

УДК 621.97

Роганов Л. Л., Чоста Н. В., Карнаух Д. С.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЖИМА
ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ НА КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ
КЛИНОШАРНИРНОГО МЕХАНИЗМА С ВОГНУТЫМ КЛИНОМ**

Для реализации процессов обработки металлов давлением перспективным является использование прессов с клиношарнирным механизмом (КШМ), особенно с вогнутым клином (ВК), разработанным в Донбасской государственной машиностроительной академии. Преимуществами КШМ с ВК являются: большие опорные поверхности деталей; небольшая высота звеньев по направлению действия рабочей силы; возможность вынесения податливых деталей и узлов пресса из зоны действия максимальной силы; переменность соотношения между приводной и рабочей силами [1]. Основные звенья КШМ с ВК: клин, шарнир и ползун. К входному звену – клину прикладывается приводное усилие, в результате действия которого клин поступательно перемещается в направляющих и своей рабочей вогнутой поверхностью оказывает давление на соответствующую выпуклую поверхность шарнира. Шарнир, проворачиваясь в цилиндрическом пазу ползуна, передает усилие на последний, а тот, в свою очередь, через инструмент – на заготовку. Таким образом, для КШМ с ВК характерно наличие четырех поверхностей трения («клин – направляющие», «клин – шарнир», «шарнир – ползун», «ползун – направляющие»), имеющих по сравнению с габаритными размерами самого механизма, достаточно большие площади. Это приводит к тому, что условия трения оказывают существенное влияние на соотношение между приводным усилием на клине и рабочим усилием на ползуне, а, следовательно, и на коэффициент полезного действия КШМ с ВК [2]. Исследование клиношарнирного механизма в направлении снижения потерь на трение является актуальным.

Основным направлением снижения трения в КШМ с ВК является создание жидкостного трения на контактных поверхностях, когда процесс трения переносится в слой жидкого смазочного материала, обладающего малым сопротивлением сдвигу и предохраняющего поверхности деталей от повреждений [3].

Целью работы является исследование режима жидкостного трения при работе клиношарнирного механизма с вогнутым клином.

В процессе работы клиношарнирного механизма смазывающая жидкость, которая находится между сопрягаемыми поверхностями, воспринимает технологическую нагрузку и под её действием выжимается из зазоров между деталями в зоне контакта. В результате вершины микронеровностей в зонах, где вытеснена жидкость, будут контактировать через граничную пленку смазки, т. е. в некоторых местах возможно создание режима граничного или сухого трения, толщина слоя смазки при этом [4]:

$$h_{min} \leq R_{z1} + R_{z2}, \quad (1)$$

где R_{z1} , R_{z2} – высоты микронеровностей сопрягаемых поверхностей.

С увеличением удельного давления значение h_{min} уменьшается. Для устойчивой работы механизма в режиме жидкостного трения с учетом погрешностей изготовления и сборки, а также упругих деформаций узла должно выполняться условие [4]:

$$h_{min} = S(R_{z1} + R_{z2}), \quad (2)$$

где S – условный коэффициент безопасности, $S > 1$.

Таким образом, для уменьшения трения необходимы следующие условия: между скользящими поверхностями должен быть зазор; масло соответствующей вязкости должно непрерывно заполнять зазор; скорость относительного движения поверхностей должна быть достаточной для того, чтобы в масляном слое создалось давление, способное уравновесить внешнюю нагрузку.

Величина зазора между сопрягаемыми поверхностями должна быть оптимальной, с точки зрения обеспечения достаточной толщины слоя смазки и жесткости механизма, а, следовательно, качества выполнения технологического процесса. Выжимание жидкости из зазоров в зонах контакта клина, шарнира, ползуна и направляющих происходит во все стороны подвижных соединений, имеющих обычно в плане прямоугольную форму [5].

