛЗ.

Вследствие корригирования (смещением РУЛЗ относительно точки 5) полюс зацепления может оказаться на участке двухпарного зацепления и вне РУЛЗ.

Для оптимального корригирования необходимо выполнить условие (11), преобразующееся к виду:

$$r'_2{}^2 - r'_1{}^2 = r_{02}{}^2 - r_{01}{}^2,$$

где r' — радиус окружности выступов зубьев — максимальный радиус ЗК.

После несложных преобразований последней формулы получим значение требуемого смещения инструмента:

$$\xi_1 = [(i-1)f_0 + (i^2-1)\text{Sin}^2 \alpha_0 \cdot Z_1/4] : (i+1+4f_0/Z_1). \quad (13)$$

Требуемое смещение ξ_1 возрастает почти линейно в зависимости от i и Z_1 в отдельности. Например, $\xi_1 = 0,65i - 0,5$ при $Z_1 = 18$ и $\xi_1 \approx 0,294 + 0,0288Z_1$ при $i=2$.

Для графического определения σ'_1 и σ'_3 в корригированном зацеплении строится диаграмма этого зацепления, определив по вычисленной величине ξ_1 радиуса

$$R_{21} = m[(Z_2/2 + f_0 - \xi_1)^2 - (Z_2 \cos \alpha_0)^2/4]^{0,5}$$

и

$$R_{12} = m[(Z_1/2 + f_0 + \xi_1)^2 - (Z_1 \cos \alpha_0)^2/4]^{0,5}$$

и откладывая шаг t'_0 на РУЛЗ.

Однако может оказаться, что выравнивание σ' невозможно, так как ξ_1 ограничено по условию заострения зуба шестерни $s = S'm \gg [S]$. Толщина зуба на окружности выступов находится в следующей зависимости от смещения инструмента [41]:

$$s = [Z + 2(1 + \xi)](S/2r - j'), \quad (14)$$

где

$$j' = \text{inv } \alpha' - \text{inv } \alpha_0 \approx \text{tg}^3 \alpha_0 (\lambda_3^2 - \lambda_3) : (1 + \lambda_3 \text{tg}^2 \alpha_0).$$

При $\alpha_0 = 20^\circ$ получим:

$$\begin{aligned} \lambda_3^2 &= 1 + (1 + \xi)(1 + \xi + Z)34,2 : Z^2; \\ j' &\approx (0,9 + 1,05\xi) : Z. \end{aligned} \quad (15)$$

Подставляя в формулу (14) значения j' и относительной толщины корригированного зуба по делительной окружности $S/2r$, получим, что

$$s = (1 + 2/Z + \xi/Z) [\pi/2 - 0,9 - (2 \text{tg } \alpha_0 - 1,05) \xi].$$

Из последней формулы находим, что при $\alpha_0 = 20^\circ$ ограничение $s \geq [S]$ соблюдается, если

$$\xi \leq [\xi] = - (0,25Z - 0,55) + [Z^2/16 + (0,77 - 1,56[S])Z + 2,4]^{0,5}.$$

Если $[S] = 0,4$, то смещение $[\xi'] = 1,1; 1,0; 0,95$ при $Z = 17; 30; 100$. Поскольку ограничение $[S] = 0,4$ не столь строгое, допускает отклонения до 10%, то можно принимать $[\xi'] = 1$ при любых значениях $Z \geq 17$.

В случае $[S] = 0,2$, смещение $[\xi''] = 1,6$ при любых значениях $Z \geq 17$. При угловом корригировании:

$$[\xi] \approx 1 + \psi, \quad (16)$$

$$[\xi''] \approx 1,6 + \psi. \quad (17)$$

Определим, при каких значениях i можно выравнивать напряжения σ высотным корригированием. Для этого воспользуемся формулой (13), в соответствии с которой условие $\xi \leq [\xi'] = 1$ записывается при $\alpha_0 = 20^\circ$ в виде

$$i - 1 + (i^2 - 1)Z/34,2 \leq +1 + 4/Z,$$

откуда, находим, что

$$i \leq [i'] = [1 + 34,2(2Z + 4)Z^{-2}]^{0,5}$$

Аналогичным образом находим, что

$$[i''] = 10,2/Z + [1 + 89/Z + 323/Z^2]^{0,5}.$$

По графикам $i'(Z)$ и $i''(Z)$, приведенным на рис. 5, определяются пределы высотного корригирования. При $i > [i]$ невозможно добиться повышения КС зубчатой передачи с сохранением начального межосевого расстояния A_0 , т. е. путем высотной коррекции, т. к. иначе произойдет недопустимое заострение зубьев шестерни.

