

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРОМЫСЛА И ЕГО ОПОРЫ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ В КРИВОШИПНО- КОРОМЫСЛОВОМ УДАРНОМ МЕХАНИЗМЕ ГУИМ-1

Еремыянц В.Э., Кислицын К.П.

КРСУ им. Б.Ельцина, Бишкек, Кыргызстан

Аннотация: В статье даны результаты исследования, где выявлены параметры коромысла и его опоры на динамические нагрузки в кривошипно-коромысловом ударном механизме ГУИМ-1.

Ключевые слова: кривошипно-коромысловый механизм, молот, привод, конические роликовые подшипники, инерция, деформация опоры.

INFLUENCE OF ROCKER ARM AND SUPPORT PARAMETERS ON DYNAMIC LOADS IN CRANK- ROCKER SHOCK MECHANISM GUIM-1

Eremyants V.E., Kislitsyn K.P.

Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyzstan, eremjants@inbox.ru

Annotation: The article presents the results of the study, which revealed the parameters of the rocker arm and its support for dynamic loads in the crank-rocker shock mechanism GUIM-1.

Key words: crank and rocker mechanism, hammer, drive, tapered roller bearings, inertia, support deformation.

В предшествующие годы в Инженерной академии Кыргызской Республики на основе структурного анализа и синтеза кривошипно-коромысловых механизмов с особыми положениям звеньев был создан экспериментальный образец молота ГУИМ-1 для уплотнения грунтов, проведения сейсморазведки, активации нефтяных скважин [1]. Его ударная система состоит из коромысла, включающего в себя боек 1 (рис. 1) со сферической ударной поверхностью радиусом R_C , и балку 2, выполненную из двух швеллеров № 27, расположенных полками внутрь; опоры 3 с коническими роликовыми подшипниками и наковальни 4. Боек крепится к швеллерам резьбовыми соединениями.

Молот имеет электрический привод, от которого энергия с помощью кривошипно-коромыслового механизма передается коромыслу, наносящему удары по наковальне.

Известно, что при проектировании коромысловых ударных систем одной из задач, стоящих перед конструкторами, является уменьшение динамических нагрузок в опоре коромысла. Это достигается за счет выбора параметров коромысла таким образом, чтобы точка контакта бойка с наковальней совпадала с центром удара. При этом усилия в опоре теоретически равны нулю.

Однако строгого выполнения этого условия добиться практически невозможно из-за конструктивных или прочностных ограничений. В связи с этим возникает задача исследования влияния тех или иных параметров ударной системы на усилия, возникающие в опоре, с целью поиска путей их снижения.

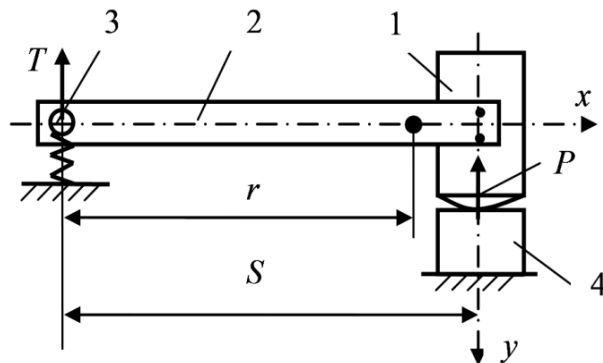


Рис. 1. Расчетная схема ударной системы молота ГУИМ-1

В задачи данной работы входило исследование влияния жесткости подшипниковой опоры коромысла, номера швеллера балки коромысла и момента инерции коромысла с бойком на усилия P (рис. 1), возникающие в контакте бойка с наковальней и усилия T в опоре коромысла.

Для решения поставленной задачи разработана математическая модель коромысловой ударной системы с упругой опорой коромысла, в основу которой положены следующие допущения. Коромысло и наковальня - жесткие недеформируемые тела, за исключением сферической ударной поверхности бойка, которая подвергается местным контактными деформациям. Податливость оси коромысла пренебрежимо мала и общая податливость опоры определяется податливостью подшипников качения.

Контактные деформации подшипников качения и ударной поверхности бойка не выходят за пределы упругих.