Рассмотрим частный случай клиношарнирного механизма с вогнутым клином. Обозначим размеры клина в плане $2B$ и L (рис. 1). В реальных конструкциях клиношарнирного механизма сторона $2B$ обычно в несколько раз больше, чем L , движение происходит вдоль стороны $2B$, по которой могут быть расположены уплотнение или направляющая, ограничивающие вытеснение жидкости.

Рассмотрим процесс выжимания жидкости из зазора d между двумя прямоугольными пластинами, одна из которых имеет размеры сторон $2B$ и L , а другая – неограниченные по сравнению с первой размеры (см. рис. 1).

Для упрощения расчетов приняты допущения: движение первой пластины вдоль оси OZ принимаем равномерным; возвратно-поступательное движение пластины не приводит к образованию гидравлического клина; влиянием упругой деформации сжатой жидкости на общее изменение слоя жидкости пренебрегаем, так как оно очень мало (около 1 %); влияние упругой деформации пластин на податливость жидкости не учитываем, так как оно составляет менее 1 % от величины зазора; поверхности пластин считаем абсолютно гладкими, без микронеровностей; предполагаем, что пластины параллельны.

На верхнюю пластину действует постоянная сила F_0 . Ввиду малости зазора d , величина которого определяется посадкой в сочленяющихся поверхностях звеньев клиношарнирного механизма, режим движения жидкости считаем ламинарным.

Тогда касательные напряжения между соседними слоями жидкости подчиняются закону Ньютона:

$$t = \pm m \frac{dV}{dy}, \quad (3)$$

где m – коэффициент динамической вязкости;

$\frac{dV}{dy}$ – градиент скорости вдоль нормали к оси потока.

Составим уравнение равновесия сил, действующих на элементарный слой жидкости шириной L длиной B и толщиной dy (см. рис. 1):

$$(p_1 - p_2)Ldy - dt BL = 0, \quad (4)$$

где p_1 и p_2 – давление, действующее на слой жидкости внутри и снаружи пластины. Тогда из формулы (4):

$$dt = (p_1 - p_2)/B \cdot dy. \quad (5)$$

Проинтегрируем это выражение:

$$t = \int \frac{p_1 - p_2}{B} dy = \frac{p_1 - p_2}{B} y + C_1. \quad (6)$$

С учетом уравнения (3) найдем:

