

В. Н. ТРЕЙЕР

ПРОФЕССОР, ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

О МЕТОДИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТА
ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАШИН И ИХ ДЕТАЛЕЙ

P 15636

ENAV Teadus- ja Kirjandus-
Keakirjanduslikud



ЭСТОНСКОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИН 1953

1941

NO. 11

1941

ROBERTSON & COMPANY
1000 BROADWAY
NEW YORK, N. Y.

P. 1523

ПРЕДИСЛОВИЕ

В начале 1934 г. автором на сессии Академии Наук СССР был сделан доклад на тему «Проблема долговечности машин» [Л. 1], причем по предложению выдающегося советского ученого, заслуженного деятеля науки и техники, академика Сергея Алексеевича Чаплыгина, была образована специальная комиссия по изучению долговечности машин. Однако техника и техническая культура того времени, т. е. конца первой пятилетки, на заре стахановского движения, еще не были на таком высоком уровне, чтобы обширные и трудоемкие исследования в области износа и долговечности машин могли бы быть поставлены в требуемом большом объеме в научно-исследовательских учреждениях и могли бы получить необходимую широкую поддержку со стороны промышленности, поэтому деятельность этой комиссии в то время не получила должного развития.

Между тем подлинное развитие науки о долговечности машин, неразрывно связанной с переходом промышленного и сельскохозяйственного производства СССР на высшую ступень техники, требует новых форм научно-исследовательской работы и немыслимо без широких массовых опытов на производстве, немыслимо без активного участия работников производства и его передового отряда стахановцев-новаторов.

Возникшее в послевоенные годы массовое движение за образование и развитие творческого содружества между работниками науки и производства является одной из этих новых форм научно-исследовательской работы в СССР, причем становится совершенно ясным, что без его широкого использования не обойтись и при всестороннем изучении работоспособности и долговечности машин, с целью обеспечения наиболее полного использования их в народном хозяйстве, с целью использования опыта эксплуатации существующих машин для создания новых вы-

сокопроизводительных машин при облегчении их веса и улучшении качества.

Дальнейшее изучение работоспособности и долговечности машин и их деталей только в лабораторных условиях, как это, главным образом, практиковалось до сего времени, не позволяет произвести постановку научно-исследовательских работ в данной области с необходимой полнотой, потому что круг вопросов, связанный с данной проблемой, чрезвычайно велик, поэтому единственным правильным решением задачи о постановке необходимых широких и массовых научно-исследовательских работ в области изучения работоспособности и долговечности машин является их постановка непосредственно на производстве.

Могучая советская высокопроизводительная техника наших дней и ближайшего будущего основана на широком применении сложных механизмов и автоматики, причем ее регулирование и наладка, а также и правильное управление ею, требуют высокой технической культуры от обслуживающего персонала. Современные сложные, высокопроизводительные машины все более и более оснащаются чувствительными приборами, необходимыми для контроля качества их работы, а рабочие, обслуживающие машины, проявляют все больший интерес к использованию этих приборов в своей повседневной работе.

В качестве одного из примеров стремления передовиков производства к высшей культуре труда, а именно к использованию приборов для контроля работоспособности находящегося в их распоряжении оборудования, можно привести выдержку из выступления мастера третьей бригады седьмого промысла треста «Сталиннефть» Бейюк-Ага Мамедова, опубликованную на страницах газеты «Правда» от 29 апреля 1953 г.:

«Участок нашей бригады оснащен новейшим оборудованием: редукторными станками-качалками, глубокими насосами. Техника у нас быстро движется вперед и квалификация, мастерство рабочих должны, следовательно, неуклонно повышаться и совершенствоваться. Хочется подтвердить это одним примером.

Для исследования скважин и определения работы глубоких насосов создан специальный аппарат-динамограф. С его помощью можно точно определить состояние насо-

са, технический режим скважины, найти причины, затрудняющие добычу нефти.

До недавнего времени на промысле имелся лишь один динамограф, с которым умел обращаться только техник. Теперь такие аппараты имеются во всех бригадах, ими пользуются многие операторы... Научившись применять динамограф, мы перестали работать на ощупь, вслепую».

Постановка научно-исследовательских работ по изучению работоспособности и долговечности машин и станков, под руководством инженерно-технических работников, непосредственно на производстве требует оснащения «подопытных» машин и станков рядом специальных приборов и приспособлений, правильное использование и сохранность которых вполне могут быть доверены передовым рабочим-операторам, как это и подтверждается вышеприведенным примером.

В заключение предисловия необходимо отметить, что излагаемые в данном выпуске материалы по методике исследования и расчета машин и их деталей на долговечность следует рассматривать лишь как предложения для обсуждения и дальнейшего развития.

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

Использование любой современной машины было бы ненадежным и даже опасным, если машиностроительная наука не располагала бы некоторыми знаниями в области обеспечения прочности и износостойкости как отдельных деталей машин, так и целых машин. Этими знаниями конструкторы машин пользуются при проектировании и постройке машин.

В прежние времена, когда еще не было развито массовое производство и широкое использование машин и когда скорость движения их частей была значительно ниже, чем теперь, конструкторы для достижения надежной прочности деталей машин, обычно, увеличивали их размеры, т. е. проектирование деталей машин производилось с большими запасами прочности.

Однако при том огромном и все возрастающем количестве машин, которое изготавливается в настоящее время в СССР, чрезмерные запасы прочности и связанный с ними излишний расход металла не может быть больше оставлен без внимания, поэтому в решениях XIX съезда КПСС указано: «При конструировании новых машин добиваться снижения их веса при улучшении качества».

Помимо экономии металлов при проектировании современных высокопроизводительных и быстроходных машин, увеличение размера и веса их движущихся частей требует особой осмотрительности и во избежание возникновения значительных по величине инерционных сил, могущих вызвать дополнительные нагрузки и напряжения в деталях машин.

Стремление снизить вес машин при улучшении их качества уже давно является заманчивой задачей конструкторов машин, но никогда еще эта задача не ставилась так определенно и точно.

Снижение веса машин при улучшении их качества означает, что металлы, из которых изготовлены детали машин, должны быть использованы наилучшим образом, с наибольшим экономическим эффектом, т. е. так, чтобы их работоспособность была бы полностью исчерпана, и чтобы в изношенной и выводимой из производства машине оставалось бы возможно меньше деталей, которые могли бы быть еще успешно использованы.

Такое полное использование работоспособности деталей машин и целых машин возможно лишь в том случае, если их проектирование и расчет на прочность были произведены с учетом некоторого предварительно намеченного срока их надежной работы, т. е. были произведены на основе целесообразной долговечности. Совершенно ясно, что такой метод прочностного проектирования машин обеспечивает проведение плано-предупредительных ремонтов машин на гораздо более высоком техническом уровне и, следовательно, обеспечивает бесперебойное и более высокое качество работы машин в течение всего срока их службы.

Несмотря, однако, на то, что создание общей теории научного предвидения процесса исчерпания работоспособности и долговечности изнашивающихся деталей машин, а следовательно, и целых машин, давно представляет собой одну из важнейших проблем машиностроительной науки, тем не менее к решению этой проблемы долго считалось невозможным приступить вследствие серьезных затруднений, возникающих при попытках практического решения отдельных задач этой проблемы.

Все же при развитии методов расчета на прочность некоторых изнашивающихся деталей машин как, например, подшипников качения, фрикционных, зубчатых и ременных передач, стальных проволочных канатов и др. требование на практике обеспечить надежную прочность машин, в которых эти детали установлены, привела к необходимости разработать довольно подробные методы расчета их на долговечность. Однако эти расчеты отдельных деталей машин на долговечность, не будучи приведены во взаимную связь при проектировании новых машин, не будучи подчинены общей идее сохранения высоких эксплуатационных свойств машин в течение определенных длительных сроков их службы, еще не дают того практического эффекта, который необходим для решения

тех задач, которые поставлены перед советскими машиностроителями историческими решениями XIX съезда КПСС.

Каковы же затруднения, возникающие при создании новых более совершенных методов прочностного проектирования машин?

Основные затруднения при создании этих более совершенных методов прочностного проектирования машин, учитывающих задачу сохранения высоких эксплуатационных свойств новых проектируемых машин, в течение определенных длительных сроков службы, при снижении их веса, т. е. основные затруднения при создании некоторой теории долговечности машин, вытекают из наличия следующих наиболее важных обстоятельств:

1. Неоднородность внутреннего строения (загрязненность неметаллическими включениями, флокены, остатки усадочной раковины и т. п.) и ряд других случайных пороков металлов (закаты, волосовины и т. п.), используемых при изготовлении деталей машин, неблагоприятно отражаются на их усталостной прочности и износостойкости.

2. Возможность появления ряда случайных технологических дефектов в состоянии деталей машин при их изготовлении на машиностроительном заводе также неблагоприятно отражается на их работоспособности (закалочные и шлифовочные трещины, геометрические неточности и т. п.).

3. Сложный переменный и разнообразный режим работы отдельных, изнашивающихся деталей в однотипных машинах, в зависимости от конкретных условий их использования и ухода за ними, создает большое разнообразие в течении процесса утраты или работоспособности.

Перечисленные явления, неизбежные при современном производстве и использовании машин, приводят к большому разбегу-рассеянию сроков службы как отдельных деталей машин, так и целых машин, что и создает впечатление неопределенности постановки задачи о составлении более или менее точных прогнозов долговечности отдельно взятых машин при их использовании. Между тем каждая из трех перечисленных причин значительного разбега-рассеяния сроков службы машин не представляет собой раз навсегда установленное, не-

изменное по своему влиянию на долговечность деталей машин, явление.

Успехи в развитии физики, химии и прикладных металлургических наук, а также в развитии технологии металлургического производства, несомненно, из года в год будут содействовать улучшению качества машиностроительных металлов и созданию новых марок сталей, чугунов и цветных металлов, обладающих все более высокими механическими свойствами, а главное, обладающих все большим постоянством в своих качественных показателях.

Следовательно, влияние одной из главных причин неточности прогнозов долговечности машин будет в дальнейшем постоянно ослабевать.

В области технологии советского машиностроения успехи непрерывного усовершенствования технологических процессов и обеспечения все более высокого качества и точности изготовления деталей машин настолько значительны, что влияние случайных технологических дефектов на рассеяние сроков службы деталей машин нельзя признать неизменным и постоянным. Несомненно, что влияние и этого фактора будет постепенно уменьшаться.

