

Ep 6.7

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

СЕРИЯ А

№ 42

1953 г.

В. Н. ТРЕЙЕР

ПРОФЕССОР, ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАШИН

P 15606

ENOV Teaduste Akadeemia
Kesktalenduskogu



ЭСТОНСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИН 1953

ВВЕДЕНИЕ.

Непрерывное совершенствование производства в СССР на базе высшей техники неотделимо от широкого использования машин, сберегающих труд обществу и облегчающих труд рабочих. Машины делают труд более безопасным и производительным, способствуя при этом повышению материального и культурного уровня жизни трудящихся. Широкое распространение сложных машин, наладка и регулирование которых может быть произведено лишь работниками высокой квалификации, приводит постепенно к уничтожению в нашей стране существенного различия между умственным и физическим трудом и, что является особенно важным, развитие машиностроения и механизации трудоемких процессов ускоряет создание материально-технической базы для постепенного перехода от социализма к коммунизму.

В директивах XIX съезда партии по пятой сталинской пятилетке перспективы развития машиностроения сформулированы следующим образом:

«Предусмотреть высокие темпы развития машиностроения как основы нового мощного технического прогресса во всех отраслях народного хозяйства СССР. Увеличить производство продукции машиностроения и металлообработки за пятилетие, примерно, в 2 раза... При конструировании новых машин добиваться снижения их веса при улучшении качества».

Советские ученые-машиностроители вместе с конструкторами и технологами машиностроительных заводов прилагают все усилия к тому, чтобы успешно выполнить эту поставленную перед ними задачу. Ряд новых высокопроизводительных машин уже внедряется в производство и выступает как новый резерв в досрочном выполнении пятого пятилетнего плана развития СССР. В содружестве с учеными новую технику успешно разви-

вают и двигают вперед новаторы производства, мастера высокопроизводительного, стахановского труда.

Огромное значение развития именно орудий производства, для развития производительных сил общества, для развития производства, вытекает из следующего определения особенностей производства, изложенных товарищем Сталиным в его выдающемся труде «О диалектическом и историческом материализме» (И. Сталин, Вопросы ленинизма, изд. 11, 1945 г., стр. 551—552):

«Первая особенность производства состоит в том, что оно никогда не застревает на долгий период на одной точке и находится всегда в состоянии изменения и развития... Вторая особенность производства состоит в том, что его изменения и развитие начинаются всегда с изменений и развития производительных сил, прежде всего — с изменений и развития орудий производства».

Так как в современном производстве основными орудиями производства являются машины, то из этого определения вытекает также, что любая современная машина не может неопределенно долго удовлетворять предъявляемым к ней все возрастающим требованиям со стороны развивающегося производства и что она, со временем, неизбежно должна быть заменена другой, более совершенной и более производительной, причем срок этой замены зависит от общего среднего прироста производительности труда в народном хозяйстве или даже от прироста производительности труда в отдельной отрасли промышленности, если ежегодный прирост производительности труда в этой отрасли значительно отличается от общего среднего. Следовательно, фактор времени при использовании машин в социалистической промышленности, т. е. срок их использования в производстве с наилучшим экономическим эффектом или, иначе говоря, их экономически оправданная долговечность, является важнейшим фактором, определяющим общий ход технического прогресса в народном хозяйстве.

Поскольку развитие технического прогресса теснейшим образом связано с увеличением производительности машин, а следовательно, связано с увеличением их мощности и скорости движения их частей, при снижении веса, то неизбежно повышение напряженности режимов работы деталей машин, что в свою очередь влечет собой усиление их физического износа и необходи-

мость тщательного изучения явлений износа с целью ослабления его интенсивности и продления таким образом межремонтных сроков службы как отдельных деталей машин, так и целых машин и станков.

Однако наибольший экономический эффект от продления сроков службы деталей машин может быть достигнут лишь в том случае, если величина этого продления может быть заранее предсказана и включена в соответствующий план планово-предупредительных ремонтов машин, что возможно только при наличии предварительных расчетов деталей машин на долговечность и при уточнении этих расчетов на основании данных практики.

До сих пор фактор времени при обеспечении надежной прочности машин и их деталей учитывался лишь постольку, поскольку решение ряда конкретных задач совершенно невозможно без учета этого фактора. Так, некоторые изнашивающиеся детали машин и даже некоторые целые машины при конструировании практически уже рассчитываются на долговечность. К таким деталям машин относятся: подшипники качения, все виды зубчатых и фрикционных передач, стальные канаты, валы и ряд специальных деталей машин. К целым машинам, долговечность которых в нормальных условиях работы уже в значительной мере изучена, относятся автомобили, тракторы, авиационные моторы и электродвигатели.

Однако используемые в настоящее время, при конструировании машин, расчеты их деталей на долговечность не только еще не совершенны, но и ведутся обособленно, независимо друг от друга, без обобщающей их теории, даже в пределах одной и той же машины. Кроме того, что особенно важно, эти расчеты обычно не бывают связаны с задачами сохранения первоначального высокого качества машин в течение всего их срока службы, т. е. не связаны с задачами составления планов планово-предупредительных ремонтов и не связаны с задачами обеспечения планомерного обновления машинного парка, в частности, с проблемой накопления резервного амортизационного фонда.

Направление в науке о прочности, износостойкости и работоспособности машин, учитывающее фактор времени при конструировании и использовании машин на производстве, т. е. теория долговечности машин, непосредственно вытекает из насущных задач ближай-

шего будущего в развитии социалистической промышленности и сельского хозяйства, поставленных в директивах XIX съезда партии по пятой сталинской пятилетке, и выводит науку о прочности машин из узкой расчетно-конструкторской замкнутости, расширяя ее границы до смежных технических и социально-экономических проблем.

В чем же заключается сущность этого нового направления в науке о прочности и износостойкости машин, которое придает большое значение фактору времени?

При социализме производительность труда возрастает планомерно и гораздо скорее, чем при капиталистическом способе производства, причем не за счет увеличения физической нагрузки трудящихся, а за счет лучшей организации труда, механизации и планомерного введения в производство новых, более совершенных и высокопроизводительных машин, вплоть до образования целых автоматических линий станков, использование которых производится бесперебойно.

Следовательно, обновление машинного парка при социализме должно производиться планомерно и притом скорее, чем при капиталистическом способе производства. При этом, чтобы не допустить физического недоиспользования машин, целесообразно строить их с учетом заранее выбранной и экономически оправданной долговечности, поделив общий предполагаемый срок службы машины на ряд межремонтных интервалов, что вполне согласуется и с физической стороной дела, поскольку детали машин, работающих при больших скоростях и больших нагрузках, могут надежно работать, как показывает опыт, лишь в течение определенных межремонтных периодов.