2. УГЛОВАЯ КОРРЕКЦИЯ

Кавитационную стойкость зубчатой передачи в случае $i > [i]$ можно повысить применением угловой коррекции, если допускается повышение межосевого расстояния и угла давления, понижение коэффициента перекрытия.

Определим, в каких пределах можно применить угловую коррекцию по условию обеспечения заданного ограничения $\varepsilon \geq [\varepsilon]$, хотя вследствие колебательности системы зуб-колесо-валопровод полное давление может восприниматься одной парой зубьев и на участке двухпарного зацепления. По этой причине, кроме как в условиях труднореализуемой плавной передачи, контактные напряжения не понижаются с повышением коэффициента перекрытия

$$\varepsilon = L_{12}/t_0 = r_{01} \operatorname{tg} \alpha_0 \zeta / t_0,$$

где

$$\zeta = \lambda_{31} + i\lambda_{32} + (i+1)\lambda_{30}.$$

Параметр $\lambda_{30} \approx (1 + 25\xi_0/Z_0)^{0,5}$ с предельной ошибкой в 4% (при $Z \geq 17$ и $i \geq 2,4$, требующем углового корригирования).

В соответствии с формулой (15) для случая углового корригирования получим, что

$$\lambda_3 = [1 + (1 + \xi - \psi)(1 + \xi - \psi + Z)34,2/Z^2]^{0,5}.$$

В предельном случае (при $\xi - \psi = 1$, что следует из формулы 16)

$$[\xi'_0] = 2(1 + \psi).$$

Подставив значение $\psi \approx 0,17\xi'_0$ в эту формулу, получим, что предельное значение $[\xi'_0] \approx 3$ при $[s] = 0,4$.

При $Z_1 = 17; 20$ и 24 величина $\zeta = 1,1 - 1,14; 0,96 - 1,02$ и $0,84 - 0,95$ соответственно. Средняя величина ζ при различных i находится в следующей зависимости от числа зубьев шестерни ($Z_1 = 17 - 24$):

$$\xi = 1,74 - 0,035Z_1.$$

С учетом последней зависимости получим:

$$L_{12} \approx r_{01} \operatorname{tg} \alpha_0 (1,74 - 0,035Z_1);$$

$$\varepsilon \approx 0,1Z_1 + 0,002Z_1^2.$$

С увеличением Z коэффициент перекрытия повышается ($\varepsilon = 1,12$ при $Z_1 = 17$). Следовательно, если при угловом корригировании соблюдено условие отсутствия заострения зубьев $[s] = 0,4$, то одновременно соблюдается условие $[e] = 1,1$.

ВЗАИМОСВЯЗЬ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ РАЗРУШЕНИЯ ЗУБЬЕВ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ЗУБЬЕВ

§ 17. ОБОБЩЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О МЕХАНИЗМЕ РАЗРУШЕНИЯ ЗУБЬЕВ

Излом зуба происходит вследствие роста микротрещины, которая, в свою очередь, развивается:

— из впадины микронеровности (риски обработки) наиболее глубокой или расположенной в месте сосредоточения других неблагоприятных факторов, которыми могут служить: наибольшее значение σ ; наименее слабый элементарный объем материала зуба у сечения, проходящего через данную впадину микронеровности: наибольшая концентрация σ в этом сечении, благодаря большей неоднородности этого элементарного объема, благодаря большему наклепу его вследствие деформаций последствия;

— из микротрещины, появившейся вследствие термообработки;

— из микротрещины, появившейся вследствие усталостного разрыва зерна или его границы;

— из впадины микронеровности, появившейся вследствие износового разрушения (вырывом частиц металла при разрыве молекулярных и механических связей, сколом, срезом, усталостным выкрашиванием ВМН);

— из микротрещины, вызванной нормальными контактными напряжениями-нагрузками;

— из микротрещины, вызванной касательными контактными напряжениями и силами трения скольжения;

— из оспинки, раковины, порожденной кавитацией: как единичными кавитационными ударами, так и усталостными баротермо-электрохимическими процессами при кавитации.