Учет разнообразия режимов использования однотипных машин также все более уточняется путем разработки все более точных методов определения, так называемых «приведенных» нагрузок при переменных режимах работы, поэтому влияние и этой причины неточности прогнозов долговечности деталей машин также постепенно снижается.

По поводу же ухода за машинами при их использовании, и влиянии этого фактора на долговечность машин, возникает следующий вопрос:

Можно ли содействовать преобладанию, при использовании машины, влияния факторов, благоприятно отражающихся на ее долговечности, и ослаблению или даже устранению влияния неблагоприятных и таким образом повысить общую долговечность машины?

Опыт передовиков производства по удлинению сроков службы машин и станков является ярким доказательством возможности этого. Следовательно, повышение долговечности машин может быть достигнуто не только за счет конструктивно-технологических мероприятий, но и путем общего улучшения условий работы уже готовых,

действующих машин и их деталей, достигаемого тщательным уходом за ними. Опыт передовиков производства в этом отношении представляет собой неисчерпаемый источник новых направлений для повышения долговечности как отдельных деталей машин, так и целых машин.

Следует помнить о том, что преждевременный ремонт машин, а следовательно, и увеличение общего числа ремонтов за весь срок службы машин, не говоря уже о потерях, связанных с непредвиденными простоями оборудования, ложится тяжелым бременем на эксплуатационные расходы производства и на себестоимость продукции, потому что трудоемкость ремонтных работ весьма значительна.

Например, общая трудоемкость годовых ремонтных работ для токарного станка с высотой центров 200 мм доходит до 400—500 нормочасов, в то время как полная трудоемкость изготовления соответствующего нового токарного станка составляет приблизительно это же количество нормочасов.

Правильно организованный и систематически проводимый тщательный уход за машинами в эксплуатационной обстановке может значительно повысить долговечность машины в целом и ее отдельных частей еще и потому, что расчетные сроки изнашивающихся деталей машин, обычно, устанавливаются по низким «гарантийным» нормам, обеспечивающим соответствие их для подавляющего большинства объектов, в то время как значительная часть их может выдержать значительно большие сроки. Например 90% подшипников качения, согласно принятой методике установления коэффициентов их работоспособности, должны не только выдержать, но и значительно превысить расчетные сроки службы, причем около 50% могут выдержать сроки в 3—4 раза превышающие расчетные, гарантийные.

Принимая во внимание огромный парк машин в народном хозяйстве нашей страны, даже небольшое увеличение межремонтных периодов и общей долговечности машин и их деталей по сравнению с ранее установленными, приводит к огромной экономии средств.

Подсчитано, например, что увеличение межремонтных периодов машин и станков на предприятиях г. Москвы всего только на один месяц было бы равносильно вводу в эксплуатацию пятнадцати тысяч новых машин и стан-

ков и, кроме того, дало бы экономию в полтора миллиарда рублей (Л. 2).

Движение за продление межремонтных сроков за счет тщательного ухода за машинами и станками имеет большое народно-хозяйственное значение и, будучи проводимо под строгим контролем технического руководящего персонала, может дать большой экономический эффект.

Токарь Московского завода шлифовальных станков тов. Кулагин (Л. 2), применяя скоростные методы обработки и проводя исключительно тщательный уход за своим станком выполнил на нем 25 годовых норм без капитального ремонта.

Токарь Бакинского машиностроительного завода им. Буденного тов. Фоломеев в течение семи лет работал на станке (модель 1 Д 62) без единой остановки на ремонт, перевыполняя нормы и выпуская первосортную продукцию. Тов. Фоломеев сэкономил на ремонте 15,5 тысяч рублей, а за счет времени, которое потребовалось бы на ремонт отработал на станке 267 рабочих смен.

Судовой механик теплохода «Чкалов» тов. Бурлаков бережным обращением с механизмами и двигателями своего судна обеспечил безукоризненную работу их в течение пяти лет без заводского ремонта (Л. 3).

Ряд советских ученых поддержал инициативу мастеров социалистического, стахановского труда по повышению долговечности машин и станков и включил в область своей научной деятельности задачи, связанные как с повышением долговечности отдельных деталей машин, так и с теоретическим предсказанием их сроков службы, в зависимости от условий работы (Л. 9). Теперь решение проблемы определения научно-обоснованных межремонтных периодов, т. е. расчет деталей машин и целых машин на долговечность уже не кажется задачей отдаленного будущего, как это представлялось еще несколько лет тому назад.

Следует все же отметить, что хотя влияние перечисленных основных факторов, вызывающих разбег-разсеяние действительных сроков службы машин и их деталей и будет, несомненно, со временем, падать, все же полное их устранение не представляется возможным, поэтому в некоторой мере прогнозы долговечности машин всегда будут носить приближенный характер, а основанием для составления расчетных формул долговечности

машин и их деталей должны служить массовые испытания машин и их деталей на долговечность.

Однако объем этих работ настолько велик и разнообразен, учитывая необходимость исследования работоспособности и долговечности машин и станков в различных многочисленных отраслях народного хозяйства СССР, что не может быть выполнен с необходимой полнотой одними научными работниками и требует привлечения к этой работе работников производства. Кроме того, постановка научно-исследовательских работ по изучению работоспособности и долговечности машин и их деталей в производственных условиях имеет ряд преимуществ по сравнению с аналогичными лабораторными, не говоря уже о непосредственном их положительном влиянии на повышение технической культуры использования машин и станков на тех предприятиях, где эти исследования могут быть организованы.

В данной монографии рассматриваются некоторые методические вопросы постановки научно-исследовательских работ по изучению работоспособности и долговечности машин и их деталей, а также вопросы развития методов их расчета на прочность с учетом фактора времени, причем предполагается, что проведение основного объема исследовательских работ данной проблемы, без которого создание полной теории долговечности машин не мыслится, может быть в значительной своей части проведен работниками производства, труды которых, будучи обобщены и опубликованы, должны послужить для уточнения и развития ранее намеченных теоретических задач проблемы долговечности машин и их деталей.

ГЛАВА II

О МЕТОДИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАШИН И ИХ ДЕТАЛЕЙ

1. Основные виды исследования долговечности машин и их деталей

Составление какой-либо единой методики исследования утраты различными машинами и их деталями работоспособности не представляется возможным вследствие слишком большого разнообразия условий работы машин и требований, предъявляемых к их эксплуатационным свойствам, но является все же своевременным предложить некоторые обобщенные методические установки по этой большой и сложной проблеме, главным образом, для того, чтобы привлечь возможно более широкий круг исследователей долговечности и работоспособности машин к работе по таким методам, которые привели бы к результатам, наиболее удобным для их взаимного обобщения и для дальнейшего развития теории долговечности машин, а также возможно лучше соответствовали бы практическим задачам расчета деталей машин на долговечность.

Уже имеющийся опыт исследования работоспособности и долговечности машин и их деталей указывает на необходимость подразделить эти исследования на два следующих основных вида: натурно-эксплуатационные и лабораторные.

Натурно-эксплуатационные исследования, в свою очередь, следует, повидимому, подразделить, во первых, на исследования подопытных объектов, заранее подготовленных к изучению в обычных эксплуатационных условиях, за работой которых в течение всего срока их исследования, вплоть до выхода из строя, ведется систематическое наблюдение, т. е. на организованные натурно-

эксплоатационные исследования работоспособных машин и, во вторых, на исследования целых машин и их деталей, полностью изношенных в эксплуатационных условиях, состояние которых до начала их эксплуатации не было зафиксировано и во время использования которых наблюдение за постепенным их износом не велось, т. е. на натурные исследования полностью изношенных машин и их деталей.

Лабораторные исследования работоспособности и долговечности целых машин обычно проводятся редко и если приводятся, то целая машина служит, в известной мере, естественным испытательным стендом для исследования долговечности и работоспособности отдельных ее деталей, поэтому лабораторные исследования, в основном, касаются исследования деталей машин, причем они могут быть основаны на следующих двух, существенно отличающихся друг от друга, методах испытания: во первых, на массовых испытаниях целых деталей машин или даже целых конструктивных узлов (собранного комплекта) на долговечность и, во вторых, на расчлененные испытания частей деталей машин на тот или иной вид утраты ими работоспособности.

2. Натурно-эксплоатационные исследования машин и их деталей на долговечность

Исследования работоспособности и долговечности машин и их деталей, основанные на массовых испытаниях в эксплуатационных условиях, представляют большой практический интерес и результаты этих надлежащим образом обставленных испытаний, будучи тщательно обработаны и проанализированы, являются наиболее убедительными для того или иного вывода. Такие испытания и исследования нередко предпринимаются промышленными предприятиями для решения отдельных практических вопросов износостойкости и работоспособности целых машин и их деталей.

Однако испытания, проведенные в эксплуатационной обстановке обладают и некоторыми недостатками, снижающими иногда научную и практическую ценность их результатов, которые необходимо иметь в виду как при

постановке этих испытаний, так и при рассмотрении их результатов.

Основные недостатки этих испытаний сводятся к следующему:

1. Если объекты исследования во время эксплуатационных испытаний не работают при непрерывной автоматической регистрации их работоспособности, а подвергаются лишь периодическим осмотрам и оценке их состояния, то ряд особенностей их поведения во время этих испытаний остается недоступным подробному изучению.

Кроме того, объекты испытания, находясь вне постоянного наблюдения за действительным режимом их работы, могут подвергнуться непредвиденным перегрузкам или иным общим нарушениям правил их использования и могут оказаться в условиях, не обеспечивающих нормальное течение процесса их износа, причем эти непредвиденные условия, хотя бы и временного характера, могут иметь решающее влияние на общее сокращение их срока службы. Эти неправильности использования объектов испытания, являющиеся, обычно, результатом недосмотра со стороны производственного персонала, могут остаться неизвестными руководителю исследования и при изучении и обработке результатов могут привести к полной невозможности разобраться в истинных причинах преждевременного выхода из строя объекта испытания, если на нем не сохраняются следы неправильного использования.

2. В эксплуатационных условиях нельзя исключить влияние отдельных факторов на долговечность объектов испытания, поэтому и без того сложная картина утраты детали работоспособности усложняется наложением целого ряда условий, который в лабораторной обстановке мог бы быть сокращен.

3. Ввиду того, что детали машин и целые машины в эксплуатационной обстановке должны работать длительное время, то, следовательно, и испытания в этих условиях тоже растягиваются на длительные сроки.

