

*к.т.н., доц. Ведерников Н.И.,
ассистент Пипкин Ю.В.,
магистр Григорьев А.А.
(ДонГТУ, Алчевск, Украина)*

УПРАВЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТРЕНИЯ ПОКОЯ ПРИ УСТАНОВКЕ ЗАГОТОВОК НА ТОЧЕЧНЫЕ ОПОРЫ СТАНОЧНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

У статті надано результати аналізу факторів, що впливають на коефіцієнт тертя спокою, та виконано розрахунок коефіцієнту тертя спокою для двохелементної конструкції дотикового опорного елемента верстатного пристосування.

Проблема и ее связь с практическими и научными задачами.

Процесс трения покоя играет важную роль в производственных механизмах сцепления, передачи движения, торможения. При обработке заготовок на металлорежущих станках станочные приспособления обеспечивают неподвижность обрабатываемой заготовки при воздействии на нее сил резания. Основную роль здесь играет именно процесс трения покоя в контакте заготовки с опорными элементами станочного приспособления (в первую очередь), а также в контакте приспособления с установочными поверхностями станка. Увеличение коэффициента трения покоя позволяет повышать режимы резания или уменьшать величину усилия зажима, что в первом случае повлияет на повышение производительности изготовления, а во втором случае может способствовать уменьшению материалоемкости конструкции, ее габаритов, снижению требований к приводу, компактности конструкции. В любом случае повышение коэффициента трения покоя повышает надежность закрепления обрабатываемой заготовки и работы станочного приспособления в целом.

Анализ исследований и публикаций.

Процесс трения покоя детально исследован в работах [1, 2]. Влияние процесса трения покоя на надежность станочных приспособлений исследовано в работе [3]. Для решения задачи управления коэффициентом трения покоя в станочных приспособлениях автором работы [3] предложен способ повышения надежности закрепления заготовки в приспособлении путем разделения конструкции базирующей опоры на два элемента.

Постановка задачи по расчету коэффициента трения покоя.

Повышение надежности закрепления заготовки может быть достигнуто при повышении коэффициента трения покоя при неизменных жесткости и коэффициенте пропорциональности между силой закрепления и силой резания [3]. Влияние основных факторов на коэффициент трения детально рассмотрены в работах [1, 2, 4] и выражаются соответствующей схемой (рис.1).