$$dV = -\frac{p_1 - p_2}{mB} y dy - \frac{C_1}{m} dy.$$

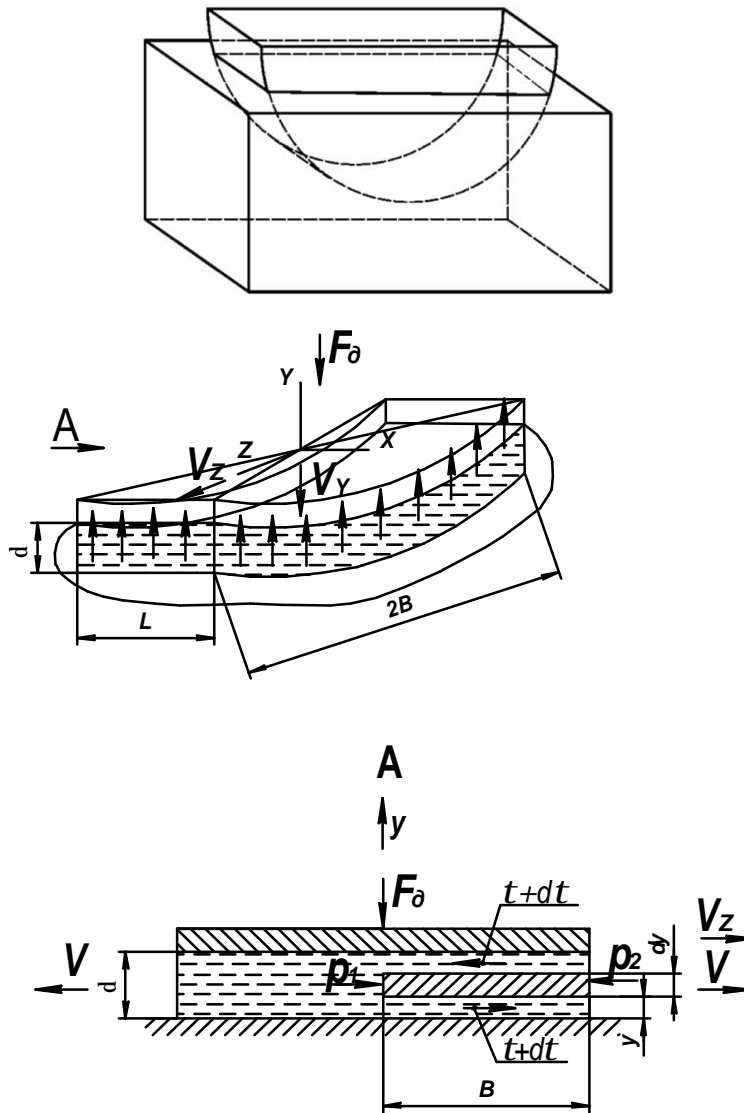


Рис. 1. Расчетная схема для определения величины зазора между сопрягаемыми поверхностями КШМ с ВК

Проинтегрируем данное выражение:

$$V = -\int \frac{p_1 - p_2}{mB} y dy - \int \frac{C_1}{m} dy = -\frac{p_1 - p_2}{2mB} y^2 - \frac{C_1}{m} y + C_2. \tag{7}$$

Определим постоянные интегрирования из граничных условий: при $y = d$; $V = V_z$ при $y = 0$; $V = 0$. Тогда $C_2 = 0$:

$$V_z = -\frac{p_1 - p_2}{2mB} d^2 - C_1 \frac{d}{m},$$

откуда:

$$\frac{C_1}{m} = -\frac{p_1 - p_2}{2mB}d - \frac{V_z}{d}. \quad (8)$$

Получим выражение для скорости выдавливания жидкости через зазор:

$$V = \frac{p_1 - p_2}{2mB} (yd - y^2) \pm \frac{y}{d} V_z. \quad (9)$$

Знак «плюс» относится к части слоя жидкости по положительному направлению оси z , а знак «минус» – к части слоя жидкости по отрицательному направлению оси z . Таким образом, получен закон распределения скорости в щели. Элементарный расход через слой жидкости $dQ = VLdy$ или с учетом уравнения (9):

$$dQ = \left[\frac{p_1 - p_2}{2mB} (yd - y^2) \pm \frac{y}{d} V_z \right] Ldy. \quad (10)$$

Проинтегрируем это выражение:

$$Q = d \int_0^{\delta} \left[\frac{p_1 - p_2}{2mB} (yd - d^2) \pm \frac{y}{d} V_z \right] Ldy = \left(-\frac{p_1 - p_2}{4mB} d^3 \pm \frac{V_z d}{2} \right) L. \quad (11)$$

Установим закон распределения давления. Пусть в некоторый момент времени размер зазора равен y . Выделим для этого момента времени в зазоре элементарную площадку dz . Тогда, на основании уравнения (11), при $p_2 = 0$ можно записать:

$$\frac{dp_1}{dz} = -4m \frac{Q}{Ly^3} \pm 2m \frac{V_z}{y^2}. \quad (12)$$

В случае опускания пластины с постоянной скоростью $V_y = const$ расход жидкости может быть представлен, как $Q = zLV_y$. Интегрируя с учетом этого выражение (12), получим:

$$p = -4m \int \frac{zLV_y}{Ly^3} dz \pm 2m \int \frac{V_z}{y^2} dz = -2 \frac{mV_y}{y^3} z^2 \pm \frac{2mV_z}{y^2} z + C. \quad (13)$$