Несмотря, однако, на перечисленные недостатки натурно-эксплуатационных исследований машин и станков все же результаты этих исследований могут служить наиболее надежными и точными данными для широких научных обобщений, как вследствие возможности массовой постановки их, так и вследствие того, что режимы, при которых эти испытания проводятся, не являются искусствен-

ными, форсированными, как это обычно имеет место при лабораторных испытаниях.

Преимущества систематических натурно-эксплоатационных исследований сводятся к следующему:

1. Возможность постановки этих исследований на любом более или менее крупном промышленном предприятии, использующем сложные станки и машины, в особенности, на тех предприятиях, которые располагают заводскими лабораториями.

2. Полное соответствие получаемых научных результатов практическим задачам производства по улучшению использования механического оборудования.

3. Достижение достаточной точности наблюдений при сравнительно небольших затратах, требуемых по существу лишь для изготовления специальных измерительных приспособлений и приставок.

4. Надежность получаемых результатов, в особенности, если под наблюдение взято одновременно несколько машин или станков.

Практическая ценность постановки данных опытов для предприятия, на котором они проводятся, по меньшей мере, заключается в введении в цех научных методов наблюдения за исправностью и работоспособности станков, что само по себе служит фактором повышения технической культуры ухода за механическим оборудованием и лучшего его использования, причем даже в этом только смысле постановка этих опытов является крайне полезной и практически должна дать ощутимый экономический эффект.

При помощи натурно-эксплоатационных исследований машин может быть проведен ряд важных экспериментов на самом машиностроительном заводе, в том числе сравнительное изучение влияния на работоспособность и долговечность деталей машин:

1. Механических свойств металлов различных марок, причем могут быть рекомендованы наиболее целесообразные.

2. Различных классов чистоты обработки рабочих поверхностей деталей машин и точности их изготовления, причем на основании проведенного исследования могут быть сделаны обоснованные выводы относительно действительно необходимой чистоты обработки и точности изготовления деталей машин.

3. Различных конструктивных вариантов деталей машин, выполняющих одну и ту же рабочую функцию.

4. Различных видов смазочных устройств и материалов и ряд других факторов, влияющих на работоспособность и долговечность деталей машин.

Из вышеизложенного видно, что результаты систематических натурно-эксплуатационных исследований в производственных условиях могут дать весьма ценные данные для развития общей теории долговечности машин или станков подопытного типа или назначения.

Серьезной задачей при проведении этих исследований является правильное установление момента окончания нормальной работоспособности детали машины. Критерии для выбраковки изношенных деталей и для постановки целой машины на ремонт могут быть различны, среди них могут быть:

1. Увеличение неточности взаимодействия изношенных деталей, выражающейся как в усилении вибрации и рабочего шума машины, так и в чрезмерном отжати деталей под действием рабочей нагрузки вследствие увеличившихся из-за износа зазоров, если эти факторы могут иметь непосредственное влияние на ухудшение качества продукции.

2. Понижение коэффициента полезного действия машины.

3. Повышение эксплуатационных расходов, приходящихся на единицу продукции, если они являются следствием повышения расхода горючего или электроэнергии, смазочных и обтирочных материалов, стоимости восстановления деталей путем перешлифовки, хромирования или наплавки.

Большим затруднением при обработке результатов испытаний, в особенности тех которые были проведены в эксплуатационных условиях, является большое рассеивание — разбег их сроков службы. В некоторых случаях разность между отдельными сроками службы одинаковых деталей, работавших в совершенно одинаковых условиях, настолько велика, что задача более или менее точной количественной оценки влияния того или иного исследуемого фактора кажется вообще неопределенной.

В таких случаях от опыта руководителя исследования зависит исключить из обработки результатов испытаний

те данные, которые являются, повидимому, следствием возникновения каких-то необычных, нетипичных условий работы испытуемых деталей, искаживших нормальный характер утраты некоторыми объектами испытаний их работоспособности и случайно не зафиксированных в документах и актах испытаний.

При обработке результатов массовых испытаний деталей машин, проведенных как в эксплуатационных, так и в лабораторных условиях, принимая во внимание их рассеивание, неизбежно использование методов математической статистики.

3. Натурные исследования полностью изношенных машин

Исследования деталей машин и целых машин, утративших свою работоспособность в эксплуатационных условиях, могут дать ценный научный и практический материал для проектирования новых машин, если эти исследования могли быть организованы и проведены по определенному, заранее составленному плану, с соблюдением ряда условий, из которых некоторые могут быть сформулированы следующим образом:

1. Если машина еще в какой-либо степени способна выполнять свою рабочую функцию, то необходимо зафиксировать ее эксплуатационное состояние путем соответствующих замеров точности движения ее исполнительных органов или же путем получения серии образцов ее продукции до ее изъятия из производства.

2. Желательно, чтобы изношенная машина или изношенные детали были подвергнуты исследованию непосредственно после того, как было прекращено их использование для того, чтобы возможность дополнительных поломок, а также возможность появления коррозии и других внеэксплуатационных дефектов при этом было бы наименее вероятно.

3. Если есть возможность собрать и систематизировать возможно большее количество документации, характеризующей рабочее состояние машины в различных стадиях ее использования.

4. Если исследования материала деталей изношенной машины, требующие разрезание их на части для изго-

товления специальных образцов, шлифов и т. п. были предприняты только после того, как была произведена исчерпывающая оценка состояния деталей в их целом виде.

Разновидностью данных исследований является исследование машин и их деталей, вышедших из строя вследствие аварий.

4. Лабораторные испытания целых деталей машин на долговечность

Этот метод испытания деталей машин на работоспособность и долговечность хотя и дает довольно полное представление об эксплуатационных свойствах испытуемых объектов в течение всего срока их службы, но постановка их требует больших затрат, поэтому они проводятся лишь для исследования таких изнашивающихся деталей машин, которые производятся в больших количествах и непредвиденный выход из строя которых влечет за собой тяжелое аварийное прекращение работоспособности всей машины.

Для проведения испытаний по данной методике необходимо строить специальные испытательные машины, в которых должны быть воспроизведены эксплуатационные условия работы исследуемых деталей машин, причем должна быть предусмотрена возможность изменения режима работы объектов исследования.

Принцип устройства специальных испытательных машин для проведения испытаний по данной методике заключается в обеспечении возможности подвергнуть объекты испытания точной по величине и направлению нагрузке при постоянной скорости относительного движения трущихся поверхностей или постоянной скорости повторения циклов напряжений, что при обработке результатов испытаний должно позволить произвести точную оценку их долговечности.

Лабораторное испытание целых деталей машин на долговечность дает довольно полную картину утраты ими своей работоспособности, но и при этом методе испытания, хотя и не в такой степени, как при эксплуатационных испытаниях, все же остается еще ряд одновременно действующих факторов, причем не всегда удается выделить влияние каждого из них в отдельности.

Случайный характер сочетаний этих различных по своей значимости для работоспособности детали факторов, который в каждом отдельном объекте испытания может влиять на долговечность его то в одну, то в другую сторону, то увеличивая, то уменьшая ее, приводит к большому рассеиванию результатов испытаний.

Это большое рассеивание результатов испытаний и является причиной необходимости постановки массовых испытаний деталей машин на долговечность, потому что

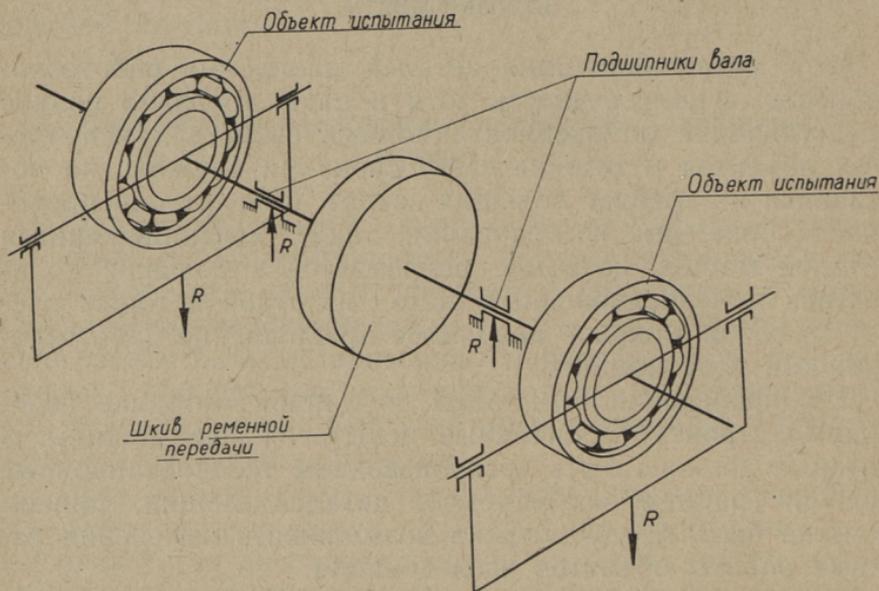


Рис. 1. Схема станка для испытания шарикоподшипников на долговечность.

ошибки при определении искомой связи между условиями работы детали и ее долговечностью, подверженной случайной изменчивости, будут тем меньше, чем большее число результатов будет положено в основу определения аналитической формы этой связи.

Одними из первых деталей машин, для которых были организованы массовые испытания на долговечность, были подшипники качения.

Рассмотрим несколько примеров устройств для испытания деталей машин на долговечность.

Испытание подшипников качения на долговечность производится до выхода их из строя вследствие появления на их внутренних рабочих поверхностях поврежде-

ний усталостного характера, причем признаком появление этих повреждений является повышение температуры объекта испытания и резкое усиление его рабочего шума. По этим признакам обычно определяется окончание работоспособности подшипников качения.

Схема устройства станка для испытания подшипников качения на долговечность видна на рис. 1.

