

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАШИН С ЗАДАНЫМ РЕСУРСОМ РАБОТЫ.

Серёжкин Михаил Александрович

студент 6 курса, очная форма

Российская Федерация, г. Москва, Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, кафедра МТ13

Научный руководитель: Э.Л. Мельников

доктор технических наук, профессор кафедры МТ13

Содержание

1. Постановка задачи в «общем виде»
2. Решение задачи на основании теории А.С.Проникова
3. Пример расчёта
4. Рекомендации и выводы

1. Постановка задачи в «общем виде».

В процессе функционирования все трибосопряжения машин изнашиваются. Износ есть изменение размеров, формы, массы технического объекта или состояния его поверхности вследствие остаточной деформации от постоянно действующих нагрузок, либо из-за разрушения поверхностного слоя при трении. От этого нельзя избавиться, но этим можно управлять. Для серийных образцов машин, на основании накопленного годами опыта можно назначить такие параметры трибосопряжений, которые позволят обеспечить заданную величину износа в течение определённого промежутка времени.

Но как быть с вновь разрабатываемыми изделиями, или машинами, поступившими на капитальный ремонт или модернизацию. Проведение испытаний на машинах трения занимает долгое время и экономически нецелесообразно.

Износ U зависит от некоторого ряда параметров. Разобьём их на четыре группы:

1. Кинематические (α) – параметры, обуславливающие корректную (в соответствии с технической характеристикой) работу машины (скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей, давление на контакте, и т.д.);
2. Геометрические (β) – параметры сопряжения, которые задаёт конструктор на этапе проектирования машины (шероховатость поверхностей, их твёрдость и т.д.);
3. Константные (γ) – коэффициенты трения, ускорение свободного падения и т.д.;
4. Временные (τ) – время, число циклов работы сопряжения и т.д.

В общем виде $U = f(\alpha, \beta, \gamma, \tau)$.

Остаётся найти теоретическую связь между износом U и геометрическими параметрами сопряжения: твёрдость поверхностей (HB), площадь контакта (S), шероховатость поверхностей (Ra), количество и качество смазочного материала (в условных единицах Y).

Тогда станет возможно получить формулы вида:

$$\begin{cases} HB = f(U, \alpha, (\beta \setminus HB), \gamma, \tau); \\ S = f(U, \alpha, (\beta \setminus S), \gamma, \tau); \\ Ra = f(U, \alpha, (\beta \setminus Ra), \gamma, \tau); \\ Y = f(U, \alpha, (\beta \setminus Y), \gamma, \tau); \end{cases} \text{ с помощью которых (по одной или в комплексе)}$$

становится возможным назначить такие параметры трибосопряжений, которые позволят обеспечить заданную величину износа U в течение определённого промежутка времени τ . Зная U в каждой точке трибосопряжения, можно определить форму изношенной поверхности. Имея величину износа, форму изношенной поверхности и параметры β становится возможным на этапе проектирования изделия выбрать технологию ремонта.

Желаемые значения геометрических параметров достигаются стандартными методами конструирования и обработки деталей.

В настоящее время эта задача в теоретическом виде не решена.

2. Решение задачи на основании теории А.С.Проникова

В настоящее время существует три методики определения износа

1. по Боудену, Тейбору
2. по Пронинову А.С.
3. по Гаркунову Д.Н.

Все они оперируют эмпирическими формулами и зависимостями. Наиболее точной, неоднократно подтверждённой на практике, является методика определения износа по Пронинову А.С.[5]:

$$U_{из} = K_{из} \cdot p^m \cdot g_c^n \cdot t^\alpha \quad (1.1), \text{ где}$$

p – давление на контакте

g – скорость относительного перемещения

t – продолжительность изнашивания

m, n, α - показатели степени.