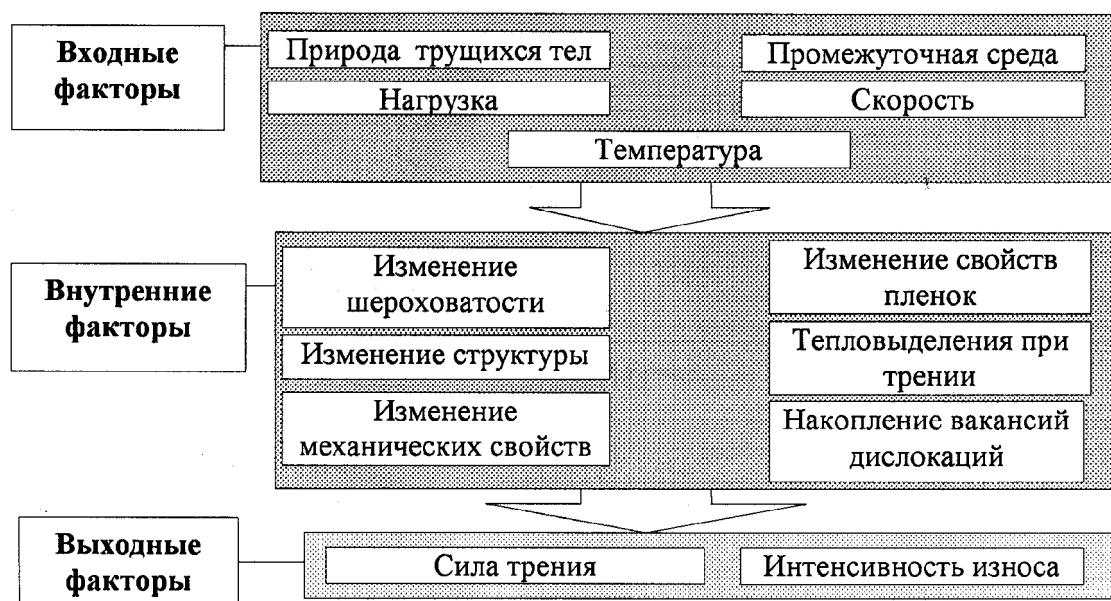


Рисунок 1 – Схема факторов, влияющих на фрикционное взаимодействие твердых тел [1]

На основании выше изложенного задача по расчету коэффициента трения покоя для двухэлементной базовой опоры формулируется следующим образом:

Определить коэффициент трения покоя при установке стальной заготовки на двухэлементную базирующую опору. При зажиме заготовки должны обеспечиваться упругий контакт между основной опорой и заготовкой, а также пластический контакт между дополнительным элементом и заготовкой.

Качественный и количественный анализ влияния отдельных факторов.

Качественный и количественный анализ влияния отдельных факторов можно провести при анализе теоретических зависимостей для определения коэффициентов трения [1, 2, 4].

Так как доработка или изменение конструкции базирующих элементов станочных приспособлений должна вестись на основе существующих конструкций, то наиболее вероятными направлениями, с уче-

том выводов работы [3], будут — изменение механических свойств путем подбора материалов дополнительных элементов ($\mu, \sigma_T, E, \tau_0, \beta, \alpha_T$), изменение контурной площади контакта дополнительных элементов (A_c), изменение внешних условий контакта — шероховатостей поверхности (R_{max}, r, b, Δ, v). Причем для принятой к расчету двухэлементной пары трения по [3] изменяться могут только конструктивные параметры дополнительного элемента трения и зависящие от них, т.е. варьироваться будут только контурная площадь A_c и контурное давление p_c . Также возможно изменение параметров шероховатости поверхностей (R_{max}, r, b, Δ, v), в соответствии с определенным методом получения (обработки) [2].

Контурная площадь A_c зависит от конструктивных размеров основного и дополнительных элементов (рис. 2, б, в) и представляет собой сумму их контурных площадок A_{cO} и A_{cD} . При этом контурная площадка для основного элемента 4 (рис. 2, б) с определяется приведенным модулем упругости и величиной нормальной нагрузки через радиус площадки контакта, определяемый укрупненно по формуле [2] (для случая контакта сферического тела с плоскостью)