Таким образом, задача сводится к тому, чтобы при проектировании и постройке машин в расчет принимался такой срок их службы, т. е. такой срок их физической работоспособности, который способствовал бы наиболее полному их использованию и оправдывался бы экономически.

Конструирование новых машин, основанное на новейших современных методах расчета долговечности их наиболее изнашивающихся деталей, позволяет уже теперь при выпуске новых машин с машиностроительных

заводов препровождать вместе с ними более или менее подробные данные для составления плана планово-предупредительных ремонтов с номенклатурой наиболее изнашивающихся запасных частей и предполагаемой последовательностью постановки этих запасных частей в машину во время ремонтов, между тем эта сторона обеспечения бесперебойной работоспособности машин до сего времени недостаточно развита, может быть, и вследствие отсутствия некоторой «теории долговечности машин».

Далее, как известно, финансовая база обновления машинного парка основывается на накоплении амортизационного фонда для ремонта и воспроизводства изношенных машин. Преждевременное, до выхода машин из строя, накопление амортизационного фонда вызывает искусственное повышение себестоимости продукции — отставание же накопления этого фонда от действительного окончания срока службы машин должно привести к недостатку средств для воспроизводства машинного парка в нужный момент, т. е. тогда, когда изношенные машины потребуются заменить новыми. Эти недостатки могут быть устранены, если для вводимых в производство новых машин будет задана, хотя бы приближенно, их долговечность.

Следовательно, введение в науку о прочности и работоспособности машин и их деталей фактора времени поднимает на более высокую ступень решение ряда важнейших вопросов достижения высокого качества машин и наиболее полного использования их в производстве.

Какие же основные вопросы теории долговечности машин должны быть подвергнуты рассмотрению в первую очередь?

Вопросами первостепенной важности для решения практических задач, связанных с проблемой долговечности машин, следует признать следующие:

1. Выбор проектной долговечности для конструируемой новой машины.
2. Классификация деталей машин по признакам причин выхода их из строя.
3. Определение допускаемых напряжений при расчете деталей машин на долговечность.
4. Проблема расчета деталей машин на долговечность при износе.
5. Физический износ машин и амортизация.

6. О планировании планово-предупредительных ремонтов машин.

По каждой из этих задач уже теперь могут быть изложены некоторые предварительные соображения, которые могли бы послужить исходными для постановки дальнейших научно-исследовательских работ в области развития теории долговечности машин.

1. Выбор проектной долговечности для конструируемой новой машины.

Выбор заранее такого срока службы машины, который мог бы быть положен в основу ее расчета на долговечность, представляет собой чрезвычайно сложную задачу, решение которой может, повидимому, носить лишь приближенный характер, потому что оно зависит от ряда таких технико-экономических факторов, предвидеть влияние которых в течение более или менее длительных предстоящих сроков чрезвычайно трудно. Однако, вступая на путь расчета машины на долговечность, конструктор должен все же исходить из некоторого, вполне определенного проектного срока ее службы, поэтому попытаемся изложить некоторые соображения, которые могут оказать помощь при решении этой сложной задачи.

Повидимому, при решении данной задачи следует исходить из того неуклонного повышения производительности труда, которое составляет одну из важнейших особенностей развития народного хозяйства при социализме. При этом необходимо учесть, что стоимость любого продукта производства определяется не фактическими затратами труда на его воспроизводство в прошлом, а средними общественно-необходимыми затратами труда на его воспроизводство в условиях момента оценки, следовательно, по мере возрастания производительности труда среднее количество общественно-необходимого труда для воспроизводства продукта с течением времени уменьшается.

Академик С. Г. Струмилин допускает следующее определение этого процесса:

$$C_n = \frac{C_0}{p^n} \quad (1),$$

где C_0 — первоначальная оценка стоимости продукта производства,

p — средний годовой множитель учета прироста производительности труда $= 1 + \frac{K}{100}$,

K — средний годовой прирост производительности труда в процентах,

H — время, протекшее с момента первоначальной оценки продукта в годах.

C_H — оценка стоимости продукта производства через промежуток времени H лет.

Средний ежегодный прирост производительности труда в народном хозяйстве СССР составляет около 7—8%. В директивах XIX съезда по пятой пятилетке предусматривается, например, ежегодный средний прирост производительности труда около 8%. Эта величина в несколько раз больше среднего прироста производительности труда в капиталистических странах в годы наибольшего подъема. Так, например, в США и в Англии, за время с 1924 по 1937 г. этот прирост даже в промышленности не превышал 1,5% в год.

Формулу (I) можно также представить в следующем виде:

$$H = \frac{\lg \frac{C_0}{C_H}}{\lg p} \quad (2)$$

Обозначив техническую норму производительности существующего, во время проектирования новой машины, способа производства продукта в единицу времени, через m_0 , единиц соответствующей меры, можно допустить, что