При нормальных условиях эксплуатации $n = \alpha = 1$

m – зависит от сочетания материалов пары, определяется по таблице 1

Табл. 1. Определение коэффициента m [5]

Сочетание материалов пары	m
а – г	1,97
б – г	1,85
в – б*	2,38
в – г	1,58
а – в	1,76
а – б	3,15
г – д	1,5
б – г	1,58
б* – б	1,47
б – д	1,26
а – д	2,29

а – сталь 45 HRC 38-43;

б – сталь 20Х (цементирована или нитроцементирована*)

в – сталь ШХ15 HRC 60-62

г – сталь 38ХМЮА (азотирована)

д – чугун СЧ 21-40

$K_{из}$ - коэффициент износостойкости, определяется по формуле:

$$K_{из} = j/p^m \quad (1.2), \text{ где}$$

j – интенсивность изнашивания, определяется по формуле Кругельского.

$$j = \sqrt{\frac{h}{R} \cdot \frac{P_H}{P_\phi} \cdot \frac{K_0}{n_k}} \quad (1.3), \text{ где}$$

h – глубина внедрения единичной неровности

R – радиус единичной неровности

$$\sqrt{\frac{h}{R}} = 0,1..0,001 \text{ – функция от шероховатости, определяется по таблице 2.}$$

Табл. 2. Определение параметра $\sqrt{\frac{h}{R}}$.

Ra	12,5 и более	6,3	3,2	1,6	1,25	0,63	0,32 и менее
$\sqrt{\frac{h}{R}}$	0,1	0,066	0,033	0,01	0,0066	0,0033	0,001

P_H – номинальное давление

P_ϕ – фактическое давление

$$\frac{P_H}{P_\phi} = 0,1..0,001 \text{ – образование «вилки» } \frac{j_{\min}}{j_{\max}}$$

K_0 – распределение микронеровностей по высоте:

0,15..2 – принято 1,75

$$n_k = \left(\frac{\delta_\sigma}{K_0 \cdot \mu \cdot p^m} \right)^y \quad (1.4), \text{ где}$$

δ_σ – предел прочности материала

μ – коэффициент трения (скольжения или качения)

y – показатель степени, зависит от смазочного материала, может принимать значения от 0,1 до 15

Таким образом, подставляя (1.4) в (1.3), получим полную формулу для определения интенсивности изнашивания - j :

$$j = \sqrt{\frac{h}{R} \cdot \frac{P_H}{P_\phi} \cdot \frac{K_0}{\left(\frac{\delta_\sigma}{K_0 \cdot \mu \cdot p^m} \right)^y}} \quad (1.5)$$

Подставляя (1.5) в (1.2) находим формулу для определения коэффициента износостойкости - $K_{из}$:

$$K_{из} = \frac{\sqrt{\frac{h}{R} \cdot \frac{P_H}{P_\phi} \cdot \frac{K_0}{\left(\frac{\delta_\sigma}{K_0 \cdot \mu \cdot p^m} \right)^y}}}{p^m} \quad (1.6)$$

Подставляя формулу (1.6) в уравнение (1.1) находим формулу определения линейного износа при нормальных условиях эксплуатации:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{\frac{h}{R}} \cdot \frac{P_H}{P_{\phi}} \cdot \frac{K_0}{\left(\frac{\delta_{\epsilon}}{K_0 \cdot \mu \cdot p^m} \right)^y} \cdot g_c \cdot t \quad (1.7)$$

В случае контакта вращающихся деталей можно записать:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{\frac{h}{R}} \cdot \frac{P_H}{P_{\phi}} \cdot \frac{K_0}{\left(\frac{\delta_{\epsilon}}{K_0 \cdot \mu \cdot p^m} \right)^y} \cdot S_{\text{лц}} \cdot n_{\text{ц}} \quad (1.8), \text{ где}$$

$S_{\text{лц}}$ - путь трения за один цикл работы механизма

$n_{\text{ц}}$ - число циклов работы изделия.

Формула (1.7) является более универсальной, поэтому дальнейшие операции будем проводить с ней.