Как отмечено выше, кавитация развивает МТ всякого происхождения. Изгибные напряжения, концентрация их только усиливает кавитационное разрушение.

Заедание, задиры зубьев обусловлены переходом от жидкостного трения к худшим режимам, что вызвано разрывом смазочной пленки. Смазочная пленка разрывается вследствие отрыва зубьев, вызванного ударными, скачкообразными нагрузками, вследствие выжима смазки этими нагрузками, а также по причине высоких скоростей проскальзывания зубьев, что приводит к растяжке дырчатой (ВМН делает пленку дырчатой) пленки.

Разрывная прочность смазочной пленки снижается, благодаря интенсификации общих и локальных баротермических режимов и электрохимическому разложению. Подбор смазки, одинаково прочной во всех этих режимах — задача очень сложная.

При переходе от жидкостного к худшему режиму трения происходит износ поверхностей зубьев, продукты износа и загрязнения смазки, прокатываясь, протаскиваясь между зубьями, образуют задиры — повышенный износ (заедание).

Износ зубьев происходит благодаря:

— вырыву частиц при разрыве молекулярных и механических связей;

— сколу, срезу ВМН, пропахиванию поверхности зуба выступами микронеровностей ответной поверхности;

— усталостному выкрашиванию ВМН.

Растрескивание поверхностного слоя зуба на зерна благодаря контактному давлению, высоким температурам, что еще больше усиливается баротермическими ударами при кавитации и электрохимическим растворением структурных составляющих металла, усиливает износ.

Пластические сдвиги в направлении сил трения скольжения возникают вследствие скольжения структур (зерен) и вследствие ориентации ВМН: на зубе колеса выступы пригибаются в направлении к полюсной линии, а на зубе шестерни — от полюса — получается своеобразный пробор. Пластические сдвиги ВМН и связанных с ними зерен вдоль граней ВМН усиливают эффект.

Отслаивание поверхностного слоя происходит, очевидно, вследствие волновых процессов: прямой и отраженный скачок упругой деформации скорее всего складывается на границе раздела двух сред; граница раздела служит концентратором-собирателем скачков упругих деформаций поверхности зуба. На этой границе возникает градиент силовых и термоэлектростатических напряжений. Напряжения в слое и в сердцевине, на их границе различны ввиду большей жесткости, прочности поверхностного слоя.

§ 18. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ СТОЙКОСТИ ЗУБЬЕВ С УЧЕТОМ ВСЕХ ВОЗМОЖНЫХ ВИДОВ РАЗРУШЕНИЯ

Требования к долговечности зубчатых колес устанавливаются решением задачи экономического обоснования надежности работы передачи в течение предполагаемого срока работы её, решением задачи оптимального распределения основного или комплексного критериев надежности передачи по её узлам и деталям.

При этом учитываются научно обоснованные и подтвержденные практикой соображения следующего рода.

Узлы передачи должны быть синхронизированы по долговечности с тем, чтобы непрерывно, постоянно не перебирать передачу для ремонта, к чему вынуждают случайные (по времени) отказы. Синхронизация заключается в организации потока отказов отдельных узлов и деталей передачи, что достигается приданием им таких технических качеств, которые обеспечили бы заданный срок наработки на отказ, заданную долговечность (как вероятностные величины) — не больше, не меньше.

Достижение большей долговечности требует излишних капитальных затрат. Вместе с тем, если вероятный отказ попадает в промежутки между двумя соседними ремонтами по причине отказа других деталей, то возникает необходимость излишней переборки передачи, так что повышение долговечности отдельного элемента системы не только не реализуется, но даже становится ущербным для потребителя.

Недостаточная долговечность тоже требует дополнительной переборки — излишних затрат. Только в том случае, когда затраты на смену отказавшей детали не сопоставимы с затратами на повышение долговечности, не требуется локальная (узловая) синхронизация. Однако и в том случае требования к качеству отдельной детали должны быть согласованы с предполагаемым сроком использования машины, должны быть экономически обоснованными на уровне более крупной системы (механизма, машины, агрегата).