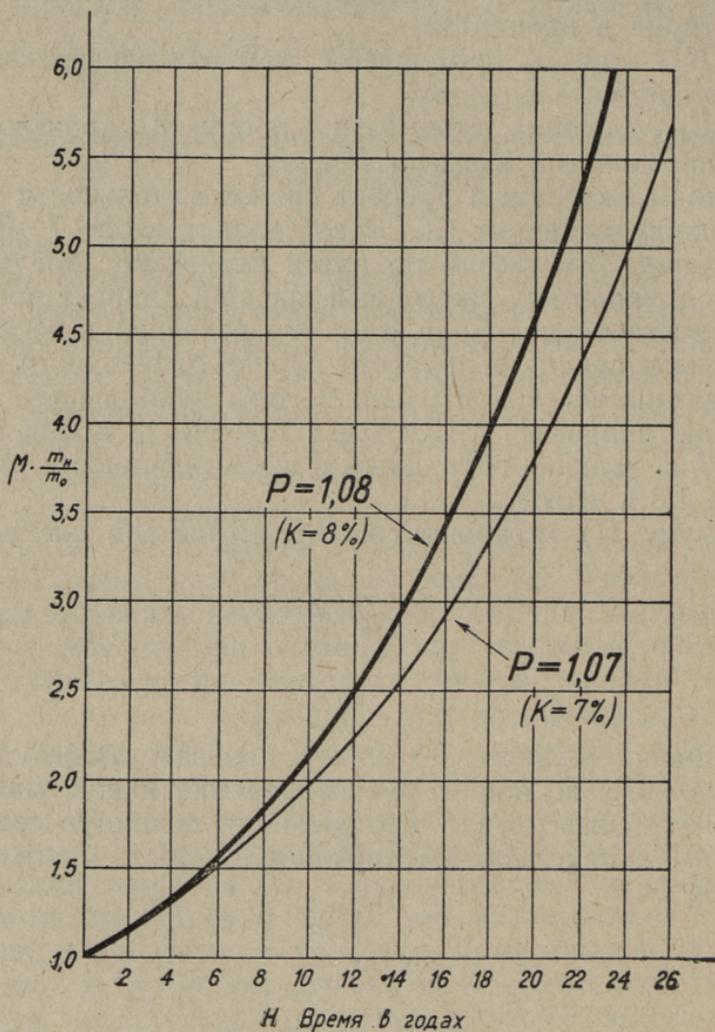
$$C_0 = \frac{E_0}{m_0},$$

где E_0 — затраты общественного труда (овеществленного и живого) на производство продукта, при существующем способе, в течение той же единицы времени. Соответственно

$$C_H = \frac{E_H}{m_H},$$

причем m_H — проектируемая техническая норма производительности новой машины в тех же единицах меры, в течение той же единицы времени.

E_H — затраты общественного труда (овеществленного и живого) на производство продукта при помощи проек-



Фиг. 1.

тируемой машины, в течение той же единицы времени. При этом получим, что

$$\frac{C_0}{C_H} = \frac{E_0 \cdot m_H}{E_H \cdot m_0} = \mu \cdot \frac{m_H}{m_0} \quad (3),$$

где μ — коэффициент, величину которого точно вычислить при проектировании новой машины вряд ли представится возможным, но который, учитывая ряд предполагаемых обстоятельств (улучшение сырья, постепенное улучшение организации производства и повышение культурного уровня обслуживающего персонала и др.), должен иметь тенденцию становиться больше единицы.

Если же учесть так же весьма распространенные мероприятия по модернизации и автоматизации машин и станков, т. е. фактор в значительной мере снижающий величину E_H , то в первом приближении следовало бы коэффициент μ принимать в расчет в пределах 1,5—1,6.

На основании вышеизложенных соображений, пользуясь выражениями (2) и (3), можно далее предложить следующую формулу для приближенного определения проектного срока службы машины.

$$H = \frac{\lg \mu \frac{m_H}{m_0}}{\lg p} = \frac{\lg \mu \cdot \frac{m_H}{m_0}}{\lg \left(1 + \frac{K}{100}\right)} \quad (4)$$

Анализируя формулу (4), замечаем, что чем больше предполагаемый скачок прироста производительности труда, вследствие введения в производство новой машины (фиг. 1), тем больше должен быть проектный срок ее службы, т. е. тем дольше машина может быть использована без более или менее существенного несоответствия ее технических показателей с общим уровнем производительности труда.

2. Классификация деталей машины по признакам причин выхода их из строя.

Не все детали машины теряют в одинаковой мере со временем свою работоспособность. Лишь изнашивающиеся детали, расчет которых на долговечность и должен составить основную задачу теории долговечности машин, сравнительно быстро теряют свою работоспособность.

Детали любой современной машины в первом приближении можно подразделить на следующие три группы: 1) детали изнашивающиеся (группа А), 2) детали основные (группа Б) и 3) детали вспомогательные (группа В).

К деталям группы А следует отнести те, рабочая функция которых состоит или в передаче мощности, или в том, чтобы служить опорами движущихся, нагруженных деталей. Для деталей данной группы характерно, что течение их срока службы связано с изменением, вследствие износа, рабочих размеров и состояния рабочих поверхностей, а также с возникновением явлений усталостного происхождения, причем предельные состояния этих изменений обусловлены правильным взаимодействием этих изнашивающихся деталей с другими сопряженными с ними деталями. К деталям группы А, в первую очередь, можно отнести: подшипники качения, детали всех видов зубчатых, червячных и фрикционных передач, валы, оси, детали кривошипно-шатунных передач и стальные проволочные канаты.

К деталям группы Б следовало бы отнести те, которые в основном служат для обеспечения правильного взаимного расположения относительно друг друга деталей группы А. Окончание срока службы деталей группы Б обычно связано с полным износом всей машины в целом и с выходом ее из производства вследствие полного несоответствия ее технических показателей требованиям современности. К деталям группы Б относятся станины, рамы, блоки цилиндров, корпуса и т. п.

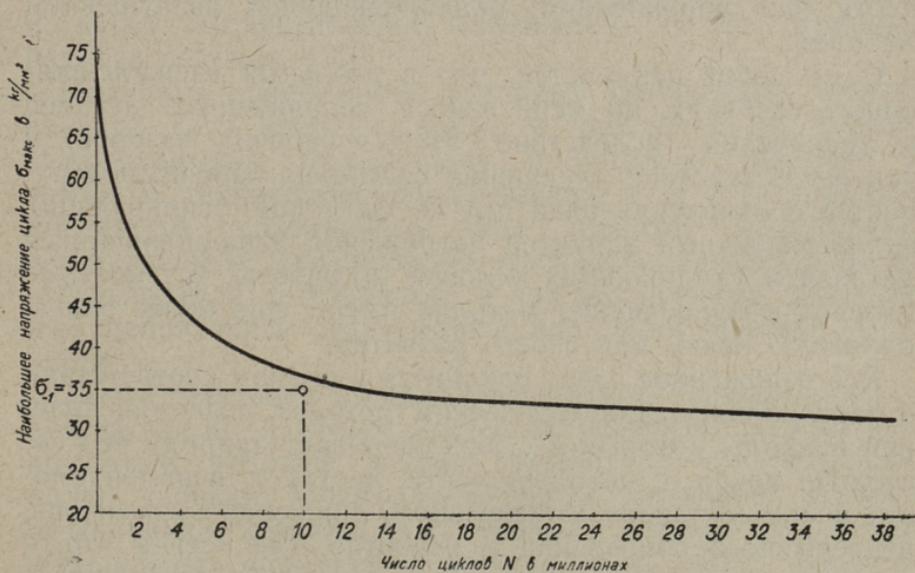
Детали группы В — это различные детали вспомогательного назначения, служащие для управления машиной или для обеспечения безопасности ее обслуживания или же для обеспечения нормальных условий работы деталей группы А (детали устройств для смазки, охлаждения и т. п.). Выход из строя деталей группы В практически обусловлен обычно случайными поломками или потерей.