Принимая что $p^m = \frac{F^m}{S^m}$ (1.9) и подставляя в (1.7) получаем общую формулу для определения линейного износа при нормальных условиях эксплуатации:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{\frac{h}{R}} \cdot \frac{P_H}{P_{\phi}} \cdot \frac{K_0}{\left(\frac{\delta_{\epsilon}}{K_0 \cdot \mu \cdot \frac{F^m}{S^m}} \right)^y} \cdot g_c \cdot t \quad (1.10)$$

С помощью несложных алгебраических преобразований получаем следующие формулы для определения:

1. Марки материала и вида его термообработки:

$$\delta_{\epsilon} = K_0 \cdot \mu \cdot p^m \cdot \sqrt[y]{\frac{K_0 \cdot \sqrt{\frac{h}{R}} \cdot \frac{P_H}{P_{\phi}} \cdot g_c \cdot t_{\text{зад}}}{U_{\text{лин.доп.}}}} \quad (1.11);$$

2. Качества смазывания и количества смазочного материала:

$$y = \ln \left(\frac{K_0 \cdot \sqrt{\frac{h}{R}} \cdot \frac{P_H}{P_{\phi}} \cdot g_c \cdot t_{\text{зад}}}{U_{\text{лин.доп.}}} \right) / \ln \left(\frac{\delta_{\epsilon}}{K_0 \cdot \mu \cdot p^m} \right) \quad (1.12);$$

3. Площади контакта:

$$S = \sqrt[m]{\frac{K_0 \cdot \mu \cdot F^m}{\delta_{\epsilon}}} \cdot \sqrt[y]{\frac{K_0 \cdot \sqrt{\frac{h}{R}} \cdot \frac{P_H}{P_{\phi}} \cdot g_c \cdot t_{\text{зад}}}{U_{\text{лин.доп.}}}} \quad (1.13);$$

4. Шероховатостей поверхностей:

$$\sqrt{\frac{h}{R}} = \frac{\left(\frac{\delta_{\epsilon}}{K_0 \cdot \mu \cdot p^m} \right)^y \cdot U_{\text{лин.доп.}}}{K_0 \cdot \frac{P_H}{P_{\phi}} \cdot g_c \cdot t_{\text{зад}}} \quad (1.14);$$

Таким образом, используя формулы (1.11) – (1.14) можно создавать такие конструкции, которые:

1. Будут «удобны» с точки зрения реновации
2. Будут «выходить из строя» тогда, когда это предскажет конструктор

3. Пример расчёта

При реновации объектов машиностроения часто возникает необходимость изготовления плоских деталей из листа взамен изношенных, вышедших из строя, подвергшихся коррозии, поврежденных при ремонтных работах, при сборке-разборке отдельных узлов, машин.

Специальные инструментальные штампы для изготовления новых подобных деталей, особенно уплотнительных колец разового действия дорогостоящие, стоимость их при небольших партиях деталей составляет примерно 90% себестоимости детали.

Удешевление реновационных производств листовых деталей достигается за счет:

а) применения упрощенных, универсальных, легкоперенастраиваемых штампов;

б) использования нетрадиционных способов обработки листовых материалов, например, с применением в качестве рабочих частей штампов (пуансонов, матриц) эластичных сред (резин, полиуретанов), при применении которых стоимость штамповой оснастки резко (в 10...100 раз) уменьшается, а себестоимость реновируемых деталей при малых партиях существенно снижается.

Особенно ценен метод штамповки деталей эластичной средой для опытного, мелкосерийного и реновационного производства, характеризуемого частой сменяемостью изделий, а также сжатыми сроками подготовки производства [3], [6].

Наиболее перспективным является метод ротационной вырубки, пробивки и отрезке деталей из материалов типа фольги (листа) на двухвалковых машинах с одним из валков облицованным полиуретаном, а вторым – жестким носителем разделительного инструмента (пунсонов копиров, ножей и т.д.).

Наиболее технологичной является конструкция с использованием жёсткого кольцевого спутника, представленная на рис.1.