В зубчатой передаче, очевидно, должна быть синхронизирована долговечность валов в сборе, что, в свою очередь, требует синхронизации долговечности подшипников и зубчатых колес. Повышение синхронной долговечности зубчатых колес в пределах предполагаемого срока службы всей передачи (для передачи ср. сл. машины, агрегата и т. п.), как правило, экономически обосновано по сумме капитальных и текущих затрат. Долговечность зубчатых колес лимитируется обычно стойкостью зубьев, зависящей от множества перечисленных факторов.

Для повышения стойкости зубьев могут быть рекомендованы следующие известные ранее и новые меры.

1. Снижение трения скольжения зубьев, так как силы трения и износ многообразно влияют на стойкость зубьев. Благодаря износу:

- ослабляется зуб;
- увеличиваются боковые зазоры;
- искажается профиль зуба;
- усиливается удар зубьев;
- возникают, развиваются микронеровности-микropоры, в которых смазка замыкает воздух, образуя ядра кавитации;
- обнажаются чистые структуры, легче поддающиеся электрохимическому растворению.
- Благодаря силам трения:
 - происходят сдвиги структур поверхностного слоя зуба;
 - появляются микротрещины — очаги КЯ;
 - происходит избирательное кавитационное разрушение ножек зубьев, направленный рост микротрещин.

Микротрещины и микropоры, вызванные силами трения и износом, обуславливают в той или иной степени все виды разрушения зубьев:

- кавитационное;
- изгибное (на МП концентрируются напряжения);
- заедание — собственно износное явление;
- сдвиговое разрушение зубьев;
- отслаивание твердого поверхностного слоя зуба (вследствие развития микротрещины по границе слоя, вследствие сдвигов).

2. Применение смазок, образующих прочные поверхностные плёнки и обладающих высокими антикавитационными (в том числе и антикоррозийными) свойствами.

Антикавитационные свойства смазок обусловлены большим комплексом физико-химических свойств их. Поэтому задача заключается в выборе смазки, обладающей оптимальным сочетанием физико-химических свойств. При том необходимо учитывать физико-химическое взаимодействие смазки с материалами зубчатых колес, отличающихся сложностью состава и различным состоянием компонентов в сплаве.

Отсюда нетрудно представить, что задача создания антикавитационных смазок очень многомерна. Однако формулировка требований к свойствам смазки является важным этапом на пути создания смазок требуемого сочетания физико-химических свойств, определяющих их максимальную антикавитационность

с заданными материалами зубчатых колес и в заданном режиме работы передачи.

3. Охлаждение — смазка струей тумана, направленной в зону контакта; струей воздуха (инертного газа), несущей частицы твердых смазок. Охлаждение и очистка смазки, защита передачи от попадания пыли и грязи.

4. Применение гибких колес для увеличения коэффициента перекрытия — уменьшения нагрузки на зуб.

5. Гашение — демпфирование колебаний системы зуб-колесо-валопровод и т. д. Исключение резонансных частот колебаний в передаче.

6. Повышение чистоты поверхности зуба.

7. Повышение точности зубчатой передачи: точности шага зацепления, точности сборки и т. д.

8. Применение кавитационно более стойких материалов для зубчатых колес.

Отработка сплавов, приобретающих высокую кавитационную стойкость после химико-термической обработки.

Химико-термическая обработка, хромирование зубьев под воздействием ультразвука. Применение оптической поверхностной закалки.

Применение материалов для шестерни и колеса с меньшей склонностью к молекулярному взаимодействию в контакте.

Применение материалов, образующих после обработки поверхностный слой на зубе, обладающий большим внутренним трением, большей способностью гасить колебания, большей усталостной прочностью.

Очевидно, в материалах, обладающих большей однородностью структуры, микроконцентрации напряжений происходят в меньшей степени.

9. Корректирование зубчатой передачи с целью выравнивания максимальных контактных напряжений в конечных точках линии зацепления (на концах участка однопарного зацепления для плавной передачи).

При $i > 1$ контактные напряжения (следовательно, и силы трения) на ножке зуба шестерни превосходят напряжения на ножке зуба колеса. Поэтому смещением рабочего участка линии зацепления относительно полюса в сторону колеса снижают контактные напряжения на ножке зуба шестерни до момента выравнивания их с напряжениями на ножке зуба колеса (в характерных точках: на концах рабочего участка линии зацепления или на концах участка однопарного зацепления).