Из вышеизложенного видно, что как весь срок службы машины в целом, так и сроки планово-предупредительных ремонтов всецело зависят от долговечности и работоспособности деталей группы А, причем в любой современной машине такие детали имеются.

3. Определение допускаемых напряжений при расчете деталей машин на долговечность.

Большинство видов напряженного состояния деталей машин, во время их работы, носит переменный, циклический характер и после многократного повторения «циклов напряжения» происходит так называемое «усталостное» разрушение металла, из которого детали машин и станков изготовлены, причем поломка многих изнашивающихся таким образом деталей наступает ранее полного износа всей машины в целом, поэтому в течение всего срока службы машины эти детали несколько раз заменяются новыми, запасными.

На основании результатов многочисленных опытов установлено, что простейшая и практически достаточно точная зависимость между величиной наибольшего напряжения цикла и числом повторений цикла до усталостного разрушения металла может быть выражена таким образом, что «кривая усталости», т. е. кривая, изобража-



Фиг. 2

ющая эту зависимость, является гиперболой высшего порядка (фиг. 2). При этом с уменьшением наибольшего напряжения цикла число повторений этого цикла, вызывающего разрушение, сначала увеличивается мало, т. е.

кривая резко падает к оси числа циклов, но затем принимает направление, слегка наклонное к этой оси, что означает большое увеличение числа циклов, выдерживаемых металлом до усталостного разрушения даже при небольшом уменьшении напряжений.

Явления, протекающие в металлах при переменном характере их напряженного состояния, хотя и недостаточно еще изучены, но на основании опытных данных можно следующим образом описать их течение. Сначала металл под действием переменных напряжений заметно упрочняется вследствие возникающего наклепа, затем наступает период некоторого равновесия между дальнейшим упрочнением и уже нарастающей потерей прочности металла вследствие развития первоначальных микроскопических трещинок и местных дефектов, наличие которых обусловлено рядом технологических причин (температурные трещинки, неметаллические включения и т. п.), в более крупные, усталостные, после чего, наконец, уже наступает завершающий период перевеса потери прочности над упрочнением, оканчивающийся разрушением металла.

Само собой разумеется, что в реальных эксплуатационных условиях, по мере износа сопряженных деталей и увеличения вследствие этого рабочих зазоров, а так же вследствие ухудшения состояния рабочих поверхностей и появления ряда других факторов, усиливающих неблагоприятный характер нагружения изнашивающихся деталей и ухудшающих условия их работы, усталостные явления разупрочнения металла имеют еще более благоприятную почву для своего развития.

Все изложенное здесь находится в полном соответствии с марксистским, диалектическим методом познания явлений природы, который «... рассматривает природу не в состоянии покоя и неподвижности, застоя и неизменяемости, а как состояние непрерывного движения и изменения, непрерывного обновления и развития, где всегда что-то возникает и развивается, что-то разрушается и отживает свой век». (И. Сталин. Вопросы ленинизма, изд. 11, 1945 г., стр. 537).

Для оценки усталостной прочности различных марок сталей и других металлов принят так называемый «предел усталости» (фиг. 2), т. е. такое условное напряжение, которое на диаграмме усталости определяется точ-

кой, лежащей несколько ниже того участка кривой усталости, где она поворачивает в сторону оси числа циклов и которое металл выдерживает в течение определенного числа циклов не разрушаясь. Таким определенным «базовым» числом циклов для сталей обычно принято считать десять миллионов. Эта цифра была установлена в середине прошлого столетия, причем при тех скоростях движения частей машин, которые были приняты в то время, она казалась очень большой.

Если учесть, что кривая усталости за пределом усталости асимптотически приближается к оси выдерживаемых металлом циклов напряжений, т. е. имеет весьма небольшое падение, то, следовательно, как уже было отмечено, даже небольшое уменьшение напряжения вызывает большое увеличение числа выдерживаемых металлом циклов напряжений. На этом основании ошибочно принято следующее определение предела усталости: «Пока действительные напряжения в элементе не превзошли этого предела, разрушения не произойдет, сколько бы раз напряжение ни меняло свою величину» (учебник по курсу «Сопrotивление материалов» Н. М. Беляева, издание седьмое, 1951 г.).

Подобные определения, различно выраженные, можно еще до сего времени найти в учебниках по курсам «Сопrotивление материалов» и «Детали машин», а также в технических справочниках, т. е. в технической литературе сохранилось еще понятие абсолютной, неисчерпаемой, «неизменной» прочности деталей машин, в случае, если действующие в них циклические, переменные напряжения будут равны или ниже предела усталости.

Такая трактовка предела усталости не подтверждается результатами массовых опытов по изучению усталостной прочности деталей машин. Известно, что наиболее полно, с точки зрения усталостной прочности, изучены подшипники качения, для которых однако вопрос об определении «предела усталости», т. е. такого переменного напряжения, которое они могли бы повторно выдерживать бесконечно большое число раз, никогда не возникал, потому что результаты многочисленных опытов по изучению усталостной прочности подшипников качения никогда не давали повода для такого предположения.

Определение «предела усталости» в качестве напряжения «безопасного» для прочности металла не опровергается машиностроительной практикой резко лишь потому, что в расчет деталей машин на прочность предел усталости не вводится непосредственно, а так называемые «допускаемые напряжения» определяются путем деления предела усталости на некоторый «запас прочности» — это и приводит к большому увеличению числа выдерживаемых металлом циклов напряжений и к представлению о мнимой беспредельной долговечности деталей.

Введение в расчет некоторого «запаса прочности» практически необходимо для того, чтобы учесть влияние неизбежных неточностей как при определении напряженного состояния металла, так и самого предела усталости, а также ряда других факторов, неблагоприятно отражающихся на прочности детали. Все же технический прогресс в машиностроении, как он уже нашел свое цитированное выше выражение в директивах XIX съезда партии по пятой пятилетке, ставит вопрос о том, чтобы изжить из практики чрезмерные запасы прочности, которые приводят к увеличению размеров и веса машин, т. е. приводят к увеличенному расходу металла и удорожанию обработки деталей машин.

Между тем, нецелесообразно большие запасы прочности не могут быть изжиты до тех пор, пока определение допускаемых напряжений при расчете основных деталей машин, работающих при переменных напряжениях, будет производиться без учета требуемого числа выдерживаемых металлом циклов напряжений, т. е. без учета практически целесообразной долговечности деталей машин.