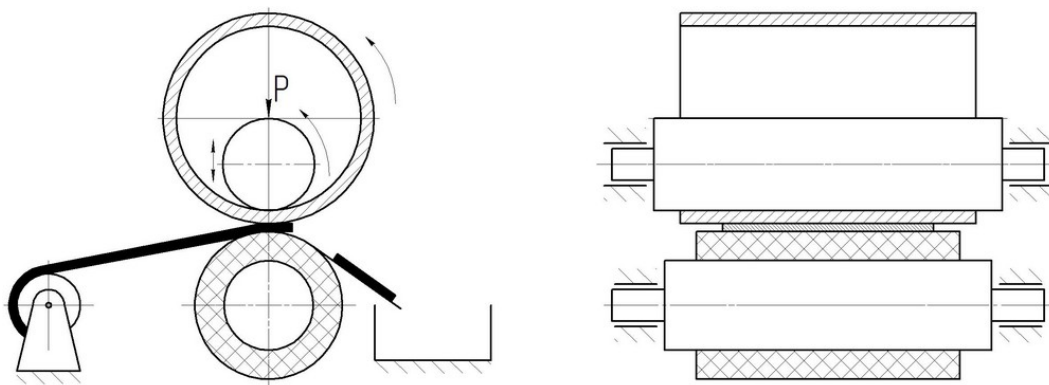


Рис.1. Двухвалковая вырубная машина с использованием жесткого кольцевого спутника.

Достоинства:

- Возможность производить вырубку деталей из ленты;

- Возможность осуществления группового раскроя;
- Простота конструкции;
- Прижим спутника к полиуретановому валку осуществляется с помощью жёсткого вала – можно использовать штатную двухвалковую машину.

Недостатки:

- Повышенный износ вала и спутника – из-за недопустимости наличия в сопряжении смазочного материала возникает явление сухого трения [2].

В выбранной схеме двухвалковой машины наиболее изнашиваемыми частями будут:

1. Опоры полиуретанового вала
2. Опоры жесткого прижимного вала
3. Сопряжение полиуретановый валок – спутник
4. Сопряжение жесткий валок – спутник

Полиуретановый валок неподвижен, находится в жёсткой станине, его опоры имеют возможность хорошо смазываться. Поэтому в качестве опор полиуретанового вала выбираем подшипник скольжения. Конструкцию, типоразмер и материал выбираем по справочнику [1].

С помощью жёсткого прижимного вала осуществляется прижатие спутника к полиуретановому валку. Т.е. опоры должны иметь возможность перемещаться и передавать усилие 5 тонн. В качестве опор используем двухрядные шариковые сферические подшипники. Подшипники находятся в детали типа ползушка, через которую винтом передаётся усилие (2.5 тонны на каждую опору, для обеспечения процесса врубki деталей). Регулирование ползушки осуществляется винтом с трапециидальной резьбой Tr32x3. При работе винт и, соответственно, ползушка неподвижны. Диаметр вала и номер подшипника определяем конструктивно. Смазывание подшипника осуществляется с использованием пластичной смазки «Литол 24» по ГОСТ 21150-80. Смазочный материал закладывается в полость подшипника и обновляется в соответствии с техническими требованиями.

Износ сопряжения полиуретановый валок – спутник в данной работе не рассматривается.

Сопряжение жесткий валок – спутник является наиболее изнашиваемым в данном механизме вследствие:

1. Передачи больших рабочих давлений;
2. Недопустимости наличия смазочного материала в зоне контакта;
3. Недопустимости использования антифрикционных материалов (коэффициент трения должен быть как можно выше);
4. Недопустимость использования износостойких материалов из-за: плохой обрабатываемости, крупных размеров конструкции (дороговизны);

Зададим конструктивные параметры. За основу примем штатную двухвалковую машину с технологическим барабаном.

Ориентировочно примем:

- Ширина спутника: 400 мм;
- Диаметр спутника: 500 мм;
- Материал жесткого прижимного вала: сталь;
- Диаметр жесткого прижимного вала: 200 мм;
- Материал барабана: алюминий;
- Внутренний диаметр барабана: 400 мм;
- Смазочный материал отсутствует – сухое трение;
- Рабочий период: 1 год при двухсменной работе;

- Суммарный допускаемый износ сопряжения 1мм за рабочий период;

Технологически вести обработку по всей длине 400 мм жесткого вала и внутренней поверхности барабана нецелесообразно. Сделаем две дорожки по краям барабана. Это увеличит линейный износ, но повысит технологичность конструкции. При прочих равных условиях, на основании формулы (1.7) запишем коэффициент отношения износа R, для сопряжения сталь-сталь и алюминий-сталь. Ориентировочно примем: т.к. сухое трение $y=0,5$; предел прочности стали $\delta_{CT} = 680 \text{ МПа}$; предел прочности алюминия $\delta_{AL} = 70 \text{ МПа}$; коэффициент трения сталь-сталь $\mu_{CT} = 0,2$; коэффициент трения алюминий-сталь $\mu_{AL} = 0,2$