Если учесть, что зуб шестерни испытывает в i раз большее число циклов нагружения, чем зуб колеса; если материалы шес-

терни и колеса различны, отличаются своей кавитационной стойкостью в Δ_1/Δ_2 раз, то предложенные в работе смещения инструмента необходимо изменить в соответствии с зависимостью

$$\xi^* = \xi \cdot f(i) \cdot f(\Delta_1/\Delta_2).$$

Поправочные функции определяются на основе экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абачараев Н. М. Экономическое обоснование надежности и эффективности технических систем. Дагкнигоиздат, Махачкала, 1970.
2. Абачараев Н. М. Некоторые вопросы трения качения. Дагкнигоиздат, Махачкала, 1970.
3. Абачараев Н. М. Некоторые результаты исследований по кавитации и кавитационному разрушению зубчатых передач. Тезисы докладов научно-технической конференции, Дагкнигоиздат, Махачкала, 1971.
4. Абачараев М. М. Исследование влияния химико-термической обработки на кавитационную стойкость втулок цилиндров судовых вспомогательных дизелей ч. 8, 5/11 и ч. 9, 5/11. Кандидатская диссертация, Ленинград, 1970.
5. Алексеев В. В., Морозов В. И., Филимонов Г. Н. Тензометрирование крупногабаритных деталей судовых механизмов. Судостроение, № 6, 1971.
6. Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия. Изд-во «Высшая школа», 1969.
7. Бебчук А. С. К вопросу о механизме кавитационного разрушения твердых тел. Акустический ж., т. IV, вып. 4, 1957.
8. Бебчук А. С., Розенберг Л. Д. О зависимости кавитационной эрозии от растворимости газа, находящегося над жидкостью. Акустический ж., т. IV, вып. 4, 1960.
9. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Шнейдерович Р. М. Расчет на прочность деталей машин. Справочное пособие. Машиностроение, 1966.
10. Бергман Л. Ультразвук, ИИЛ, 1957.
11. Богачев И. Н., Минц Р. И. Кавитационное разрушение железо-углеродистых сплавов. Машгиз, 1959.

12. Богачев И. Н., Минц Р. И. Повышение кавитационно-эрозионной стойкости деталей машин. Машиностроение, 1964.

13. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. Машиностроение, 1968.

14. Бражников Н. И. Ультразвуковые методы. Изд-во «Энергия», 1965.

15. Георгиевская Е. П. Кавитационная эрозия гребных винтов. Изд-во «Судостроение», 1970.

16. Гликман Л. А., Тэхт В. П., Зобачев Ю. Е. К вопросу о физической природе кавитационного разрушения, ЖТФ, т. XXV, вып. 2., 1955.

17. Детали машин. Расчет и конструирование. Справочник под ред. Н. С. Ачеркана, т. 3. Машиностроение, 1969.

18. Дмитриев В. А. Детали машин. Судостроение, 1970.

19. Дроздов Ю. Н., Гавриков Ю. А. Новый критерий для расчета зубчатых передач на заедание. «Вестник машиностроения», № 7, 1967.

20. Егоров И. Т., Садовников Ю. М., Исаев Н. И., Басин М. А. Искусственная кавитация. Изд-во «Судостроение», 1971.

21. Елизаветин М. А. Повышение надежности машин. Изд-во «Машиностроение», М., 1968.

22. Иванов М. Н. Детали машин. «Высшая школа», 1964.

23. Ишлинский А. Ю. Трение качения. ПММ, т. 11, вып. 2, 1938.

24. Кичкин Г. И., Виленкин А. В. Масла гидромеханических коробок передач. Изд-во «Химия», 1969.

25. Кнап Р. Т. Исследование механизма кавитации и кавитационной эрозии. Прочность, трение и износ. Машиностроение, № 3.

26. Коднир Д. С. Контактно-гидродинамическая теория смазки. Куйбышевское книжное изд-во, 1963.

27. Козырев С. П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. Изд-во «Машиностроение», 1964.

28. Колесник Н. В. Устранение вибрации машин. Mashgiz, 1952.

29. Крагельский И. В. Трение и износ. «Машиностроение», 1968.

30. Красильников В. А. Звуковые и ультразвуковые волны. Физматгиз, 1960.

31. Кудрявцев В. Н., Державец Ю. А., Глухарев Е. Г. Конструкции и расчет зубчатых редукторов. Изд-во «Машиностроение», Л., 1971.