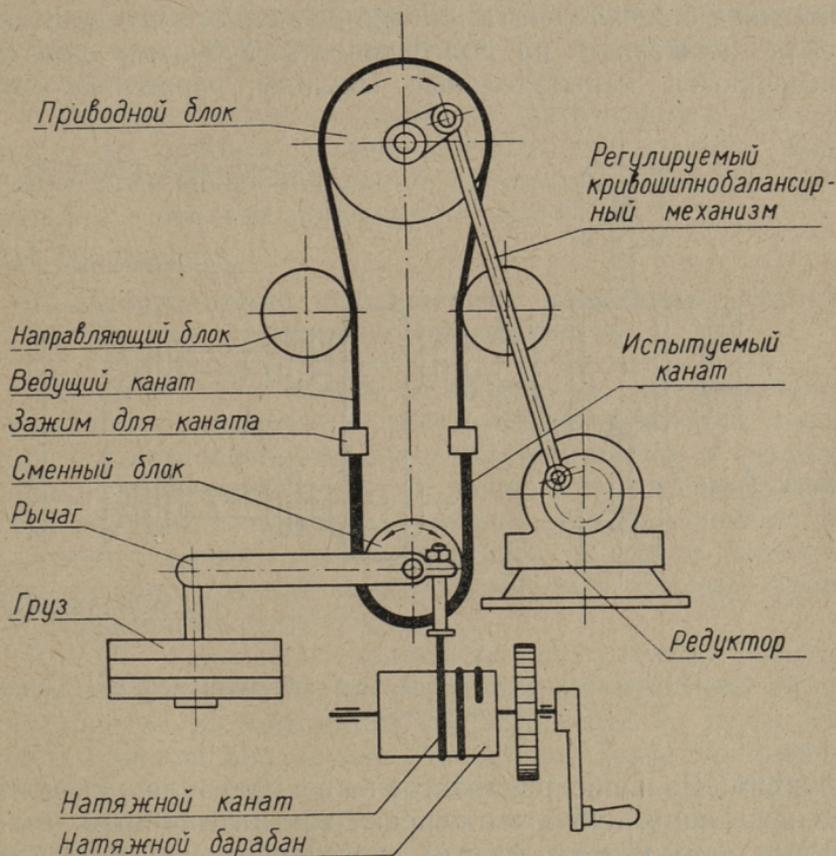


Рис. 2. Схема станка для испытания на долговечность стальных проволочных канатов.

На рис. 2 изображена схема машины для испытания на долговечность стальных проволочных канатов.

Машина состоит из следующих частей: приводного блока, сообщающего испытуемому канату возвратно-поступательное перемещение; сменного блока, служащего для образования повторных перегибов объекта испытания; электромотора; редуктора и регулируемого криво-

шипно-балансирного механизма для сообщения движения приводному блоку.

Для учета числа выдержанных объектом испытания перегибов имеется специальный счетчик [Л. 11].

В зависимости от задач исследования, испытание производят до обрыва первой проволоочки (заершения) или до обрыва определенного числа проволоочек на длине одного шага свивки каната или же до полного его разрыва.

Для испытания на долговечность зубчатых передач применяются испытательные машины различных кон-

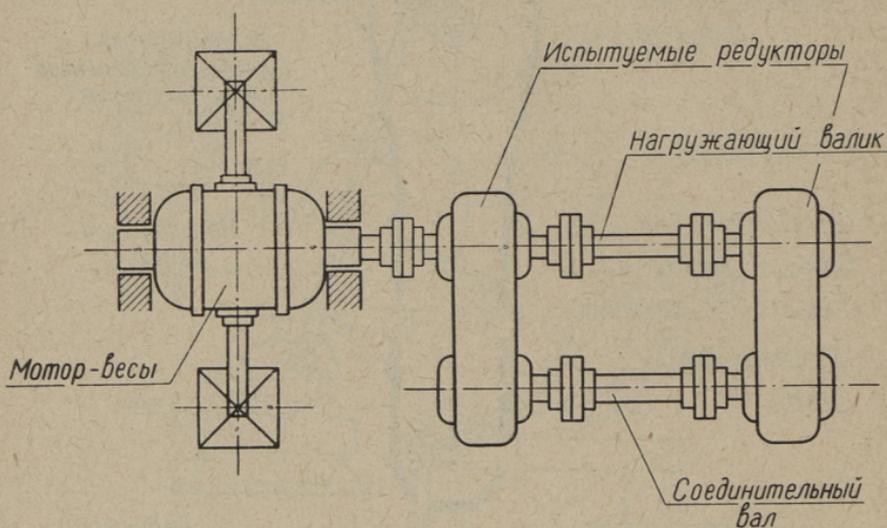


Рис. 3. Схема установки для испытания зубчатых передач замкнутым способом.

струкций. Большое распространение получили установки для испытания зубчатых передач так называемым, «замкнутым способом». В этих установках испытываются одновременно две пары зубчатых колес, составляющих одну замкнутую силовую систему (рис. 3). Нагружение производится за счет упругости стального нагружающего валика, один конец которого, под действием внешнего крутящего момента, закручивается на определенный угол относительно другого. Недостатком этой конструкции является то, что угол закручивания валика не может быть большим, поэтому даже вследствие сравнительно небольшого износа зубьев испытуемых колес происходит настолько значительное относительное раскручивание на-

гружающего валика, что первоначальную нагрузку на испытываемые зубчатые пары необходимо для поддержания постоянства режима испытания регулярно контролировать и восстанавливать.

В испытательной машине конструкции Чудакова и Оси-пьяна этот недостаток устранен тем, что для нагружения испытываемых зубчатых пар используется сжатый воздух. Пневматическое нагружение в этой машине обеспечивает не только постоянство нагрузки, но и более плавное ее приложение.

Испытание зубчатых колес на долговечность производится до заранее установленного предельного износа зубьев или же до появления усталостного выкрашивания металла с рабочей поверхности зубьев.

5. Лабораторные расчлененные испытания деталей машин на долговечность

Для того чтобы свести до минимума число случайных сочетаний одновременно действующих факторов, влияющих на долговечность объектов испытания и выделить влияние наиболее важных, а также для того чтобы ускорить получение сравнимых результатов при выборе того или иного нового технологического варианта изготовления массовой детали можно применить так называемые «расчлененные» испытания.

При расчлененных испытаниях искусственно расчленяют общий процесс утраты деталью машины ее работоспособности на отдельные составляющие ее виды износов и каждый вид изучают отдельно. Такое расчленение и изучение отдельных факторов износа изолировано, хотя и не позволяет еще судить о комплексной эксплуатационной износостойкости деталей машин, но в качестве предварительных испытаний может дать ценные результаты.

Для пояснения сущности данного метода приведем пример расчлененных испытаний деталей подшипников качения, предложенный автором на 1-ом ГПЗ им. Кагановича в 1937 г. и доложенный им на Первой всесоюзной конференции по трению и износу в машинах, организованной Академией Наук СССР [Л. 4]. Этот метод испытания деталей подшипников качения был весьма успешно развит С. В. Пинегиным [Л. 5].

Как известно, в подшипниках качения износ внутренних рабочих поверхностей возникает вследствие одновременного действия качения и скольжения элементов качения по желобам колец. Следовательно, при расчлененных испытаниях подшипников качения возникает задача расчленить влияние этих двух факторов, что может быть достигнуто следующим образом:

1. Совместное испытание элементов качения (шариков или роликов) и колец на усталостную прочность при

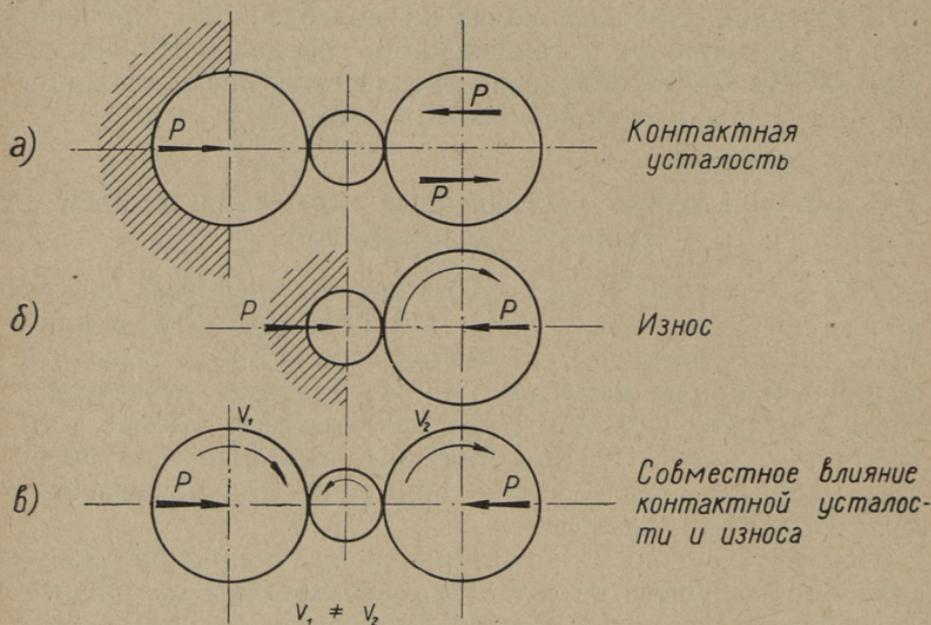


Рис. 4. Схема расчленения испытаний деталей шарикоподшипников.

соприкасании их без качения, под пульсирующей нагрузкой (рис. 4, а).

2. Испытание износостойкости элементов качения и колец при одном чистом скольжении их друг по другу под постоянной по величине нагрузкой (рис. 4, б).

3. Испытание элементов качения и колец при совместном действии усталости и износа, но без влияния ряда других факторов, влияющих на их работоспособность, возникающих при работе в целом подшипнике, поместив элемент качения между сжимающими его двумя внутренними кольцами (рис. 4, в).

Каждый из этих видов испытания приводит к результатам отдельно характеризующим: во первых, усталостную, контактную прочность материала элементов качения и колец; во вторых, его износостойкость, и, в третьих, его стойкость при совместном действии усталости и износа.

При проведении всех трех перечисленных испытаний исключается влияние на рабочую стойкость испытуемых деталей подшипника качения его радиального люфта и сепаратора, т. е. факторов, которые при испытании целых подшипников оказывают весьма большое влияние на разбег-рассеивание сроков службы отдельных объектов испытания.

6. Об обработке результатов массовых испытаний деталей машин на долговечность

Производя исследование партии нормальных объектов испытаний, взятой из текущей продукции машиностроительного завода, т. е. случайной выборочной совокупности, мы предполагаем, что по своей работоспособности и, вообще, по своим эксплуатационным свойствам объекты данной совокупности будут походить на объекты так называемой генеральной совокупности, т. е. на всю массу деталей машин, выпускаемую для работы в эксплуатационных условиях.

Выборочная совокупность, достаточно воспроизводящая эксплуатационную характеристику генеральной совокупности, называется репрезентативной. Следовательно, изучивши свойства объектов выборочной, репрезентативной совокупности, мы по ней судим, с некоторым неизбежным приближением, о свойствах всей генеральной совокупности.