Постоянную интегрирования найдем из граничных условий: $p = 0$ при $z = B$:

$$C = \frac{2mV_y}{y^3} B^2 - m \frac{2mV_z}{y^2} B;$$

$$p = \frac{2mV_y}{y^3} (B^2 - z^2) - m \frac{2mV_z}{y^2} (B - z) = \frac{2m}{y^2} \left[\frac{V_y}{y} (B^2 - z^2) - mV_z (B - z) \right].$$

Элементарная сила может быть записана как:

$$dF_{\delta} = pLdz = \frac{2mL}{y^2} \left[\frac{V_y}{y} (B^2 - z^2) - mV_z (B - z) \right] dz. \quad (14)$$

Интегрируя это выражение от $-B$ до B , найдем искомую силу:

$$F_{\delta} = \frac{2mL}{y^2} \int_{-B}^B \left[\frac{V_y}{y} (B^2 - z^2) mV_z (B - z) \right] dz = \frac{2mL}{y^2} \left[\frac{V_y}{y} \frac{4B^3}{3} mV_z 2B^2 \right] = \frac{8mLV_y}{3} \left(\frac{B}{y} \right)^3 m4mLV_z \left(\frac{B}{y} \right)^2.$$

Окончательно запишем (при $V_z = 0$):

$$F_{\delta} = \frac{8}{3} mLV_y \left(\frac{B}{y} \right)^3. \quad (15)$$

Полагая в этом выражении силу F_{δ} постоянной, а скорость $V_y = -dy/dt$ и учитывая, что при $t = 0$, $y = d$, получим после интегрирования уравнение изменения зазора между контактными поверхностями КШМ с ВК:

$$y = 1 / \sqrt{\frac{3F_{\delta}t}{4mLB^3} + \frac{1}{d^2}}. \quad (16)$$

Полученное уравнение справедливо для технологических процессов, протекающих при постоянной нагрузке, например, прессования ($F_{\delta} = const$). Однако в реальных условиях при использовании клиношарнирного механизма для разделительных процессов график нагрузки представляет собой сложную кривую. В этом случае для нахождения изменения зазора воспользуемся выражением:

$$y(t) = 1 / \sqrt{\frac{3 \left(\sum_{k=1}^n \int_{t_{k-1}}^{t_k} F_{\delta}(t_k) dt_k \right) t_k}{4m(t)LB^3} + \frac{1}{d_{k-1}^2}} \quad (17)$$

и методами численного интегрирования.

Как следует из зависимости (17), величина изменения зазора между пластинами при прочих равных условиях зависит от времени действия нагрузки и давления на сопрягаемых поверхностях. Анализ этого выражения позволяет определить оптимальную величину зазора при условии максимальной жесткости смазочного слоя и исключения соприкосновения пластин между собой в процессе нагружения (режим жидкостного трения). Как показывает анализ выражения (17), интенсивность выжимания смазки резко снижается с уменьшением времени действия нагрузки (рис. 2). Следовательно, для повышения жесткости смазочного слоя механизма, необходимо повышать его быстроходность.

Применение высокоскоростного типа привода клина позволяет значительно уменьшить время нагружения КШМ с ВК. При скорости перемещения клина 5...10 м/с время рабочего хода колеблется в пределах 0,05...0,10 с, что практически сведет к нулю объем жидкости, выдавленной из зазора. В то же время необходимо уменьшать величину зазора между сопрягаемыми деталями механизма, так как в этом случае объем выдавливаемой жидкости из зазоров уменьшается.

При решении поставленной задачи было сделано допущение, что сопрягаемые поверхности являются идеально гладкими. В реальных конструкциях клиношарнирных механизмов сопрягаемые поверхности трущихся деталей обрабатываются шлифованием ($R_a = 0,8$ мкм). В этом случае при зазоре между пластинами порядка 0,05 мм сопрягаемые

поверхности звеньев механизма в отдельных местах будут касаться между собой микровыступами, режим трения станет полужидкостным, что приведет к повышению коэффициента трения и снижению КПД механизма. Поэтому зазор между сопрягаемыми деталями привода должен выбираться оптимальным для обеспечения условий жидкостного трения.