32. Кэй Дж., Лэби Л. Таблицы физических и химических постоянных. Физматгиз, 1962.
33. Михайлов И. Г., Соловьев В. А., Сырников Ю. П. Основы молекулярной акустики. Изд-во «Наука», 1964.
34. Мишарин Ю. А., Сухоруков Л. В. Международная конференция по зубчатым передачам. Машгиз, 1962.
35. Международная конференция по смазке и износу машин. Машгиз, 1962.
36. Меттер И. Физическая природа кавитации и механизм кавитационных разрушений. Успехи физических наук, т. XXXV, вып. 1, 1948.
37. Мягков В. Д. Допуски и посадки. Справочник. Изд-во «Машиностроение», М.-Л., 1966.
38. Некоторые вопросы прикладной акустики. Сб. ст. под ред. И. Дж. Ричардсона. Воениздат, 1962.
39. Папкин А. В., Бурдов Д. Н. Изготовление и применение охлаждающе-смазочных жидкостей. Изд-во «Машиностроение» 1964.
40. Перник А. Д. Проблемы кавитации. Судостроение, 1966.
41. Петрусеви́ч А. И. Зубчатые передачи, кн. «Детали машин» под ред. Н. С. Ачеркана. Машгиз, 1953.
42. Петрусеви́ч А. И. и др. Динамические нагрузки в прямозубых цилиндрических колесах. Изд. АН СССР, 1956.
43. Пинегин С. В. Контактная прочность в машинах. Изд. «Машиностроение», М., 1965.
44. Плессет М. С. Импульсный метод получения кавитационной эрозии. ТОАИМ, серия Д, техническая механика, ИЛ, т. 85, № 3, 1963.
45. Пономарев С. Д., Бидерман В. Л. и др. Расчеты на прочность в машиностроении, т. 1—3, Машгиз, 1956—1959.
46. Попов В. Н. Таблицы для гидравлических расчетов. Гос. изд. техн. лит. УССР, Киев, 1962.
47. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах под общей редакцией И. А. Бригера и Я. Г. Пановко. Машиностроение, 1958.
48. Решетов Д. Н. Детали машин. Машгиз, 1964.
49. Родионов П. М. Основы общей и специальной гидравлики. Учебное пособие ЛВИКА им. А. Ф. Можайского. Л., 1969.
50. Розенберг Ю. А. Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машин. Изд. Машиностроение. 1970.

51. Рыжов Э. В. Контактная жесткость деталей машин. Изд. «Машиностроение», М., 1966.

52. Скуридин А. А., Михеев Е. М. Борьба с шумом и вибрацией судовых ДВС. Изд. «Судостроение», 1970.

53. Современные методы оценки качества и пути повышения точности изготовления зубчатых передач. Машгиз, 1962.

54. Справочник химика, т. I, Госхимиздат, 1963.

55. Справочник химика, т. III, изд. «Химия», 1954.

56. Старосельский А. А., Гаркунов Д. Н. Долговечность трущихся машин. Машиностроение, 1967.

57. Тирувенгадам А. Обобщенная теория кавитационных разрушений. ТОАИМ, серия Д, техническая механика, ИЛ, т. 85, № 1963.

58. Тодт Ф. Коррозия и защита от коррозии. Изд-во «Химия», 1967.

59. Грубин Г. К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес. Машгиз, 1962.

60. Урванцев Л. А. Эрозия и защита металлов. Изд-во «Машиностроение», 1966.

61. Физическая акустика под ред. У. Мэзона, том I. Методы и приборы ультразвуковых исследований, часть Б. Изд-во «Мир», 1967.

62. Хеммит Ф. Г. Исследование кавитационных разрушений в потоке жидкости. ТОАИМ, серия Д, техническая механика, ИЛ, т. 85, № 3, 1963.

63. Часовников Л. Д. Передачи зацеплением. Машиностроение, 1969.