Для выявления влияния того или иного фактора объекты испытания иногда подбираются и готовятся с определенными градациями отступлений данного фактора от его нормы. Такая совокупность уже не будет репрезентативной, а специальной.

Вследствие рассеивания результатов испытания деталей машин на долговечность, число объектов, составляющих ту или иную совокупность, не должно быть слишком малым. Согласно теории вероятностей: чем меньшим

числом наблюдений мы располагаем, тем больше построенная нами кривая распределения будет отличаться от кривой нормального распределения. Если же даже при большом числе наблюдений кривая распределения все же отличается от нормальной, то это следует рассматривать как указание на то, что наряду со случайными сочетаниями причин, влияющих на рассеяние результатов наблюдений, имеют место и неслучайные.

Достаточно надежные выводы при обработке результатов испытаний на долговечность, например, подшипников качения были получены в тех случаях, когда производилось испытание совокупности, состоящей из двадцати объектов испытания.

Обработку результатов массовых испытаний деталей машин на долговечность для составления обобщенных характеристик долговечности их в эксплуатационных условиях приходится неизбежно производить таким образом, что некоторая небольшая часть деталей машин, например, 10% заведомо не будет им удовлетворять, но зато 90% будут в действительности в эксплуатационных условиях более стойкими.

Изыскание, на основании результатов испытаний деталей машин на долговечность, таких режимов их работы, при которых гарантированный срок службы выдерживали бы 100% объектов выборочной репрезентативной и генеральной совокупности, практически привело бы к значительному понижению допускаемых напряжений, необеспечивающих дальнейшее нормальное развитие конструкций новых машин повышенной производительности.

При разработке методики испытаний деталей машин на долговечность эти испытания целесообразно подразделять на поисковые и контрольные, причем поисковые должны служить для вывода общей канонической формулы долговечности исследуемой детали, контрольные же — лишь для определения отдельных расчетных параметров применительно к тем или иным разновидностям, т. е. размерным или качественным вариантам исследуемой детали.

Под канонической формулой долговечности следует подразумевать некоторую обобщенную зависимость срока службы детали от условий ее работы.

Введение не только общих канонических формул долговечности, но и некоторых постоянных величин в них, на-

пример, показателя степени для расчета отдельных разновидностей однотипных деталей машин, практически является совершенно необходимым для обобщения расчетов. Было бы, например, невозможным для каждого типоразмера подшипников качения, а их около 2.000, дать свою особую расчетную формулу долговечности, с особым показателем степени и особыми дополнительными коэффициентами. Такое решение задачи было бы излишним также и потому, что абсолютной точности расчетов долговечности деталей машин достигнуть нельзя: эти расчеты всегда будут носить приближенный характер, вследствие неизбежного рассеяния сроков службы как при испытаниях, так и в обычных эксплуатационных условиях, поэтому представляется вполне допустимым введение некоторых общих для определенного числа разновидностей деталей данного типа, постоянных величин в общих формулах долговечности.

При расчете ряда деталей машин на долговечность можно воспользоваться следующей канонической формулой долговечности:

$$X = \frac{C}{(n \cdot h)^{\frac{s}{m}}}, \quad (1)$$

где n — число оборотов в минуту вала или одного из валов машины, пропорциональное числу циклов напряжений или трения, воспринимаемых рассчитываемой деталью,

h — долговечность детали, в рабочих часах,

C — коэффициент работоспособности детали или части машины,

X — нагрузка или фактор, определяющий специфические условия нагружения детали или части машины.

Если в качестве канонической формулы долговечности исследуемой детали машины принять выражение (1), то обработка результатов массовых деталей машин на долговечность может быть представлена следующим образом.

Выражение (1) в логарифмических координатах $\lg X$ и $\lg(n \cdot h)$ изображается прямой (рис. 5), причем если в эту систему координат внести результаты испытаний

и по ним провести эту прямую, то тангенс угла ее наклона будет равен $-\frac{s}{m}$, а на оси ординат прямая отсечет отрезок выражающий величину $lg C$.

Для определения коэффициента работоспособности и долговечности надо, однако, провести прямую таким образом, чтобы определенная часть, например, 10% ре-

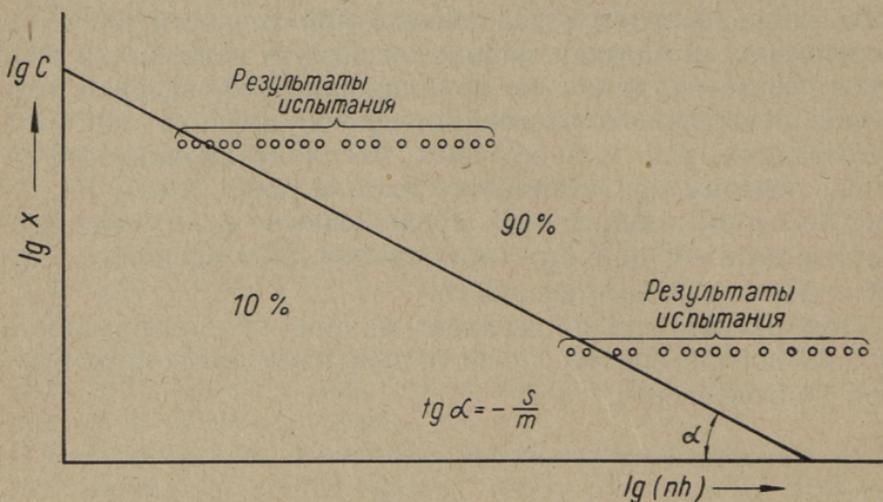


Рис. 5. Графическое изображение канонической формулы долговечности при обработке результатов массовых испытаний деталей машин на долговечность.

зультатов испытаний оказалась под нею, тогда предполагается, что отрезок отсекаемый данной прямой на оси ординат будет равен логарифму такой величины коэффициента работоспособности C , который обеспечит справедливость расчетной формулы для 90% объектов генеральной совокупности.

Формула (1) удобна также и для практических расчетов машин на долговечность, сводя расчетные формулы различных деталей к некоторому единому унифицированному виду.

ГЛАВА III

О МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

1. Основные элементы расчета деталей машин на долговечность

Первым шагом проектного расчета любой изнашивающейся детали машины на прочность и долговечность является выяснение того вида напряженного состояния (или трения), который при многократном циклическом повторном возникновении является основной предполагаемой причиной постепенной утраты деталью ее работоспособности, а также определение места, где это напряжение (или трение) имеет наибольшее значение для ее долговечности и работоспособности. Затем, пользуясь формулами теории сопротивления материалов или теории упругости, выводится аналитическое соотношение между основными размерами детали, величиной воспринимаемой нагрузки и величиной напряжения (или удельного давления), возникающего в изнашивающемся месте детали машины под действием этой нагрузки. Далее выясняется характер цикла напряжения в зависимости от периодической переменности нагрузки (или характер цикла трения в зависимости от характера относительного движения трущихся поверхностей).

При составлении расчетных формул выясняется также, какие именно материалы необходимы для изготовления деталей.

Далее необходимо произвести выбор марки материала и определение величины того допускаемого напряжения (или удельного давления), который выбранный материал может без повреждения выдержать до заданного числа повторных циклов напряжения или трения, т. е. в тече-

ние заранее запроектированной долговечности детали машины.

Размеры и, следовательно, вес деталей машин при их проектировании зависят как от величины воспринимаемой ими нагрузки, так и от величины допускаемого напряжения или удельного давления, в свою очередь, зависящих от запроектированной долговечности деталей машин в эксплуатации, поэтому для снижения веса деталей машин, а, следовательно, и веса машины в целом, имеет большое значение правильное и более или менее точное определение требуемого срока их работы, т. е. требуемой долговечности.

При расчетах деталей машин на долговечность их срок службы может быть выражен числом лет H_k работы или числом часов работы h или числом циклов напряжения (или трения) N_u , выдерживаемых деталями до их выхода из строя.

Календарная долговечность деталей машин и целых машин в годах H_k , т. е. долговечность, выраженная в годах их существования в рабочем состоянии с учетом действительного времени работы и действительных суточных простоев, может быть определена при помощи следующего выражения:

$$H_k = \frac{h}{8760 \cdot k_c \cdot k_2} = \frac{N_u}{525\,600 \cdot \nu \cdot k_c \cdot k_2} \text{ (лет)}, \quad (2)$$

где $k_c = \frac{h_c}{24}$,

h_c — продолжительность работы машины в течение суток (в часах),

$$k_2 = \frac{h_{\partial_2}}{365},$$

h_{∂_2} — продолжительность работы машины в течение года (в днях),

ν — число циклов напряжений или трения (в минуту).

В общем числе циклов N_u , выдерживаемых деталью, до выхода ее из строя, долговечность может быть выражена следующим образом:

$$N_u = 525\,600 \cdot \nu \cdot k_c \cdot k_2 = 60 \cdot h \cdot \nu = 60 \cdot k \cdot n \cdot h, \quad (3)$$

где k — коэффициент пропорциональности, а n — число оборотов ведущего вала.

В рабочих часах долговечность определяется следующим выражением:

$$h = 8760 \cdot H_k \cdot k_c \cdot k_z = \frac{N_u}{60 \cdot k \cdot n} = \frac{N_u}{60 \cdot v}. \quad (4)$$

Для определения допускаемых переменных напряжений можно использовать следующие формулы, приведенные в выпуске № 42 «Трудов Таллинского политехнического института» [Л. 6]:

$$\sigma_{rN} = \frac{2 \cdot \sigma_{-1} \cdot \left(\frac{N_6}{N_u} \right)^{\frac{1}{m}}}{[1 - r + \beta(1 + r)] \cdot K_0}, \quad (5)$$

где σ_{-1} предел усталости при симметричном знакопеременном цикле, при базовом числе циклов N_6 ,

r — коэффициент асимметрии цикла = $\frac{\sigma_{\text{мин}}}{\sigma_{\text{макс}}}$,

$$\beta = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_6},$$

K_0 — запас прочности.

При расчетном напряжении сдвига

$$\tau_{rN} = \frac{2 \cdot \tau_{-1} \cdot \left(\frac{N_6}{N_u} \right)^{\frac{1}{m}}}{[1 - r + \beta'(1 + r)] \cdot K_0}, \quad (6)$$

где $\beta' = \frac{\tau_{-1}}{\tau_6}$.