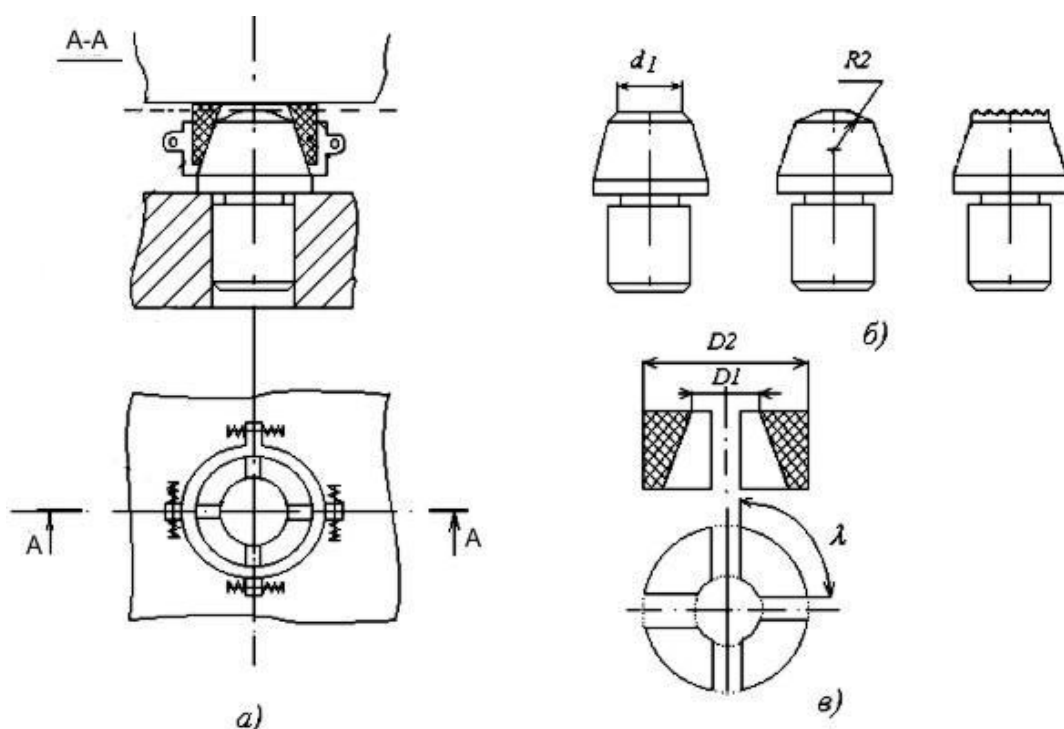


Рисунок 2 – Принципиальная схема (а) и определяющие A_c размеры (б, в) основных элементов двухэлементной базирующей опоры

$$\rho = 0,909\sqrt[3]{\theta_{\Sigma} \cdot r \cdot N}, \quad (1)$$

где ρ – радиус площадки контакта, мм;

$r=R2$ – радиус скругления опорной поверхности, мм;

N – нормальная нагрузка.

Тогда $A_{cO} = \pi \cdot \rho^2$ (площадка контакта – круг). Контурная площадка контакта дополнительных элементов определится как произведение площади одного элемента на их число $A_{cD} = z \cdot \overline{A_{cD}}$, где $\overline{A_{cD}} \approx \frac{1}{z} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D2^2 - D1^2}{4} \right) - \left(\left(\frac{D2 - D1}{2} \cdot B \right) \right)$, где B – ширина зазора между элементами.

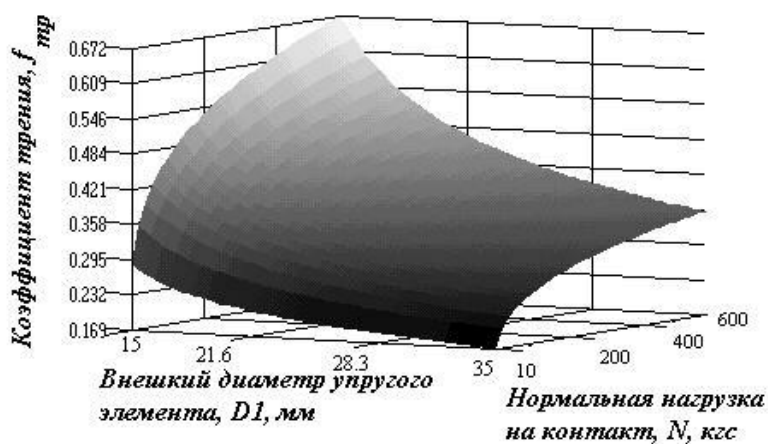
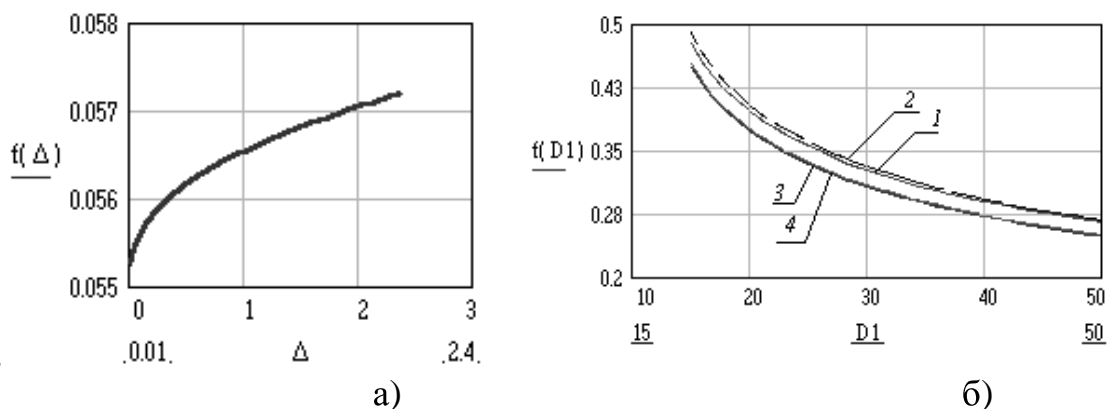
Для формулирования задачи по расчету коэффициента трения покоя для двухэлементной базирующей опоры важно оценить величину коэффициента трения покоя по отдельности для контактов *заготовка–основной элемент* и *заготовка–дополнительный элемент*. Результаты подстановки исходных данных в расчетные формулы подтверждают (рис. 3) указанные в источниках [1, 2, 4] и работе [3] выводы о тенденциях формирования коэффициента трения покоя в контактах металл–металл и металл–полимер:

- коэффициент трения в контакте металл–металл (сталь–сталь, сталь–чугун) в большей степени определяется молекулярным взаимодействием и при упругом контакте имеет небольшую величину около 0,1;

- высокий коэффициент трения в контакте металл–полимер достигается при пластическом характере контакта.

На рисунке 3 показаны расчетные графики зависимостей коэффициента трения покоя при упругом контакте от величины комплекса шероховатости Δ (рис.3,а); при пластическом контакте стали 45 с полимерным материалом дополнительных элементов опоры 1 – с фторопластом; 2 – ПЭВД; 3 – ПЭНД; 4 – полипропиленом (рис.3,б); а также график поверхности уровня зависимости от внешнего диаметра дополнительного элемента опоры и нормальной нагрузки при пластическом контакте (рис.3,в).

По полученным графикам видно, что с увеличением контурной площади дополнительных элементов коэффициент трения уменьшается, что связано со снижением контурного давления, а, следовательно, и давления на единичных микронеровностях. Таким образом, разница диаметров наружного и внутреннего для дополнительных элементов должна быть максимально меньшей.



в)

Рисунок 3 – Графики зависимостей коэффициента трения покоя

Расчет коэффициента трения покоя для двухэлементной базисной опоры.

Решение поставленной задачи требует определения условий работы конструкции опоры трения, таких, чтобы выполнялись условия поставленной задачи.

Величину нагрузки, при которой для заданной контурной площади дополнительного элемента будет формироваться пластический контакт, можно определить из формулы

$$\frac{5,4^v \cdot HB^{2v+1} (1 - \mu^2)^{2v}}{2\Delta^v \cdot E^{2v}} \leq p_c \leq \frac{0,5}{\left(v \cdot b^{1/v}\right)^{\frac{v}{v-1}}}, \quad (2)$$

приняв $p_c = \frac{N}{A_{cD}}$, после преобразований получаем

$$\frac{5,4^v \cdot HB^{2v+1} (1-\mu^2)^{2v}}{2\Delta^v \cdot E^{2v}} \cdot \overline{A_{cD}} \leq N_D \leq \frac{0,5}{(v \cdot b^{1/v})^{v-1}} \cdot \overline{A_{cD}} \cdot HB. \quad (3)$$

Поверхность уровня для зависимости нормальной нагрузки от внешнего диаметра дополнительного элемента и комплекса шероховатости (рис. 4) показывает, что пластическая деформация для контакта сталь-фторопласт возникает при сравнительно небольшой нагрузке (ограничение снизу), при этом для перехода к микрорезанию требуются значительные усилия (рис. 5) (ограничение сверху).

Анализ рисунка 4 показывает, что для достижения пластического контакта увеличение нагрузки требуется в случае уменьшения значения комплекса шероховатости Δ , т.е. повышения качества обработки поверхности путем шлифования по 7-8 классу шероховатости, или в случае увеличения внешнего диаметра $D1$ дополнительного элемента, т.е. увеличения контурной площадки.