Современный расчет деталей машин на долговечность требует решительного отказа от трактовки предела усталости в качестве напряжения, которое деталь может выдержать бесконечно большое число раз. При расчете деталей машин на долговечность необходимо рассматривать предел усталости лишь как экспериментально определяемую точку «кривой усталости», позволяющую, с известным приближением, судить о зависимости между напряжениями ниже и выше этого предела и выдерживаемыми металлом повторениями их.

С целью использования имеющейся в настоящее время в распоряжении конструкторов усталостной харак-

теристики металлов, т. е. предела усталости, можно принять следующую общеизвестную формулу усталости в качестве некоторого канонического «закона усталости металлов».

$$\sigma_{-1N} = \frac{A_0}{N^{\frac{1}{m}}} = \sigma_{-1} \cdot \left(\frac{N_0}{N}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (5),$$

где σ_{-1N} — частный предел усталости, т. е. предел усталости при любом числе выдерживаемых знакопеременных симметричных циклов N ,

σ_{-1} — предел усталости при знакопеременном симметричном цикле, и при нормализованном, базовом числе выдерживаемых циклов N_0 .

N — число циклов частного предела усталости
 $= 60 \cdot H \cdot h_2 \cdot n$

N_0 — базовое число циклов предела усталости.

H — долговечность машины, в годах.

h_2 — действительное число часов работы машины в течение года.

n — число циклов напряжений, воспринимаемых деталью в течение одной минуты.

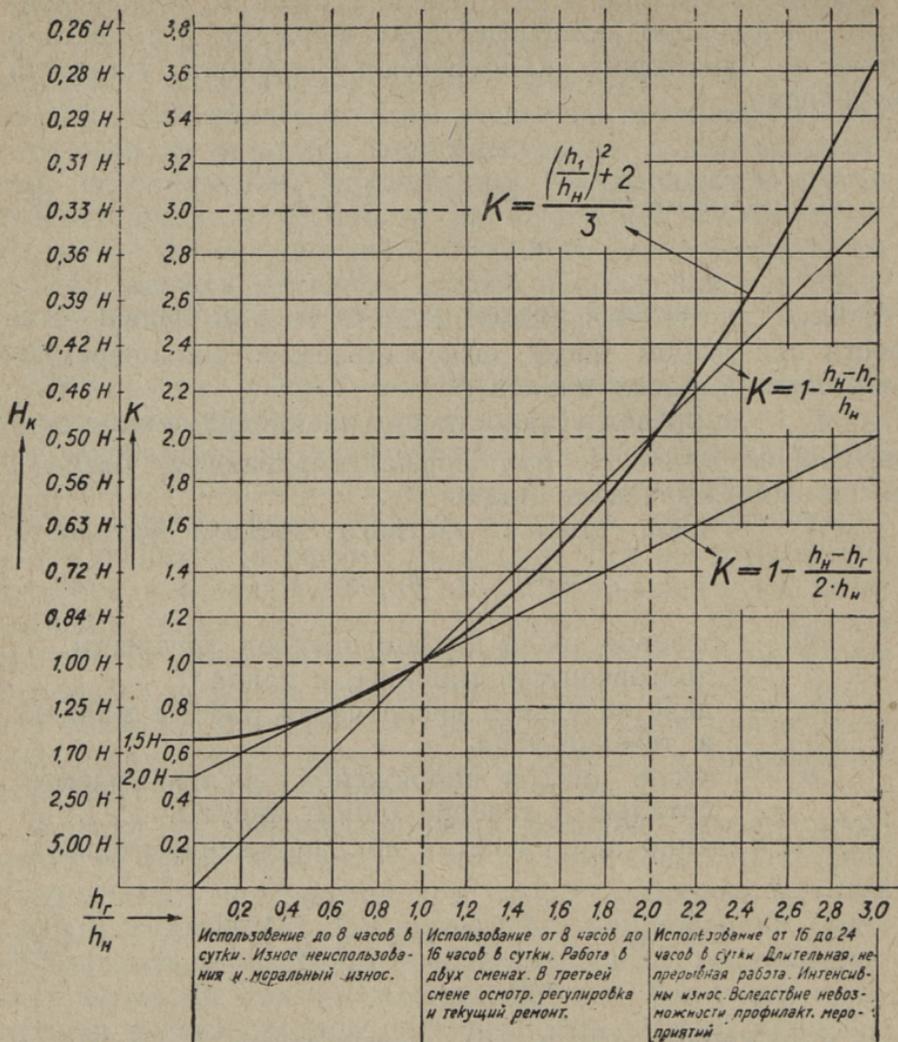
Соответственно при расчетах по напряжениям сдвига

$$\tau_{-1N} = \frac{B_0}{N^{\frac{1}{m}}} = \tau_{-1} \cdot \left(\frac{N_0}{N}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (6)$$

В выражениях (5) и (6) коэффициенты A_0 и B_0 , а также показатель степени $\frac{1}{m}$ зависят от свойств металла

и ряда технологических факторов и определяются обычно на основании массовых испытаний образцов или деталей машин на долговечность.

Ввиду того, что цикл напряжений не всегда бывает симметричным, то с достаточной для практических расчетов точностью можно воспользоваться спрямленной диаграммой эквивалентных циклов, построенной по σ_{-1} и пределу прочности σ_B , причем из простых геометрических соотношений.



Фиг. 3.

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot \sigma_{-1}}{1 - r + \beta(1 + r)} \quad (7),$$

где $\beta = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{в}}}$, а $r = \frac{\sigma_{\text{мин}}}{\sigma_{\text{макс}}}$ — коэффициент асимметрии

цикла.

Так как в наших расчетах число циклов N может не совпадать с базовым, то в формулу (7) вводим вместо σ_{-1} частный предел усталости σ_{-1N} , для чего воспользуемся формулой (5), при этом

$$\sigma_{rN} = \frac{2 \cdot \sigma_{-1} \cdot \left(\frac{N_0}{N}\right)^{\frac{1}{m}}}{1 - r + \beta(1 + r)} \quad (8),$$

где, следовательно, σ_{rN} — частный предел усталости при любой асимметрии цикла.

Переходя далее к допускаемым напряжениям, получим

$$|\sigma|_{rN} = \frac{\sigma_{rN}}{K_0} \quad (9),$$

$$|\tau|_{rN} = \frac{\tau_{rN}}{K_0} \quad (10)$$

где K_0 — общий уточненный запас прочности.

4. Проблема расчета деталей машин на долговечность при износе.