$$R = \frac{U_{AL}}{U_{CT}} = \frac{\sqrt{\frac{h}{R}} \cdot \frac{P_H}{P_\phi} \cdot \frac{K_0}{\left(\frac{\delta_{AL}}{K_0 \cdot \mu_{AL} \cdot p^m} \right)^y} \cdot g_c \cdot t}{\sqrt{\frac{h}{R}} \cdot \frac{P_H}{P_\phi} \cdot \frac{K_0}{\left(\frac{\delta_{CT}}{K_0 \cdot \mu_{CT} \cdot p^m} \right)^y} \cdot g_c \cdot t} = \left(\frac{\delta_{CT} \cdot \mu_{AL}}{\delta_{AL} \cdot \mu_{CT}} \right)^y = \left(\frac{680 \cdot 0,22}{70 \cdot 0,2} \right)^{0,5} \approx 3,5$$

Расчет показал, что при использовании алюминия в качестве материала барабана увеличивает его износ практически в 3.5 раза, по сравнению со стальным. Кроме того, сопряжение алюминий-сталь склонно к заеданию. Поэтому в качестве материала барабана принимаем сталь. Но громоздкий барабан нецелесообразно целиком изготавливать из стали, раз изнашиваются только дорожки. Поэтому барабан изготавливаем составным: щёки с дорожками – сталь, центральная часть – алюминиевая обечайка, на которой крепятся резак. Согласно таблице 1 в качестве материала жесткого вала выберем ст. 20Х с закалкой, а щёк барабана – ст.45.

Конструктивно примем диаметр жёсткого вала 145мм, внутренней дорожки барабана 380 мм. Т.к. материал практически одинаков (сталь 45 - сталь 20Х), следовательно, износ жесткого вала будет в 2.62 раза больше износа дорожки барабана, ведь ширина зоны контакта у них равна. Исходя из того, что суммарный допускаемый износ равен 1 мм или 1000 мкм, получаем уравнение:

$$x + 2,62x = 1000, \text{ где } x - \text{допускаемый износ дорожки барабана:}$$

Решая уравнение, получим: $x = 276 \text{ мкм}$. Следовательно:

- допускаемый износ дорожки барабана = 276 мкм
- допускаемый износ вала = 724 мкм

Определим ширину дорожек. Проведём расчёт по формуле (1.13). Ориентировочно примем: длина линии контакта в торцевом сечении 10мм; шероховатость $Ra=12,5 \text{ мкм}$. Если в дальнейших расчетах потребуется меньшая шероховатость, проведём перерасчёт. По табл. 2. примем $\sqrt{\frac{h}{R}} = 0,1$. Примем $\frac{P_H}{P_\phi} = 0,1$,

для расчёта максимально возможного износа. Путь трения для детали Валок $S_{\text{ттр}} = 455,6 \text{ мм}$; число циклов $n_{\text{ттр}} = 5538461 \text{ шт}$ (1 год при двухсменной работе). Коэффициент $K_0 = 1,75$. Тогда:

$$S = \sqrt[m]{\frac{K_0 \cdot \mu \cdot F^m}{\delta_\epsilon}} \cdot \sqrt[y]{\frac{K_0 \cdot \sqrt{\frac{h}{R}} \cdot \frac{P_H}{P_\phi} \cdot S_{1\psi} \cdot n_\psi}{U_{\text{лин.доп.}}}} =$$

$$= \sqrt[3]{\frac{1,75 \cdot 0,2 \cdot 200^3}{680}} \cdot \sqrt[0,5]{\frac{1,75 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \cdot 455 \cdot 5538461}{276}} \approx 118$$

Примем ширину каждой дорожки 50 мм, т.к. меньший размер вызовет ненадёжность передвижения и увеличит суммарный износ сопряжения.