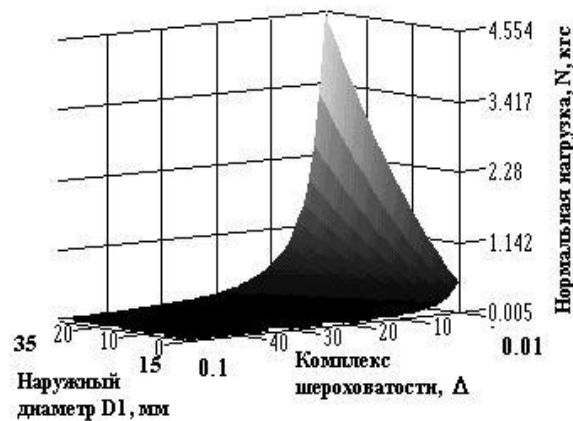


Рисунок 4 – Ограничение снизу для нормальной нагрузки, обеспечивающей пластический контакт сталь-фторопласт

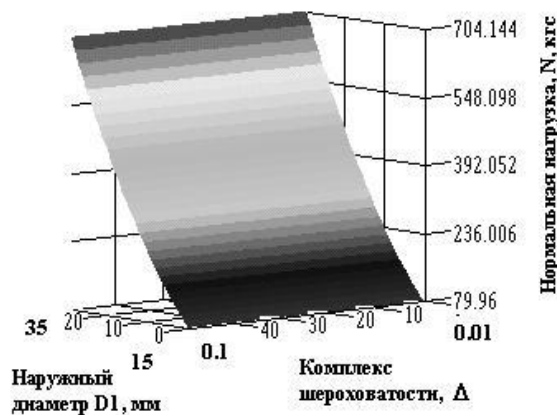


Рисунок 5 – Ограничение сверху нормальной нагрузки в контакте сталь-фторопласт до перехода к микрорезанию

Суммарный коэффициент трения покоя двухэлементной базовой опоры будет определяться характером распределения контурного давления между контурными площадками основной опоры и дополнительных элементов. Известно из [1], что относительное сближение тел при упругом контакте может быть определено из выражения

$$\varepsilon = \left\{ \frac{2\sqrt{\pi} \cdot p_c \cdot \theta}{k_v} \left(\frac{r}{R_{max} \cdot b^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{2}{2\nu+1}}, \quad (4)$$

а сближение при пластическом контакте – из выражения

$$\varepsilon = \left(\frac{p_c}{c \cdot \sigma_T \cdot b} \right)^{\frac{1}{\nu}}. \quad (5)$$

Считая, что сближение в контактах "заготовка–основная опора" и "заготовка–дополнительная опора" равны, обозначая параметры упругого контакта индексом М(металл) и параметры пластического контакта индексом Р(полимер) получим

$$\left(\frac{p_{cP}}{c \cdot \sigma_{TP} \cdot b_P} \right)^{\frac{1}{\nu_P}} = \left\{ \frac{2\sqrt{\pi} \cdot p_{cM} \cdot \theta_M}{k_{vM}} \left(\frac{r_M}{R_{max M} \cdot b_M^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{2}{2\nu_M+1}}. \quad (6)$$

Выражая контурное давление через нормальную нагрузку и контурную площадку, получим

$$\left(\frac{N_P}{c \cdot \sigma_{TP} \cdot b_P \cdot A_{cP}} \right)^{\frac{1}{\nu_P}} = \left\{ \frac{2\sqrt{\pi} \cdot N_M \cdot \theta_M}{k_{vM} \cdot A_{cM}} \left(\frac{r_M}{R_{max M} \cdot b_M^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{2}{2\nu_M+1}}. \quad (7)$$

После выноса нормальных нагрузок за скобки, получаем

$$N_P^{1/\nu} \cdot \left(\frac{1}{c \cdot \sigma_{TP} \cdot b_P \cdot A_{cP}} \right)^{\frac{1}{\nu_P}} = N_M^{2/(2\nu_M+1)} \left\{ \frac{2\sqrt{\pi} \cdot 1 \cdot \theta_M}{k_{vM} \cdot A_{cM}} \left(\frac{r_M}{R_{max M} \cdot b_M^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{2}{2\nu_M+1}}. \quad (8)$$