Работа, затрачиваемая на преодоление внешнего трения, расходуется следующим образом: во-первых, происходит истирание трущихся поверхностей и образуется некоторое количество порошка, т. е. при сухом внешнем трении часть работы затрачивается на диспергирование; во-вторых, вследствие надавливания одного тела на другое и зацепления неровностями одного тела за неровности другого при относительном перемещении в одном или в обоих трущихся телах образуются упругие деформации. Когда эти упругие деформации превосходят некоторый предел, то начинаются пластические деформации. Следовательно, внешняя работа трения затрачивается на диспергирование, а также на упругие и пластические деформации. Внешняя работа трения, как известно, сопровождается также выделением тепла, причем количество выделяемого тепла можно, в первом приближении,

связать прямой пропорциональностью с объемом диспергируемого материала.

Обращаясь к проблеме установления такой характеристики износостойкости металлов, которую можно было бы использовать при практических расчетах деталей машин на долговечность по износу, можно изложить следующие соображения.

Полагая, что мощность, затрачиваемая на диспергирование, является более или менее устойчивой характеристикой плотности и износостойкости рассматриваемого металла, то, относя объем диспергированного металла к мощности необходимой при данной скорости диспергирования данного металла, получим из результатов лабораторных испытаний износостойкости некоторый «коэффициент износостойкости» C , размерность которого $\frac{\text{мм}^3}{\text{час} \cdot \text{кв}}$

т. е.

$$C = \frac{\Delta_o}{h_o \cdot N_o},$$

где Δ_o — объем диспергированного металла, в мм^3
 h_o — время, в течение которого диспергирован объем Δ_o , в часах,

N_o — мощность в киловаттах, затраченная на диспергирование объема Δ_o .

Далее, в качестве первого приближения можно было бы вывести следующую формулу для определения глубины износа S на наиболее изнашивающейся части рабочей поверхности любой трущейся детали машины.

$$S = C \cdot h_1 \cdot \frac{N_{Tp}}{F} \text{ (мм)} \quad (11),$$

где N_{Tp} мощность, расходуемая на преодоление силы трения в киловаттах,

F — номинальная площадь трения в мм^2 ,

h_1 — длительность изнашивания, в часах.

Располагая данными о допускаемой глубине износа $|S|$ рабочей поверхности детали, можно было бы выра-

жение (11) решить относительно срока службы детали, т. е. представить его в следующем виде:

$$h_1 = \frac{|S| \cdot F}{C \cdot N_{Tp}} \quad (12)$$

Изложенные выше соображения могут быть рассмотрены, разумеется, лишь в качестве самого первого опыта приближения результатов испытания износостойкости металлов к задачам практических расчетов деталей машин на долговечность по износу, так как до сих пор методы испытания износостойкости металлов предполагают лишь возможность сравнительно относительной оценки свойств металлов в этом отношении.

5. Физический износ машин и амортизация.

При экономическом анализе любого промышленного предприятия выделяется ряд элементов производства, среди которых одни относятся к предметам труда (сырье, полуфабрикаты и т. п.), а другие к средствам труда (производственные здания, сооружения, машины, транспортные средства и т. п.). В то время как первые, вступив в производственный процесс, теряют свой первоначальный вид и превращаются в готовые изделия, причем потребляются и полной стоимостью возвращаются в одном производственном цикле, вторые применяются в качестве средств труда и, участвуя во множестве производственных циклов, сохраняют свои нормальные потребительные свойства в течение длительного срока, т. е. обладают некоторой долговечностью, постепенно передавая свою стоимость в стоимость создаваемого при помощи них продукта до того момента, когда вследствие износа утратят эти свои потребительные свойства.

Благодаря своей отличительной особенности функционировать в течение ряда производственных циклов, т. е. в течение длительного срока (практически не менее года), средства труда, с экономической точки зрения, расцениваются как основные фонды промышленности.

По данным Центр. Статистического Управления Госплана СССР, механическое оборудование, а именно: сило-

вые установки, рабочие машины и станки, внутризаводские подъемно-транспортные машины и транспорт, составляют около половины основных фондов нашей отечественной промышленности.

Одним из показателей технического уровня состояния основных фондов, в частности машин, является их возраст. Нет сомнения в том, что чем выше возраст машин, тем они не только физически более изношены, но и в техническом отношении более стары, дальше отстоят от новейших достижений техники.

Следовательно дальнейший технический прогресс промышленности СССР теснейшим образом связан с проблемой обновления его технического оснащения, его основных фондов, в том числе его машинного парка.

Заранее предвидимые затраты, связанные с ремонтом существующих машин и с введением в производство новых машин вместо изношенных, входят в калькуляцию себестоимости продукции и, со временем, по мере утраты участвующими в производстве машинами их работоспособности, при помощи так называемых амортизационных отчислений накапливаются в виде некоторого резервного, амортизационного фонда для воспроизводства этих изношенных машин.

Амортизационные отчисления в СССР, в настоящее время, производятся по единым усредненным нормам для отдельных отраслей промышленности и для отдельных групп машин, причем физический износ отдельных машин не может быть при этом принят в расчет. Все же эти усредненные нормы со временем необходимо пересматривать и уточнять, т. е. связывать их, по мере возможности, с действительным физическим износом машин, поэтому для дальнейшего правильного, закономерного обновления машинного парка представляется важным связать проблему амортизации с эксплуатационной практикой использования машин, с расчетом машин и их деталей на долговечность и с вытекающим из него планово-предупредительных ремонтов.

Отождествляя величину годового износа машины, выраженную в процентах, с величиной годовых амортизационных отчислений, вычисленных однако без учета стоимости ремонтов, получим следующую формулу:

$$A_1 = \frac{100}{H} \cdot K \quad (13)$$

где A_1 — величина ежегодных амортизационных отчислений или годовой износ машины в процентах,
 H — номинальная долговечность машины, в годах.
 K — поправочный коэффициент, учитывающий фактическую интенсивность использования машины (фиг. 3).

Путем введения в расчет величины K следует учесть между прочим и некоторую хроническую деградацию машины, т. е. утрату ею работоспособности при малом использовании, так сказать «износ неиспользования» (износ коррозионный, износ от заедания, прилипания и деформации деталей, длительное время соприкасавшихся без относительного движения и т. п.) в сочетании с нарастающим несоответствием ее новейшему уровню техники. В этом случае введение в расчет коэффициента K должно привести к реальным, а не преувеличенно большим срокам действительной утраты машинами работоспособности.