При износе детали вследствие истирания процесс трения можно также подразделить на циклы трения. Так, например, один оборот цапфы или шейки вала в подшипнике скольжения может быть принят за один цикл трения. При возвратно-поступательных же движениях трения подразделение процесса на циклы является еще более естественным.

Мощность, расходуемая на изнашивание материала детали на единице поверхности трения, может быть определена следующим образом:

$$N_{TP} = \frac{p \cdot f \cdot v}{75} = \frac{p \cdot f \cdot n \cdot k}{75},$$

где p — удельное давление, при котором приходит трение (в кг/мм²),

f — коэффициент трения,

v — относительная скорость движения трущихся поверхностей (в м/сек.),

k — коэффициент пропорциональности для перехода от v к n ,

n — число оборотов в минуту вала, кратное числу циклов трения.

Пользуемся далее некоторым «коэффициентом износоустойчивости» U представляющим собой отношение объема Δ_0 истертого металла к мощности N_0 и времени h_0 , затраченных на это истирание. Размерность этого коэффициента может быть $\frac{\text{мм}^3}{\text{час} \cdot \text{лс}}$,

причем определение его для материала каждого из изнашивающихся тел должно быть проведено экспериментально. При этом глубина изнашивания S , в зависимости от времени изнашивания для первого тела

$$S_1 = U_1 \cdot h \cdot \frac{N'_{TP}}{F_1}$$

и для второго тела

$$S_2 = U_2 \cdot h \cdot \frac{N''_{TP}}{F_2}.$$

Исходя и далее из предположения о прямой пропорциональности между объемом износа-истирания и мощностью, затраченной на это измельчение материала, найдем, что если

$$\frac{\Delta''}{\Delta'_0} = m = \frac{N''_{TP}}{N'_{TP}},$$

где Δ'_0 — объем износа более изнашивающегося материала (в мм³),

Δ_0'' — объем износа более износостойкого материала, за то же время изнашивания (в мм^3),

то

$$N'_{TP} = \frac{N_{TP}}{m+1}; \quad N''_{TP} = \frac{m \cdot N_{TP}}{m+1},$$

откуда далее

$$\begin{aligned} S &= S_1 + S_2 = U_1 \cdot h \cdot \frac{N'_{TP}}{F_1} + U_2 \cdot h \cdot \frac{N''_{TP}}{F_2} = \\ &= \frac{h \cdot N_{TP}}{m+1} \left(U_1 \cdot \frac{1}{F_1} + U_2 \cdot \frac{m}{F_2} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

В случае, если износ второго тела очень мал и практически не имеет существенного значения для определения долговечности и работоспособности данного конструктивного узла, то при заданной допускаемой величине зазора $|S|$ можно пренебречь износом второго тела и выражение (7) тогда может быть представлено в следующем виде:

$$S = U_1 \cdot h \cdot \frac{N_{TP}}{F_1} = U_1 \cdot h \cdot \frac{p \cdot f \cdot n \cdot k}{75 \cdot F_1},$$

откуда

$$h = \frac{75 \cdot |S| \cdot F_1}{U_1 \cdot p \cdot f \cdot n \cdot k} \dots \quad (8)$$

или согласно выражению (1):

$$C = p \cdot (n \cdot h) = \frac{75 \cdot |S| \cdot F_1}{U_1 \cdot f \cdot k}, \quad (9)$$

где C — коэффициент работоспособности детали данного вида, зависящий от их размера (F_1), износостойкости материала (U_1) кинематических соотношений (k) и допускаемого зазора $|S|$.

Признание вышеприведенной методики расчета долговечности деталей машин при износе-истирании целесообразной, хотя и подтверждается некоторыми практическими данными, но нуждается еще в детальной проверке.

Практически эта методика может быть использована с достаточной надежностью лишь при условии создания соответствующего прибора для определения «коэффициента износостойкости» машиностроительных материалов.

2. Примеры расчета деталей машин на долговечность

К числу наиболее распространенных изнашивающихся деталей машин относятся зубчатые передачи, расчет которых на прочность в последнее время принято связывать с долговечностью, поэтому в качестве примера использования предложенных формул для расчета деталей машин на долговечность целесообразно привести расчет зубчатой передачи.

Следуя ранее намеченной последовательности, придем к следующему порядку расчетных действий при расчете на прочность и долговечность одноступенчатого редуктора, состоящего из прямозубого, некоррегированного, стандартного, эвольвентного зацепления.

Будем исходить из предположения, что наиболее опасным для прочности и долговечности данной зубчатой передачи является максимальное напряжение сдвига $\tau_{\text{макс}}$, возникающее на некоторой глубине от рабочей поверхности зуба, при этом

$$\tau_{\text{макс}} = 0,127 \sqrt{\frac{q \cdot E}{\rho_0}},$$

где q — давление на единицу длины зуба,
 E — приведенный модуль упругости,
 ρ_0 — приведенный радиус кривизны соприкасающихся зубьев.

Это выражение путем общеизвестных преобразований можно, полагая $E = 2,15 \cdot 10^6$ кг/см², привести к следующему виду:

$$A^3 = (1 + i)^3 \frac{90000^2}{i^2 \cdot |\tau|_{\text{ш}}^2} \cdot \frac{N}{n_2 \cdot \psi'}, \quad (10)$$

где N — передаваемая мощность, в л. с.,
 A — межосевое расстояние (в см),
 i — передаточное число передачи,
 $|\tau|_{\text{ш}}$ — допускаемое напряжение сдвига для материала шестерни (в кг/см²),
 n_2 — число оборотов, в минуту зубчатого колеса,
 b — длина зуба (в см),
 $\psi' = \frac{b}{A}$.

Для изготовления шестерни и зубчатого колеса выбрана сталь. Пользуясь выражением (6) получаем при $r = 0$

$$|\tau|_u = \frac{2 \cdot \tau_{-1} \cdot \left(\frac{N_\delta}{N_a}\right)^{\frac{1}{m}}}{(1 + \beta') \cdot K_0} \quad (11)$$

Подставив в (10) выражение (11) и принимая, как это практикуется на ряде крупных машиностроительных заводов (например, на Уральском заводе тяжелого машиностроения) величину $m = 6$, полагая при этом

$$\beta' \cong 0,4 \text{ получим}$$

$$\frac{A^3 \cdot i^2 \cdot \psi' \cdot \tau_{-1}^2}{75 \cdot 10^6 \cdot (1 + i)^3} = C = \frac{N}{n_2} \cdot (n_1 \cdot h)^{\frac{1}{3}} \cdot K, \quad (12)$$

где n_1 — число оборотов шестерни в минуту.

Величина K согласно данным, почерпнутым из практики, может быть взята из табл. 1.

Таблица 1

Поправочные коэффициенты K , учитывающие режим работы редуктора

Характер нагрузки	Примеры использования редуктора в приводе различных машин.	K
Равномерная	Транспортеры, элеваторы, центробежные насосы и т. п.	1—1,05
Неравномерная	Коробки передач, крановые передачи, грохоты, мешалки, мельницы, прокатные станы и т. п.	1,10
Ударная	Дробилки руды и камня, ковочные машины, подъемники клетьевые и скиповые.	1,30

В выражении (12) коэффициентом работоспособности S характеризуется работоспособность и долговечность зубчатой передачи, что весьма удобно с одной стороны при выборе для заданных условий работы, т. е.

$$\text{для } \frac{N}{n_2} (n_1 \cdot h)^{\frac{1}{3}} \cdot K$$

уже готового редуктора, а с другой стороны позволяет в сжатой форме характеризовать работоспособность существующего (или проектируемого) редуктора для некоторого диапазона вариантов условий работы.

В 1933 г. автором аналогичный метод расчета, т. е. при помощи коэффициента работоспособности S , был предложен для расчета подшипников качения, причем этот метод получил широкое распространение в СССР [Л. 7]. Распространение этого метода расчета на редукторы с зубчатыми передачами, в которых, как известно, установлены также и подшипники качения, кажется вполне уместным, позволяя в удобной форме связать между собой расчеты этих основных изнашивающихся деталей редуктора кратными сроками службы, что имеет большое значение для правильной организации планово-предупредительных ремонтов.

Если при очередном пересмотре параметров расчета подшипников качения в формуле (1) величина m будет принята равной 9, как это уже давно предполагается

сделать, тогда выражение $(n \cdot h)^{\frac{s}{m}}$ и при расчете подшипников качения, так же как и при расчете зубчатых передач, войдет в унифицированную формулу долговечности под одинаковым показателем степени, т. е. в виде

$$(n \cdot h)^{\frac{1}{3}}.$$

Машиностроительный завод может составить таблицу работоспособности и долговечности, изготавливаемых им редукторов, по форме, например, представленной в табл. 2.

Таблица 2

Редукторы одноступенчатые с прямыми зубчатыми цилиндрическими зубчатыми колесами при следующих данных: $b = 0,4 A$, $i = 2,5 \div 4,0$ и материал шестерни Ст. 6 ($\tau_{-1} = 1800 \text{ кг/см}^2$)

Межосевое расстояние A в см	Числа оборотов ведущего вала n_1 об/мин	Коэффициент работоспособности $C = \frac{N}{n_2} (n_1 \cdot h)^{\frac{1}{3}} \cdot K$
20	750—1500	10—20
25	" — "	20—40
30	" — "	35—65
35	" — "	60—100
40	" — "	90—160
45	" — "	125—230
50	500—1000	180—320
60	" — "	300—550
70	" — "	480—860
80	" — "	710—1280

Таблица 2 может быть уточнена если диапазон передаточных чисел разбить на два (например, 2,5—4,0, 4,0—6).

В случае проектного расчета зубчатой передачи выражение (12) можно использовать следующим образом.

Сначала соответственно заданным условиям (N ; n_1 ; n_2 ; h и K) целесообразно определить необходимую величину коэффициента работоспособности C при помощи следующего выражения:

$$C = \frac{N}{n_2} (n_1 \cdot h)^{\frac{1}{3}} \cdot K. \quad (13)$$

В формулы (12) и (13) в качестве фактора, определяющего специфические условия нагружения, введено отношение $\frac{N}{n_2}$, потому что в практике некоторых крупных машиностроительных заводов [Л. 10] это отношение принято для выбора редукторов. Между тем было бы более правильным формулу (13) представить следующим образом:

$$C = M_{кр} \cdot (n_1 \cdot h)^{\frac{1}{3}} \cdot K, \quad (13a)$$

где $M_{кр}$ — крутящий момент на ведомом валу (в кг см).