СОКРАЩЕНИЯ

ВМН	— выступы микронеровностей
ЗК (ЗШ)	— зона контакта, зуб колеса (зуб шестерни)
НУ	— набегающий участок ЗК
УВ	— участок выбега ЗК
ДУ	— догружаемый участок ЗК
РУ	— разгружаемый участок ЗК
МЦВ	— мгновенный центр вращения
МЦС	— мгновенный центр скоростей
МЦСА	— МЦС катка в его абсолютном движении
МЦСО	— МЦС катка в его относительном движении — качении по деформирующейся поверхности
МЦСЖ	— МЦС в паре качения с абсолютно жесткими телами
МЦУ	— мгновенный центр ускорений
ЛДQ	— линия действия нормальной составляющей силы тяжести катка
СНД	— силы нормального давления (основания на каток)
ЧП	— чистота поверхности
КВ	— кавитационное воздействие
КР	— кавитационное разрушение
КС	— кавитационная стойкость
КП	— кавитационный пузырек
КЯ	— кавитационное ядро
МП	— микропора
КСИ	— кавитационная система
КА	— кавитационная активность
СОЖ	— смазочно-охлаждающая жидкость
ГЯ	— газовое ядро
ИП	— инкубационный период
ЛЗ	— линия зацепления
ТУЛЗ	— теоретический участок ЛЗ
РУЛЗ	— рабочий участок ЛЗ.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава I. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРИЧИНАХ РАЗРУШЕНИЯ ЗУБЬЕВ	5
§ 1. Выкрашивание зубьев	5
§ 2. Излом, износ, заедание и другие виды разрушения зубьев	7
Глава II. КАЧЕНИЕ И СКОЛЬЖЕНИЕ ЗУБЬЕВ	10
§ 3. Сухое трение	10
§ 4. Жидкостное трение	13
Глава III. КАВИТАЦИЯ	16
§ 5. Состав кавитационной системы	18
§ 6. Исследование природы и поведения кавитационных ядер и пузырьков	19
1. Анализ существующих представлений о кавитационных ядрах и пузырьках	19
2. Образование кавитационных ядер в толще жидкости	21
3. Экспериментальное исследование природы кавитационных ядер и пузырьков	21
§ 7. Обобщенное представление о явлении кавитации	25
§ 8. Обобщенное представление о механизме кавитационного разрушения тел	28
§ 9. Кавитационная стойкость различных материалов	30
§ 10. Исследование влияния свойств и параметров кавитационной си- стемы на интенсивность кавитационного разрушения тел	31
Глава IV. КАВИТАЦИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ ЗУБЬЕВ	39
§ 11. Причины и характер кавитационного разрушения зубьев	40
§ 12. Причины избирательного разрушения ножек зубьев	42
§ 13. Рекомендации для повышения кавитационной стойкости зубьев	45

Глава V. КОРРИГИРОВАНИЕ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ С ЦЕЛЮ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ (КАВИТАЦИОННОЙ) СТОЙКОСТИ ЗУБЬЕВ	48
§ 14. Исследование характера изменения максимальных контактных напряжений вдоль линии зацепления (вдоль профиля зуба)	48
§ 15. Определение наибольших значений максимальных контактных напряжений	51
§ 16. Корригирование зубчатого зацепления	51
1. Высотная коррекция	53
2. Угловая коррекция	55
Глава VI. ВЗАИМОСВЯЗЬ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ РАЗРУШЕНИЯ ЗУБЬЕВ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ЗУБЬЕВ	57
§ 17. Обобщенное представление о механизме разрушения зубьев	57
§ 18. Рекомендации по повышению стойкости зубьев с учетом всех возможных видов разрушения	59
Литература	63
Сокращения	67

Х 2 - 2

Абачараев Н. М.

A 13 Трение и кавитация в зубчатых передачах-парах качения.
Махачкала, Дагкнигоиздат, 1972
68 с ил.

6П5.3

Редактор **А. Ибрагимов**
Художествен. редактор **В. Логачев**
Техн. редактор **М. Тищенко**
Корректор **С. Усик**

Сдано в набор 9/X-1972 г. Подписано в печать 27/XI-1972 г.
Форм. бум. 60×84^{1/16}. Бум. л. 2,12. Печ. л. 4,25.
Усл. печ. л. 3,85. Уч.-изд. л. 3,57. С 01635. Тираж 1000. Цена 18 коп.

Дагестанское книжное издательство Управления по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли Совета Министров ДАССР,
Махачкала, ул. Маркова, 55. Заказ № 371.

Тип. Дагестанского филиала АН СССР,
Махачкала, 5-й жилгородок, корпус 10.

Цена 18 коп.

46077

14

899