Однако более важной для практики является необходимость учесть, неопределимое аналитически, усиление интенсивности физического износа машины в условиях ее длительного, непрерывного использования, т. е. в условиях, не допускающих производства ежедневных профилактических осмотров, смазки и регулирования.

Более или менее правильно отражающим опыт ремонтной практики и современное представление об износе машин во время работы в условиях отличных от средних, нормальных, можно признать выражение K в виде следующей параболической функции (см. фиг. 3)

$$K = \frac{\left(\frac{h_2}{h_H}\right)^2 + 2}{3} \quad (14),$$

где h_2 — действительное число часов работы машины, в течение года.

h_H — общее число часов работы предприятия, использующего машину, в течение года, в одну смену (приблизительно равно 2500 часов).

Действительная, календарная долговечность машины (в годах) может быть при этом определена следующим образом:

$$H_K = \frac{100}{A_1} = \frac{H}{K} \quad (15)$$

Относительно определения величины K существуют различные точки зрения. Так, если принять

$$K = 1 - \frac{h_n - h_z}{h_n},$$

то получится прямая пропорциональность между износом и временем использования машины, т. е. то, что при полном неиспользовании машины она будет существовать вечно, что, как известно, не соответствует действительности.

С другой же стороны, интенсивное течение износа машины при непрерывном использовании машины, т. е. без профилактических осмотров, очистки, смазки и регулирования, при этом значении величины K остается неучтенным.

В капиталистических странах распространена следующая формула:

$$K = 1 - \frac{h_n - h_r}{2 \cdot h_n}$$

Однако это значение K , как это видно из фиг. 3, обеспечивает лишь ускорение накопления амортизационного фонда при малом использовании машины, но совершенно не соответствует действительному течению процесса износа машины при ее среднем и длительном, в течение суток, использовании, что, повидимому, свидетельствует о том, что эта формула не имеет непосредственной связи с физическим износом машины, а отражает лишь чисто коммерческие стороны использования машин в капиталистическом производстве.

Определение при помощи выражений (14) и (15) календарной долговечности машин, в годах, при суточном использовании более или менее отличающемся от режима принятого для них в качестве среднего номинального основан на отождествлении физического износа машин, с величиной годовых, амортизационных отчислений и может, до известной степени, служить как для уточнения величины амортизационных отчислений, при заданных условиях использования машин, так и для уточнения сроков-интервалов между очередными планово-предупредительными ремонтами.

6. О планировании планово-предупредительных ремонтов машин.

Для того, чтобы машина полностью сохранила свои высокие эксплуатационные свойства в течение всего срока своей службы, необходимо проведение планово-предупредительных ремонтов (ППР), причем огромное значение имеет то, чтобы план этих ППР был составлен правильно и действительно оправдал себя на деле.

Организация и широкое внедрение в практику промышленных предприятий СССР планово-предупредительных ремонтов машинного парка является показателем достижения высокой культуры производства и механизации трудоемких процессов в нашей стране.

Попытки ряда специалистов в передовых, в промышленном отношении, капиталистических странах создавать более или менее стройные системы плановых ремонтных работ неизменно оказывались неудачными. Эти неудачи вытекают из самой сущности капиталистического способа производства, при котором предприятия работают неравномерно, с перебоями, вследствие чередующихся кризисов и временных подъемов производства, вследствие чего и оборудование там так же используется неравномерно, поэтому и планировать его ремонты практически не представляется возможным.

В Советском Союзе, в особенности, со все возрастающим распространением специальных станков и машин, образующих поточные и автоматические линии и отличающихся постоянством режима работы и при этом интенсивно и равномерно, во времени, используемых, планирование ремонтных работ является не только возможным, но и совершенно необходимым для обеспечения ритмичной и бесперебойной работы предприятия.

Наиболее трудной и ответственной задачей, при организации ППР, является составление так называемой структуры ремонтного цикла.

Структурой ремонтного цикла называется состав, содержание и повторяемость отдельных ремонтных операций, входящих в полный ремонтный цикл, т. е. в период между двумя капитальными ремонтами.

Исходя из существующей ремонтной практики машиностроительных заводов, структура ремонтного цикла обычно составляется из ремонтов: текущих (Т), сред-

них (С) и капитальных (К), причем чередование ремонтов, Т, Т, С, Т, Т, К, т. е. общий ремонтный цикл делится на шесть ремонтных сроков-интервалов, длительностью приблизительно в 5000 рабочих часов каждый.

Повидимому, при расчете на долговечность изнашивающихся деталей следует ориентироваться на замену их новыми запасными во время производства средних и капитальных ремонтов, на выполнение которых средства черпаются из амортизационного фонда.

Если при конструировании машины предусмотрен некоторый условный средний, по суточному использованию, режим ее работы, на основании которого установлены средние календарные интервалы ремонтов, то при отступлении действительного режима работы от этого среднего можно произвести перерасчет среднего календарного ремонтного интервала на требуемый по действительным условиям работы машины, пользуясь выражениями (14) и (15), при этом

$$H'_k = \frac{H'_n}{K} \quad (16),$$

где H'_k — искомый календарный интервал между двумя очередными ремонтами,

H'_n — средний календарный интервал между двумя очередными ремонтами, установленный по среднему условному суточному использованию машины.

Расчеты по формуле (16) довольно хорошо согласуются с принятыми в ремонтной практике соотношениями между ремонтными циклами при изменении сменности работы машины, проведенными, например, в «Справочнике механика» А. П. Владзиевского и М. О. Якобсона, (Машгиз, 1950 г., стр. 210), как это видно из нижеприведенной таблицы.

Поскольку длительность межремонтных интервалов определяется долговечностью наиболее напряженно работающих деталей группы А, то при проектировании машины необходимо выделить эти детали и на основе их предполагаемых сроков службы, в данных эксплуатационных условиях, составить план ППР.

Если принять во внимание то, что подшипники качения, без которых в настоящее время не обходится ни одна более или менее сложная машина, относятся к дета-

лям, рабочая долговечность которых может быть довольно точно установлена заранее, то в основу составления нормального плана-графика ГПП вполне целесообразно положить сроки службы именно подшипников качения, т. е. намечать, например, сроки-интервалы между очередными средними и капитальными ремонтами, равные срокам службы наименее долговечных подшипников качения, рассчитывая остальные изнашивающиеся детали, в том числе и другие подшипники качения, уже по этим срокам или по срокам, кратным срокам службы этих наименее долговечных подшипников качения.