После замены $N_M = N - N_P$, а так же обозначив постоянные

$$B_M = \left\{ \frac{2\sqrt{\pi} \cdot 1 \cdot \theta_M}{k_{vM} \cdot A_{cM}} \left(\frac{r_M}{R_{max M} \cdot b_M^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{2}{2\nu_M+1}} \quad \text{и} \quad B_P = \left(\frac{1}{c \cdot \sigma_{TP} \cdot b_P \cdot A_{cP}} \right)^{\frac{1}{\nu_P}}, \quad (9)$$

Получаем
$$N_P^{1/\nu} \cdot B_P = (N - N_P)^{2/2\nu+1} \cdot B_M. \quad (10)$$

Возведем обе части равенства в степень $\frac{2\nu+1}{2}$, после преобразований получим

$$N_P^{\frac{2\nu+1}{2\nu}} \cdot B_P^{\frac{2\nu+1}{2}} + N_P \cdot B_M^{\frac{2\nu+1}{2}} - N \cdot A_M^{\frac{2\nu+1}{2}} = 0. \quad (11)$$

Численные решения полученного уравнения с одним неизвестным в вещественной области выполнены в среде MathCad для суммарных нормальных нагрузок от 10 до 1000 кгс.

Анализ данных, представленных в виде графиков (рис. 6), показывает, что доля реакции от дополнительного элемента убывает при увеличении суммарной нормальной нагрузки, что объясняется значительной контактной деформацией полимерного материала (материала с меньшим модулем упругости) в контакте "заготовка-полимерный материал дополнительного элемента опоры", даже при небольших относительных сближениях. При возрастании суммарной нормальной нагрузки, т.е. при увеличении сближения тел основную реакцию опоры обеспечивает контакт "заготовка-основная опора", а доля реакции от дополнительного элемента убывает. При этом степень убывания реакции меньше для поверхностей, обработанных по более высокому классу шероховатости.

Суммарный коэффициент трения для двухэлементной базовой опоры можно определить из равенства

$$N \cdot f_{\Sigma} = N_P \cdot f_P + N_M \cdot f_M, \quad (12)$$

где N, N_P, N_M – соответственно суммарная нормальная нагрузка, нагрузка на дополнительный элемент опоры, нагрузка на основную опору;

f_{Σ}, f_P, f_M – соответственно суммарный коэффициент трения; дополнительного элемента (пластический контакт) и основной опоры (упругий контакт).

При этом указанные составляющие формулы зависят от величины суммарной нормальной нагрузки. Расчет коэффициента трения для заданных материалов (табл. 6) показывает, что коэффициент трения двухэлементной базовой опоры увеличивается.