Проведя расчёты по формуле (1.14) $\sqrt{\frac{h}{R}} = \frac{\left(\frac{\delta_\epsilon}{K_0 \cdot \mu \cdot p^m}\right)^y \cdot U_{\text{лин.доп.}}}{K_0 \cdot \frac{P_H}{P_\phi} \cdot \vartheta \cdot t_{\text{зад}}}$ получаем

данные представленные в табл. 6.:

Табл. 6. Подбор параметра шероховатости Ra, мкм

Ra	12,5	6,3	3,2	1,6	1,25
допускаемый износ дорожки барабана, мкм	255,9	170,2	84,3	26,8	16,3
допускаемый износ жесткого вала, мкм	670,3	445,4	220,1	68,1	41,9

Т.о. назначаем на обе сопрягаемые поверхности шероховатость Ra 12,5. Можно было бы взять Ra 6,3, но в таком случае реальный износ был бы меньше допускаемого в 1,5 раза, а нам, в данном случае, это не требуется.

Таким образом, изнашиваемые поверхности будут иметь следующие параметры:

Барабан (щёки): Материал: Ст. 45; Шероховатость: Ra 12,5 мкм; Диаметр: 380 мм; Число оборотов за 1 цикл: 1

Валок: Материал: Ст. 20Х; Шероховатость: Ra 12,5 мкм; Диаметр: 145 мм; Число оборотов за 1 цикл: 2,62

Общие: Коэффициент трения: 0,2; Давление на контакте: 200 МПа; Степень m: 3; Рабочий период: 1 год при двухсменной работе; Смазочный материал отсутствует: y=0,5

Проведём проверочный расчёт по формуле (1.8) детали Щека:

$$U_\lambda = \sqrt{\frac{h}{R}} \cdot \frac{P_H}{P_\phi} \cdot \frac{K_0}{\left(\frac{\delta_\epsilon}{K_0 \cdot \mu \cdot p^m}\right)^y} \cdot S_{1\psi} \cdot n_\psi =$$

$$= 0,1 \cdot 0,1 \cdot \frac{1,75}{\left(\frac{680}{1,75 \cdot 0,2 \cdot 200^3}\right)^{0,5}} \cdot 1193 \cdot 5538461 = 256 \text{ мкм}$$

Таким образом:

1. Износ детали Щека будет составлять 256 мкм на сторону.
2. Износ детали Валок будет составлять $256 \cdot 2,62 = 670$ мкм на сторону.

3. Суммарный износ будет составлять 926 мкм.

Эти данные соответствуют заданным параметрам. Следовательно, берём их за основу, при конструирования машины.

Общий вид машины представлен на рис.2.

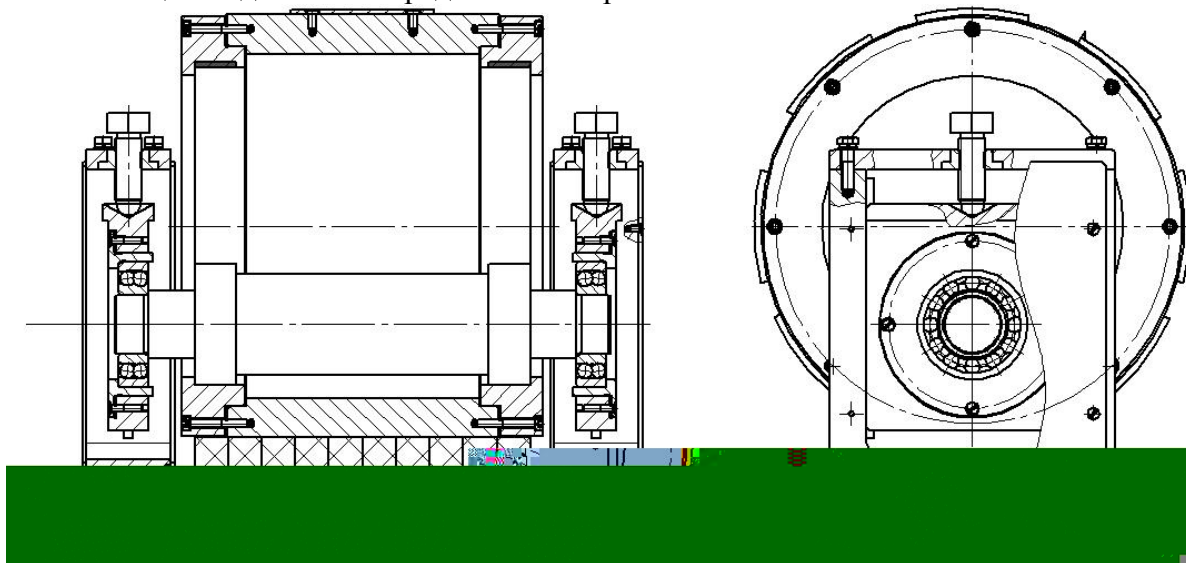


Рис.2. Общий вид двухвалковой вырубной машины

Исходя из рассчитанных данных, назначим следующую технологию восстановления работоспособности двухвалковой машины:

1. Растачиваем деталь 1 под ремонтный размер – тем самым удаляется дефектный слой

2. Протачиваем изношенную поверхность детали 2 под ремонтный размер, и на получившуюся шейку напрессовываем дополнительную ремонтную деталь типа «втулка», обрабатываем получившуюся сборочную единицу под ремонтный размер.

Схема реновации узла представлена на рис.3.

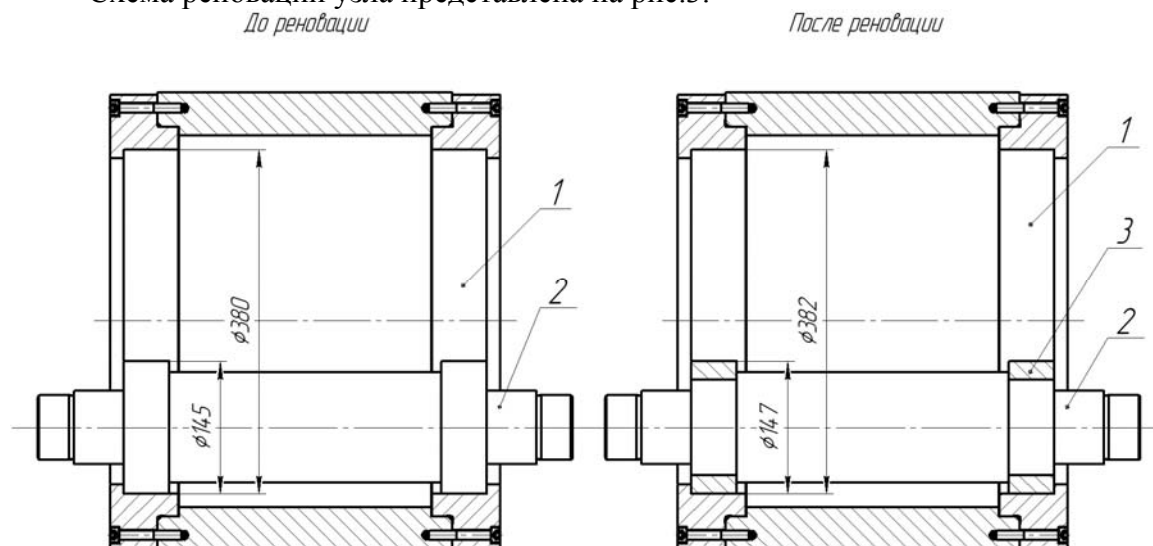


Рис.3. Общая схема реновации наиболее изнашиваемого узла двухвалковой машины со спутником

Вывод: Не смотря на сложность математического моделирования процессов трения, методика позволяет на стадии конструирования, ремонта или модернизации выполнить ориентировочные расчёты износа и геометрических параметров трибосопряжений в машине. Руководствуясь результатами расчётов можно оптимизировать технические требования и технологию изготовления или реновации,

которая обеспечит корректную работу машины в течение заданного промежутка времени.

Список литературы:

1. Ануриев В. И. Справочник конструктора машиностроителя. т 1, 2, 3 М.: Машиностроение, 2001.
2. Гаркунов Д. Н., Корник П. И. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения машин М.: Издательство МСХА, 2003. 344 с.
3. Комаров А.Д. Романовский В.П. Вырезка деталей полиуретаном, Ленинград, 1986г.
4. Мельников Э.Л. Справочник по холодной штамповке оболочковых деталей. М.: Машиностроение, 2003, 288с.
5. Проников А.С. Параметрическая надёжность машин. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. 560с.
6. Ходырев В.А. «Проектирование, изготовление и эксплуатация штампов с полиуретаном», - Пермское книжное издательство, 1975г.