Выражение (12) для определения межосевого расстояния A далее можно представить в следующем виде:

$$A = 422 \cdot (1 + i) \cdot \sqrt[3]{\frac{C}{\psi' \cdot i^2 \cdot \tau_{-1}}} \quad (14)$$

После определения окружной скорости запроектированной зубчатой передачи, в заключение выбирается класс точности ее изготовления.

Если зубчатая передача, как это иногда бывает, работает при переменной мощности и при различных числах оборотов, то необходимо определить некоторую величину $\left(\frac{N}{n_2}\right)_{\text{ЭКВ}}$, которая по своему влиянию на долговечность зубчатой передачи была бы эквивалентна данным переменным режимам.

В этом случае также может быть использована методика, применяемая при расчете подшипников качения [Л. 8], в аналогичных случаях, т. е.

$$\left(\frac{N}{n_2}\right)_{\text{ЭКВ}} = \sqrt[3]{\alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{N}{n_2}\right)_1^3 + \alpha_2 \cdot \beta_2 \cdot \left(\frac{N}{n_2}\right)_2^3 + \dots + \alpha_n \cdot \beta_n \cdot \left(\frac{N}{n_2}\right)_n^3}, \quad (15)$$

где $\left(\frac{N}{n_2}\right)_1; \left(\frac{N}{n_2}\right)_2 \dots \left(\frac{N}{n_2}\right)_n$ — величины, соответствующие режимам работы 1, 2... n . При этом $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$ доли общей продолжительности работы (принимаемой за единицу), при которых редуктор работает соответственно на режимах 1, 2... n .

Величины $\beta_1, \beta_2, \dots \beta_n$ соответственно

$$\beta_1 = \frac{(n_1)_1}{n_1}; \beta_2 = \frac{(n_1)_2}{n_1} \dots \beta_n = \frac{(n_1)_n}{n_1},$$

причем n_1 можно выбрать произвольным в пределах данного переменного режима, но удобнее все же его выбирать такой величины, при которой редуктор работает наибольшее время.

При работе на переменных режимах в формуле (13) следовательно требуется принять в расчет $\left(\frac{N}{n_2}\right)_{\text{ЭКВ}}$.

Для работоспособности в валов, кроме долговечности, имеет также большое значение и их жесткость, т. е. не превышение их упругих деформаций некоторого предела, который еще допустим для нормальной работы других деталей, установленных на них. Если, впрочем, расчет валов на долговечность проведен по длительным срокам их работы, как это и соответствует машиностроительной и ремонтной практике, которая указывает на целесообразность проектирования валов, в большинстве случаев, на весь срок службы машины, то условие жесткости вала, обычно, при этом оказывается выполненным.

Как показывает опыт при расчете валов на сроки службы в 30 000 рабочих часов и выше, необходимая жесткость валов, в большинстве случаев, оказывается в допускаемых пределах.

Общеизвестный приближенный расчет валов, приведенный к расчету на долговечность, принимает при этом следующий вид (при постоянных значениях $M_{изг}$ и $M_{кр}$), используя выражения (1), (3) и (5):

$$|\sigma|_{-1N} = \frac{\sigma_{-1}}{K} \cdot \left(\frac{10^7}{N_u} \right)^{\frac{1}{m}} = \frac{\sigma_{-1}}{K} \cdot \left(\frac{10^7}{60 \cdot n \cdot h} \right)^{\frac{1}{m}} = \frac{\sqrt{M_{изг}^2 + M_{кр}^2}}{0,1 \cdot d^3},$$

откуда, полагая $m = 10$ (для изгиба, обычно, эта величина принимается равной 9 или 10) получаем

$$\sigma_{-1} \cdot d^3 \cdot \left(\frac{10^7}{60} \right)^{\frac{1}{10}} \cdot 0,1 = \frac{\sigma_{-1} \cdot d^3}{3} = C = \sqrt{M_{изг}^2 + M_{кр}^2} \cdot (n \cdot h)^{\frac{1}{10}} \cdot K, \quad (16)$$

где σ_{-1} — предел усталости стали, при знакопеременном цикле (в кг/см²),

d — диаметр вала в опасном сечении (в см),

K — поправочный коэффициент равный произведению коэффициента концентрации напряжения, коэффициента, учитывающего чистоту обработки поверхности вала, приближенного значения масштабного фактора и других коэффициентов, учитывающих понижение номинальной прочности вала,

$M_{изг}$ и $M_{кр}$ — соответственно моменты изгибающий и крутя-

щий, действующие в опасном расчетном сечении (в кг см).

Для определения в формуле (16) величины $(n \cdot h)^{\frac{1}{10}}$ практически можно воспользоваться широко распространенными при расчете подшипников качения табличными значениями $(n \cdot h)^{0,3}$, путем извлечения из соответствующего значения $(n \cdot h)^{0,3}$ кубического корня.

Как и в предыдущем случае, после того как будет определена требуемая по условиям работа вала величина коэффициента работоспособности C , например, по таблице 3 можно определить диаметр вала в опасном сечении.

Для определения коэффициента K можно воспользоваться общеизвестными значениями входящих в него коэффициентов.

В случае работы вала при переменных режимах не представляет особых затруднений определить соответствующую величину $(\sqrt{M_{изг}^2 + M_{кр}^2})_{экр}$, аналогично тому, как это было сделано в предыдущем случае (выражение 15).

Таблица 3

Зависимость между значениями коэффициента работоспособности вала C и диаметром вала в опасном сечении при $\sigma_{-1} = 2400$ кг/см (Ст. 5)

C	d в см.
800	1,0
2700	1,5
6400	2,0
12500	2,5
21600	3,0
34300	3,5
51200	4,0
72900	4,5
100 000	5,0
133 100	5,5
172 800	6,0
219 680	6,5
274 400	7,0

3. О методике проектных и поверочных расчетов машин и их деталей на долговечность

Как известно, прочностной расчет машин и их деталей на долговечность может носить характер проектного при разработке и развитии конструкции нового варианта существующей машины или при проектировании машины нового устройства и может носить характер поверочного, задачей которого является оценка работоспособности той или иной существующей машины для заданных условий ее использования по ее готовому действующему образцу (паспортизация) или по ее чертежам.

Для проектного, прочностного расчета машины и ее деталей на долговечность необходимо располагать следующими данными:

1. Техническая норма производительности существующей машины (используемой во время проектирования новой машины) или группы машин, предполагаемых заменить новой, проектируемой.

2. Проектируемая техническая норма производительности новой машины.

3. Запланированный на предстоящие сроки среднегодовой прирост производительности труда в народном хозяйстве СССР или в ее отдельной отрасли промышленности, если повышение производительности труда в этой отрасли более или менее значительно отличается от среднегодового прироста во всем народном хозяйстве СССР.

4. Предварительный проект новой машины.

После того как при дальнейшей разработке проекта машины были разрешены вопросы достижения высокой производительности, безвредности и безопасности работы машины для обслуживающего (и обслуживаемого) персонала, удобства и простоты ее наладки и управления, а также вопросы выбора наилучшей технологии изготовления ее деталей, при применении недефицитных материалов, — необходимо еще решение задачи обеспечения надежной, бесперебойной работы ее в эксплуатационных условиях.

Успешное решение этой последней задачи связано с окончательным установлением конструктивных размеров деталей машин на основании прочностного расчета, произведенным с учетом таких сроков их службы, которые

соответствуют удобным для использования машины межремонтным периодам.

Последовательность прочностного расчета проектируемой машины можно наметить в следующем порядке, учитывая также выводы, сделанные автором в его прежних работах (Л. 6).

Прежде всего необходимо определение ориентировочного проектного срока H_k службы всей машины, причем если для этого не имеется каких-либо других специфических для данной отрасли промышленности исходных материалов и указаний, таковой может быть произведен при помощи следующей формулы (рис. 6):

$$H_k = \frac{\lg \mu \cdot \frac{m_H}{m_0}}{\lg \left(1 + \frac{K}{100}\right)} = \frac{\lg 1,5 \cdot \frac{m_H}{m_0}}{\lg \left(1 + \frac{K}{100}\right)}, \quad (17)$$

где

m_H — техническая норма производительности проектируемой новой машины,

m_0 — техническая норма производительности машины (или группы машин, ранее выполняющих операции, проектируемые для совмещенного выполнения при помощи новой машины), используемой во время проектирования машины,

K — средний годовой прирост производительности труда (в процентах) в народном хозяйстве СССР (около 7—8% в год) или в данной отрасли промышленности, если средний ежегодный прирост производительности труда в этой отрасли значительно отличается от среднего годового во всем народном хозяйстве СССР.

Далее необходимо выделить из общего числа проектируемых конструктивных узлов и деталей новой машины те, которые по характеру своей работы могут быть причислены к наиболее изнашивающимся. Выделение таких деталей не представляет больших затруднений, потому что в подавляющем большинстве случаев, к ним относятся зубчатые передачи и подшипники качения, причем, обычно, представляется даже возможным выделенные детали расположить по некоторой нисходящей интенсивности их износа.