Математическая модель коромысловой ударной системы состоит из дифференциального уравнения движения коромысла и уравнения суммы проекций сил, действующих на коромысло при ударе, включая силы инерции.

$$J\ddot{\beta} + mr\ddot{u}_0 + PS = 0,$$

$$m(r\ddot{\beta} + \ddot{u}_0) + P + T = 0.$$

где J - момент инерции коромысла с бойком относительно оси вращения коромысла; β - угол поворота коромысла, вызванный деформацией ударной поверхности бойка и опоры; u_0 - деформация опоры; m - масса бойка с коромыслом; r , S - соответственно расстояние от оси вращения коромысла до общего центра тяжести коромысла с бойком и расстояние до точки контакта бойка с наковальней (до оси наковальни, рис. 1).

В качестве граничных условий использовались контактные характеристики, под которыми понимаются зависимости усилий в контакте коромысла с опорой T и бойка с наковальней P от местных контактных деформаций. Начальные условия имели вид

$$T(0) = 0, \quad \dot{T}(0) = 0, \quad P(0) = 0, \quad \dot{P}(0) = 0.$$

Контактные характеристики описывались формулами Герца для контакта сферических и цилиндрических тел [2]. Для контакта бойка с наковальней

$$P = K\alpha^{\frac{3}{2}},$$

где α - местная контактная деформация ударной поверхности,

$$K = \frac{2E}{3(1-\mu)}\sqrt{R_c},$$

E , μ – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала соударяющихся тел (здесь и далее принято, что все тела выполнены из стали с одинаковыми значениями характеристик E , μ), R_c – радиус сферической части бойка.

Для контакта коромысла с опорой использовались характеристики жесткости шариковых или роликовых подшипников, описанные в работе [3].

В результате получены следующие дифференциальные уравнения, связывающие усилия, возникающие в контакте коромысла с наковальней P и опорой T , с параметрами ударной системы.

$$\ddot{P} + k_2^2 P = -a_2 T, \quad (1)$$

$$\ddot{T} + k_1^2 T = -a_1 P, \quad (2)$$

где

$$k_1^2 = \frac{c_0}{m\alpha_2}, \quad a_1 = \frac{c_0\alpha_1}{m\alpha_2}, \quad \alpha_1 = 1 - \frac{mrS}{J}, \quad \alpha_2 = 1 - \frac{mr^2}{J},$$

$$k_2^2 = \frac{c}{m\alpha_2} \left[1 + \frac{mS^2}{J} \left(1 - \frac{2r}{S} \right) \right], \quad a_2 = \frac{c\alpha_1}{m\alpha_2}.$$

В этих формулах c_0 , c – приведенные коэффициенты жесткости контакта коромысла с опорой и контакта бойка с наковальней. Коэффициенты c_0 и c определялись путем линеаризации контактных характеристик по методике, изложенной в работе [2].

Уравнения (1), (2) решались методом последовательных приближений. В первом приближении принималось $T = 0$ и из уравнения (1) при начальных условиях $P(0) = 0$, $\dot{P}(0) = cV_0$ (где V_0 – скорость соударения бойка с наковальней) находилась функция $P(t)$.

Эта функция подставлялась в правую часть уравнения (2) и решением этого уравнения при начальных условиях $T(0) = 0$, $\dot{T}(0) = 0$ находилась функция $T(t)$ в первом приближении. Далее функция $T(t)$ подставлялась в правую часть уравнения (1), находилась функция $P(t)$ во втором приближении и т.д.

Расчеты показали, что для решаемой задачи первое приближение дает уже достаточно точный для инженерной практики результат. Поправка второго приближения для максимальных значений сил P , T и времени их действия не превышает 1% от результатов первого приближения.

Функции $P(t)$ и $T(t)$ во время действия силы P в первом приближении имеют следующий вид:

$$P(t) = (cV_0/k_2) \sin k_2 t, \quad (3)$$

$$T(t) = \frac{a_1 c V_0}{(k_1^2 - k_2^2)} \left(\frac{1}{k_1} \sin k_1 t - \frac{1}{k_2} \sin k_2 t \right). \quad (4)$$

Из формулы (3) следует, что длительность удара τ или время действия силы P определяется соотношением:

$$\tau = \pi/k_2.$$

После этого момента времени правая часть уравнения (2) обращается в ноль, а начальными условиями для его решения служат значения силы T и её производной по времени в момент окончания удара. Функция $T(t)$ после окончания удара имеет вид:

$$T(t) = \frac{\dot{T}(\tau)}{k_1} \sin k_1 (t - \tau) + T(\tau) \cos k_1 (t - \tau). \quad (5)$$

При расчете усилий в существующей конструкции молота принимались следующие исходные данные.