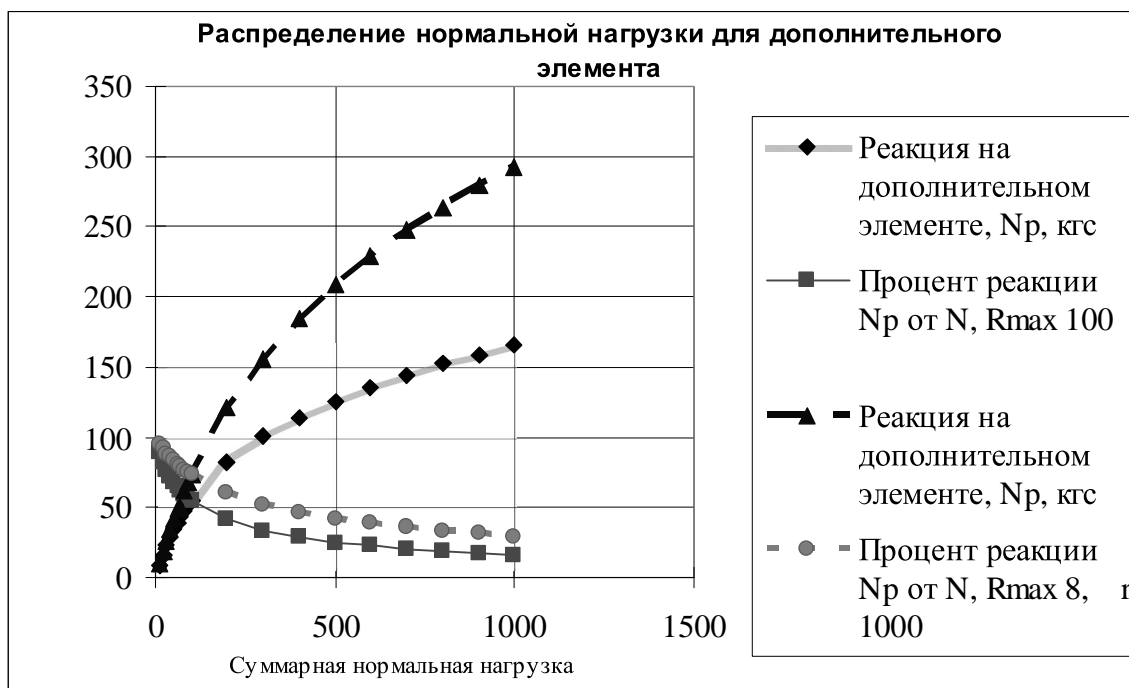


Рисунок 6 – Величина и доля нормальной нагрузки на дополнительном элементе в зависимости от суммарной нормальной нагрузки

Таблица 6 – Расчет коэффициента трения для двухэлементной опоры

Вид контакта	Суммарная Нормальная нагрузка	Отношение N_p/N_M	Элементный коэффициент трения, f_p, f_M	Суммарный коэффициент трения, f_Σ
Основная опора – заготовка	500 / 100	442,84/69,39	0,057/0,058	0,076/0,102
Упругий				
Сталь-Сталь				
Дополнительная опора		57,16/30,61	0,224/0,203	
Пластический				
Сталь-ПЭНД				

Примечание: в числителе рассчитанные значения при нагрузке 500 кгс; в знаменателе – при нагрузке 100 кгс.

Выводы:

1. Применение двухэлементной базовой опоры обеспечивает увеличение коэффициента трения покоя при неизменных внешних воздействиях.

2. Степень увеличения коэффициента трения определяется распределением контурного контактного давления между основной опорой и дополнительными элементами.

3. Распределение контактного давления между основной опорой и дополнительным элементом определяется не только соотношением контурных площадок, но также и физико-механическими свойствами контактирующих материалов, технологическим методом подготовки поверхности (параметрами ее микрогеометрии) и величиной суммарной нормальной нагрузки.

4. При расчете параметров геометрии дополнительных элементов необходимо учитывать влияние коэффициента трения на величину предварительного тангенциального смещения заготовки относительно основной опоры.

В статье приведены результаты анализа факторов, влияющих на коэффициент трения покоя. Выполнен расчет коэффициента трения покоя для двухэлементной конструкции точечной опоры станочного приспособления. Результаты анализа и расчета подтвердили возможность управления коэффициентом трения покоя в станочных приспособлениях.

Results of the analysis of the factors, influencing upon coefficient on static friction are brought in article. In this are executed calculation of coefficient of static friction for two-element design fixed support pin in fixture. The results of the analysis and calculation have confirmed the possibility of management of the coefficient of static friction in fixture.

Библиографический список

1. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.

2. Трение, изнашивание и смазка: Справочник в 2-х кн. // В.В.Алисин, А.Я.Алябьев, А.М.Архаров. Под ред. И.В.Крагельского, В.В.Алинина. — М.: Машиностроение, 1978. — Кн. 1., 400 с

3. Силаев Л.А. Повышение надежности базирующих элементов станочных приспособлений / Проблемы трибологии. - 1999. - №1. - С.105-112.

4. Коэффициенты трения / И.В. Крагельский, И.Э. Виноградова. — М.: Машигиз, 1962.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Петрушовым С.Н.