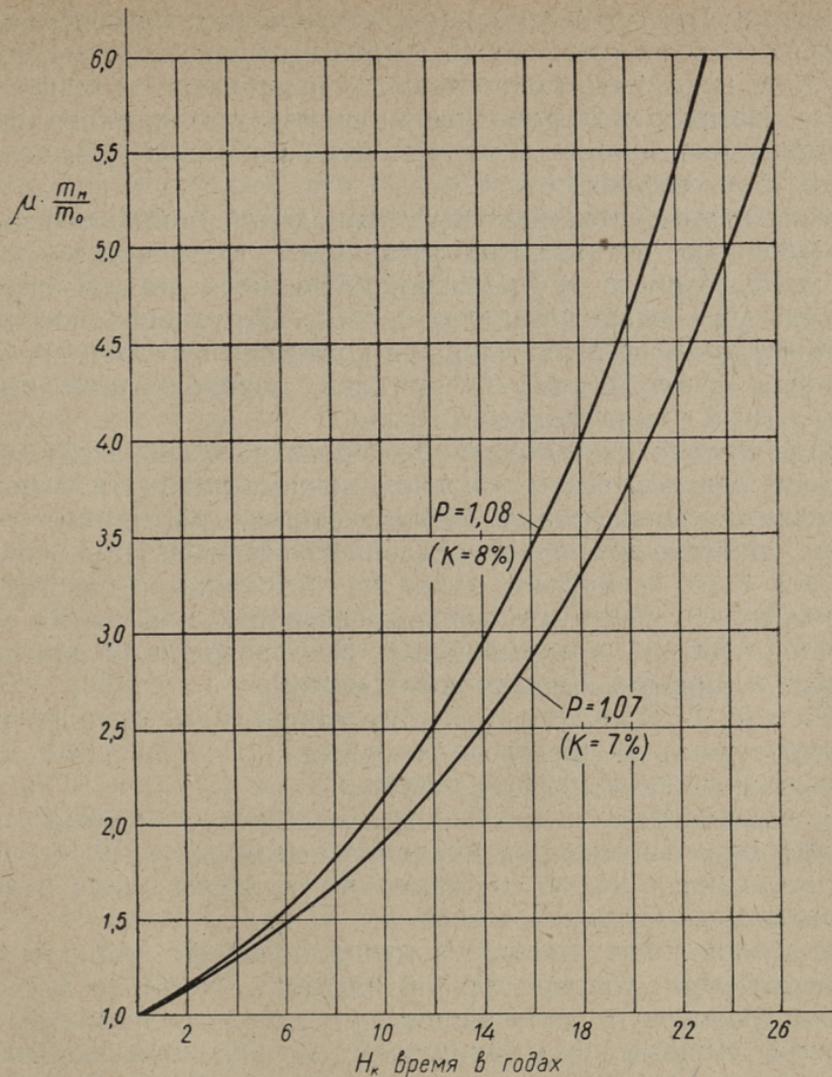


Рис. 6. Диаграмма зависимости между величинами H_k и $\mu \cdot \frac{m_n}{m_0}$.

Расчет наиболее нагруженных и наиболее изнашивающихся деталей на полную долговечность всей машины, обычно, приводит к неконструктивно громоздким размерам их или же для достижения такой долговечности требуются исключительно высококачественные и дефицитные материалы (специальные стали, баббит и т. п.) или же

слишком дорогая и трудоемкая технология, поэтому полный проектный срок службы машины целесообразно разбить на некоторые межремонтные периоды, т. е. производить замену наиболее изнашивающихся деталей при средних или капитальных ремонтах или даже при текущих, т. е. ежегодно.

Как только межремонтный период для наиболее изнашивающихся деталей был установлен, то расчетные сроки долговечности других изнашивающихся деталей определить уже не представляет особых затруднений, потому что они должны быть выбраны кратными срокам этих основных, изнашивающихся деталей, определяющим весь ремонтный цикл машины.

При наличии установленного проектного срока службы детали при некотором основном режиме работы или приведенном к некоторому эквивалентному, расчетному режиму работы детали, определение ее основных размеров может быть проведено далее на основании существующего метода ее расчета на долговечность, или же на основании метода, который может быть разработан при помощи изложенных нами предпосылок.

Задачи поверочного расчета машин и их деталей на долговечность могут быть различны, но, в основном, их можно подразделить на следующие:

1. Оценка работоспособности и долговечности новой машины, применительно к предполагаемому режиму ее использования, с целью составления структуры цикла и номенклатуры запасных частей.

2. Составление паспорта существующей машины с определением той предельной нагрузки, которая может быть допущена в дальнейшем при использовании исследуемой машины, при приемлемых по условиям эксплуатации, ремонтных периодах.

3. Выяснение, исходя из известного срока и режима использования машины в прошлом, ресурсов ее работоспособности в дальнейшем при том же или новом режиме ее работы, причем должен быть уточнен также вопрос о номенклатуре запасных частей.

Поверочный расчет может быть предпринят по чертежам машины или по существующей в натуре машине. В последнем случае нельзя обойтись без снятия эскизов с ее изнашивающихся деталей, что связано с разборкой машины, которая, сама по себе может неблагоприятно

отразиться на дальнейшей работоспособности машины, в особенности, если эта разборка производилась в последних стадиях работоспособности машин.

Следует также учесть, что оценка работоспособности и долговечности изнашивающихся деталей машин может быть сделана более или менее точно только в том случае, если известны механические свойства их материалов, о которых, однако, при рассмотрении готовых деталей можно судить приблизительно лишь по их твердости.

Это последнее обстоятельство хотя и снижает несколько точность прогнозов о предполагаемой долговечности изучаемых машин и их деталей, но все же не лишает их практического смысла и целесообразности.

Общая последовательность поверочных расчетов при оценке работоспособности и долговечности новой машины, применительно к определенному предполагаемому режиму ее использования, может быть представлена следующим образом:

1. Выделяются наиболее изнашивающиеся детали и устанавливаются их размеры, чистота и точность обработки рабочих и несущих поверхностей, а также механические свойства металла.

2. По заданному или предполагаемому режиму использования машины определяется расчетная долговечность изнашивающихся деталей, для чего канонические расчетные формулы долговечности (1) решаются относительно срока службы.

3. По детали, для которой, по расчету на долговечность, срок службы оказался наименьшим, устанавливается основной межремонтный период, причем для остальных изнашивающихся деталей устанавливаются сроки службы, кратные этому основному ремонтному периоду, с неизбежными округлениями и приближениями. Если для какой-либо изнашивающейся детали расчетный срок таков, что он заканчивается по середине предстоящего межремонтного интервала, то во время последнего ремонта оценка дальнейшей работоспособности детали должна быть произведена по заданным внешним признакам (состояние поверхностей, величина зазоров и т. п.) и вопрос о допущении этой детали к дальнейшей работе в течение полного ремонтного периода решается на месте.

При хорошем уходе за машиной или станком, как показывает опыт передовиков производства, сроки службы

изнашивающихся деталей могут быть значительно повышены, поэтому, предпринимая замену изнашивающихся деталей, следует придавать большое значение истинному состоянию изношенности этих деталей. Следовательно, большое значение имеет при составлении прогнозов о предполагаемой долговечности изнашивающихся деталей, установление, по мере возможности, основных внешних признаков, характеризующих степень их изношенности и указание данных, на основании которых можно допускать продление расчетных сроков службы деталей в эксплуатационной обстановке.

В случае проведения поверочного расчета при выяснении ресурсов дальнейшей работоспособности и долговечности уже частично изношенных машин — общая последовательность расчетов может быть намечена следующим образом:

1. По глубине износа и действующим нагрузкам, а также исходя из проработанного уже срока службы изучаемой машины, определяется соответствие (или степень несоответствия) установленных фактических данных об износе с допускаемыми величинами.

2. Исходя из допускаемого, дальнейшего увеличения зазоров и практически принятой прямой зависимости между износом и сроками службы делается предположение о дальнейшей работоспособности детали.

3. Для деталей теряющих свою работоспособность вследствие возникновения контактных усталостных явлений или усталостных явлений по рабочему сечению, можно приближенно, при известном коэффициенте работоспособности C , пользуясь выражением (1) и выводами приведенными к формуле (15), для деталей уже работавших некоторое время, определить их остаточную работоспособность и долговечность при другом режиме работы при помощи следующего выражения:

$$h_2 \cdot n_2 \cdot X_2^{\frac{m}{s}} = C^s - h_1 \cdot n_1 \cdot X_1^{\frac{m}{s}}, \quad (18)$$

где величины с индексом 1 относятся к режиму прошлой работы детали, а с индексом 2 — к режиму предстоящей работы.

В выражении (18) по двум заданным величинам второго режима можно определить третью (например, h_2).

4. Установление межремонтных периодов, в данном случае представляет некоторые особые затруднения, потому что после произведенного обследования машины, ремонтные периоды, повидимому, должны быть установлены по остаточным срокам изнашивающихся деталей, а последующие уже на основании общих расчетных предположений.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Трейер, Проблема долговечности машин, журнал «Социалистическая реконструкция и наука», выпуск 7, 1934 г.
2. Б. И. Кулагин, Наука и стахановский опыт, сборник статей «Творческое содружество науки и производства», Профиздат 1952 г.
3. И. Б. Бурлаков, Пять лет без заводского ремонта, изд. «Правда» 1950 г.
4. В. Н. Трейер, Вопросы исследования износа и усталостных явлений в подшипниках качения, «Доклады Всесоюзной Конференции по трению и износу в машинах», т. 1, 1939 г.
5. С. В. Пинегин, Работоспособность деталей подшипников, Машгиз, 1949 г.
6. В. Н. Трейер, Основные вопросы теории долговечности, «Труды Таллинского политехнического института», выпуск № 42, 1953 г.
7. В. Н. Трейер, Нормализация грузоподъемности стандартных шарикоподшипников, «Вестник стандартизации» № 4, 1933 г.
8. В. Н. Трейер, Теория и расчет подшипников качения, Машгиз, 1936 г.
9. Д. Н. Решетов, Расчет деталей станков, Машгиз, 1945 г.
10. М. И. Анфимов, Типизация цилиндрических редукторов (конструкция и выбор), сборник статей «Конструирование машин и оборудования». Уралмашзавода, Машгиз, 1952 г.
11. Д. Г. Житков, Теоретические основы конструирования и исследования рудничных круглопрядных стальных канатов, автореферат, 1951 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

Глава I

Введение	6
--------------------	---

Глава II

О методике исследования долговечности машин и их деталей

1. Основные виды исследования долговечности машин и их деталей	13
2. Натурно-эксплуатационные исследования машин и их деталей на долговечность	14
3. Натурные исследования полностью изношенных машин	18
4. Лабораторные испытания целых деталей машин на долговечность	19
5. Лабораторные расчлененные испытания деталей машин на долговечность	23
6. Об обработке результатов массовых испытаний деталей машин на долговечность	25

Глава III

О методике расчета деталей машин на долговечность

1. Основные элементы расчета деталей машин на долговечность	29
2. Примеры расчета деталей машин на долговечность	34
3. О методике проектных и поверочных расчетов машин и их деталей на долговечность	41
Литература	47

*Редактор Е. Соонвалд
Технический редактор Х. Коху
Корректор И. Рамми*

Сдано в набор 18 VIII 1953. Подписано к печати 7 X 1953. Тираж 800. Бумага 54 × 84, 1/16. Печатных листов 3. По формату 60 × 92 печатных листов 2,46. Учетно-издательских листов 2,26. МВ-12461. Типография имени Ханса Хейдемманна, Тарту, Валликраави 4. Заказ № 3185.

Цена 1 р. 60 к.

ТКО