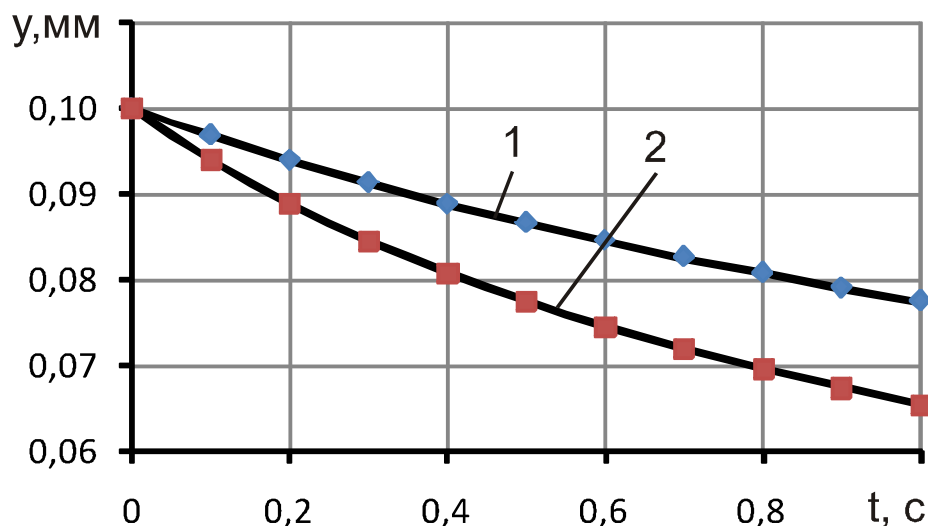


Рис. 2. Графики зависимости выжимания смазки пресс-солидола (1) и ЦИАТИМа-221 (2) от времени действия нагрузки при зазоре $d = 0,1$ мм, $F_0 = 45$ кН и размерах КШМ $L = 45$ мм, $B = 52$ мм

ВЫВОДЫ

1. На условия работы клиношарнирного механизма с вогнутым клином значительное влияние оказывают условия трения на контактных поверхностях, имеющих значительные размеры в плане.

2. Основным направлением повышения коэффициента полезного действия клиношарнирного механизма является обеспечение режима жидкостного трения.

3. На основе анализа математической модели, описывающей выжимание смазки из зазоров на контактных поверхностях клиношарнирного механизма с вогнутым клином, разработана методика расчета величины зазора для реализации режима жидкостного трения в системе «клин – шарнир – ползун – направляющие», проанализированы факторы, влияющие на него, и, в соответствии с этим, даны рекомендации по выбору типа привода вогнутого клина клиношарнирного механизма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Роганов Л. Л. Совершенствование клиношарнирных механизмов прессов для разделительных процессов обработки давлением / Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух, Н. В. Чоста // *Обработка материалов давлением : сб. научн. трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2009. – Вып. 2(21). – С. 333–338.

2. Роганов Л. Л. Определение КПД клиношарнирных механизмов / Л. Л. Роганов, Н. В. Чоста // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 487–489.

3. Пожбелко В. И. Динамическое моделирование и нелинейная безразмерная аналитическая характеристика сил вязкого трения гидродинамических опор скольжения / В. И. Пожбелко // *Известия Челябинского научного центра.* – Челябинск : ЧНЦ, 2003. – Вып. 1(18). – С. 71–75.

4. Орлов П. Н. Основы конструирования : справочно-методическое пособие / П. Н. Орлов. – М. : Машиностроение, 1988. – 560 с.

5. Расчет опорных подшипников скольжения : справочник / Е. Н. Кватницкий, Н. Ф. Куркач, Ю. Д. Полтавский, А. Ф. Савин. – М. : Машиностроение, 1979. – 70 с.