ТАБЛИЦА

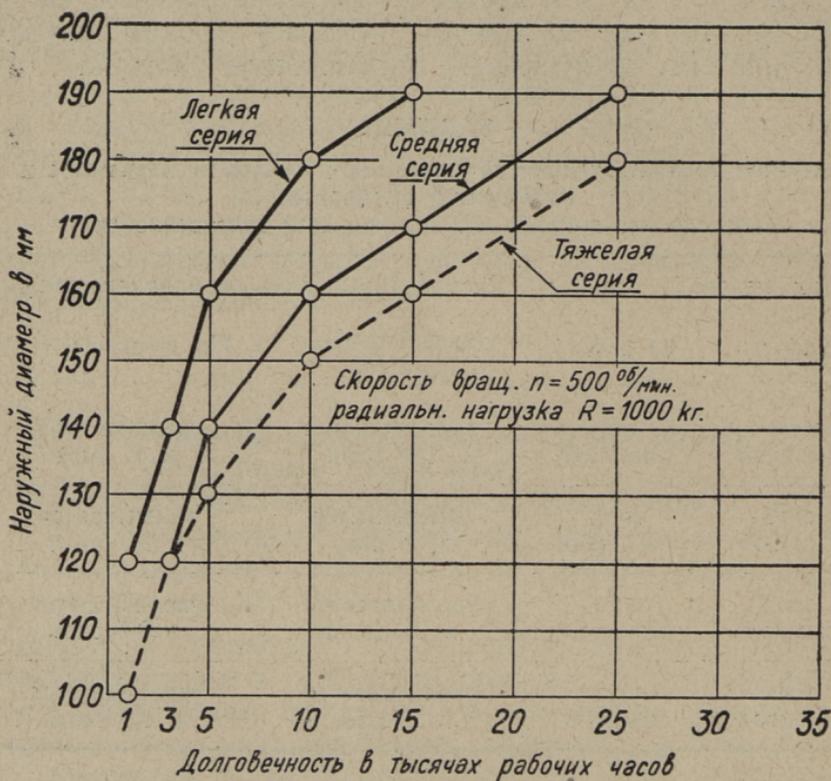
изменений продолжительности ремонтных циклов в зависимости от изменений сменности
(исходя из односменной номинальной долговечности)

При переходе станка		производительность ремонтного цикла	
с работы	на работу	Владзиевский-Якобсон	По формуле (15)
двух-сменной	одно-сменную	увеличивается в 1,8 раза	увеличивается в 2 раза
двух-сменной	трех-сменную	уменьшается в 2 раза	уменьшается в 1,9 раза
трех-сменной	одно-сменную	увеличивается в 3,3 раза	увеличивается в 3,7 раза
трех-сменной	двух-сменную	увеличивается в 2 раза	увеличивается в 1,9 раза

При проектировании машины было бы, разумеется, очень удобно исходить из одинакового срока службы для всех подшипников качения, установленных в разных конструктивных узлах машины, однако, практически это обычно не представляется возможным осуществить по ряду причин.

Так, например, большое влияние на выбор расчетного срока службы подшипника качения имеет его наружный диаметр, потому что во многих случаях (в редукторах, в коробках передач, в различных валковых станках и д. п. конструкциях) ограниченное межосное расстояние не поз-

воляет произвести установку более крупного, т. е. более долговечного подшипника качения. На фиг. 4 графически представлена зависимость между долговечностью и наружным диаметром однорядных шарикоподшипников. Из фиг. 4 видно, что даже небольшое уменьшение наружного диаметра подшипника приводит к значительному сокращению его срока службы при одних и тех же условиях эксплуатации.



Фиг. 4.

Не меньшее значение для выбора расчетного срока службы подшипника качения имеет также заданная скорость вращения. Во многих случаях подшипник, подходящий по долговечности, оказывается однако не приспособленным для работы при заданной большой скорости вращения.

Разумеется, не всегда сроки службы подшипников качения могут служить основными ориентирами при опреде-

лении ремонтных интервалов, поэтому выбор этих интервалов может быть подчинен и другим соображениям или может быть намечен по долговечности других деталей (например, зубчатых передач), но в большинстве случаев все же, как показывает опыт, подщипники качения в этом отношении являются наиболее подходящими.

В директивах XIX партсъезда по пятой пятилетке указано: «Всемерно содействовать ученым в разработке ими теоретических проблем во всех областях знания и укреплять связь науки с производством».

Действительно директивы XIX партсъезда по пятой пятилетке предусматривают такое дальнейшее развитие могучей советской техники, которое неизбежно требует пересмотра некоторых устарелых положений науки, в частности, машиностроительной, требует новой постановки ряда принципиальных вопросов конструирования, производства и использования машин.

В числе наиболее актуальных вопросов находится и вопрос о создании такого учения о прочности и работоспособности машин, которое предусматривало бы безукоризненное сохранение этих важнейших свойств машин в течение всего срока их службы.

Одной из сторон решения этой проблемы является создание теории долговечности машин, некоторые основные вопросы которой, в первом приближении и вкратце, изложены в данном выпуске.

Создание и развитие теории долговечности машин представляет собой такую большую и трудную проблему, что решение ее возможно лишь при объединенных усилиях многих ученых, работающих в различных отраслях промышленности, при живейшем участии передовиков производства, уже и теперь немало сделавших для постановки данной проблемы в части, например, продления сроков службы машин и станков.

Следовательно, цель этого выпуска в основном заключается в постановке данной проблемы и в изложении основной схемы теории долговечности машин для привлечения к ее дальнейшей разработке возможно более широкого круга научных и инженерно-технических работников, а также передовиков производства — стахановцев различных отраслей промышленности.

Содержание.

Введение	3
1. Выбор проектной долговечности для конструируемой новой машины	8
2. Классификация деталей машины по признакам причин выхода их из строя	11
3. Определение допускаемых напряжений при расчете деталей машин на долговечность	13
4. Проблема расчета деталей машин на долговечность при износе	19
5. Физический износ машин и амортизация	21
6. О планировании планово-предупредительных ремонтов машин	25

Иван Тодаров Александр
Коскрас-Палубин

Редактор Э. Соонвальд.
Технический редактор И. Вахтре.
Корректор А. Тихане.

Сдано в набор 17 XI 1952. Под-
писано к печати 7 III 1953. Тираж 800.
Формат бумаги $54 \times 84\frac{1}{16}$. Печатн.
листов 2. По формату 60×92 печат-
ных листов 1,64. Учетно-издатель-
ских листов 1,42. МВ-03215. Типо-
графия «Тарту Коммунист», Тарту,
Юликооли 17/19. Заказ № 3758.

Цена руб. 1.—