Диаметр бойка 0,41 м, высота 0,45 м, масса 466,4 кг, радиус сферы ударной поверхности 0,26 м. Диаметр наковальни 0,4 м, а высота 0,225 м.

Балка коромысла выполнена из двух швеллеров № 27 длиной 1 м. Погонная масса каждого швеллера 27,7 кг/м. Расстояние от оси вращения коромысла до продольной оси бойка и наковальни 1,205 м, а до центра масс всего коромысла 1,13 м. Момент инерции всего коромысла относительно оси вращения 708 кгм². Все элементы ударной системы выполнены из стали с плотностью 7850 кг/м³, модулем упругости $20,4 \cdot 10^{10}$ Па и коэффициентом Пуассона 0,3.

Графики зависимости $P(t)$ и $T(t)$ для существующей конструкции молота ГУИМ-1 показаны на рис. 2. При расчете для удобства принималось, что скорость соударения бойка с наковальней V_0 составляет 10 м/с. В действительности расчетное значение скорости удара составляет 8,5 м/с. Поэтому для получения усилий в реальной конструкции необходимо значения, указанные на графиках, умножить на коэффициент 0,85.

Результаты расчета показывают, что максимальное значение усилий, действующих в опоре коромысла, не превышает 0,6% от усилий в контакте бойка с наковальней. Тем не менее, они достаточно высоки.

С использованием полученных формул построены графики зависимости усилий в опоре коромысла от времени (рис. 3) для различных значений коэффициента жесткости и зависимости максимальных усилий от коэффициента жесткости опоры (рис. 4а). Треугольником на рис. 4 показаны значения, соответствующие параметрам существующей конструкции.

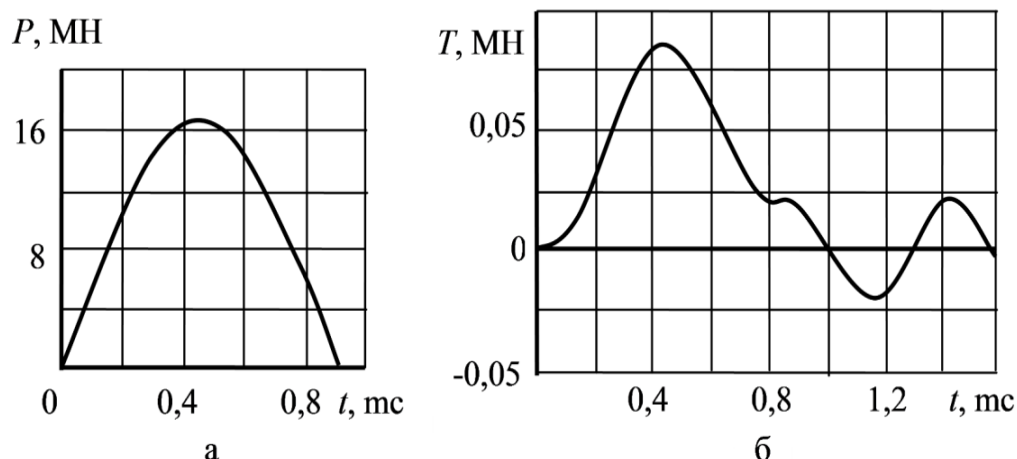


Рис. 2. Диаграммы зависимости от времени усилий в контакте бойка с наковальней (а) и в опоре коромысла (б)

Из рис. 4а видно, что при увеличении приведенного коэффициента жесткости опоры до 10^9 Н/м максимальные усилия в опоре возрастают. Затем при изменении c_0 до $8 \cdot 10^9$ уменьшаются и с дальнейшим увеличением коэффициента жесткости практически не меняются, отличаясь от усилий, возникающих в жесткой опоре, на 3 - 5%.

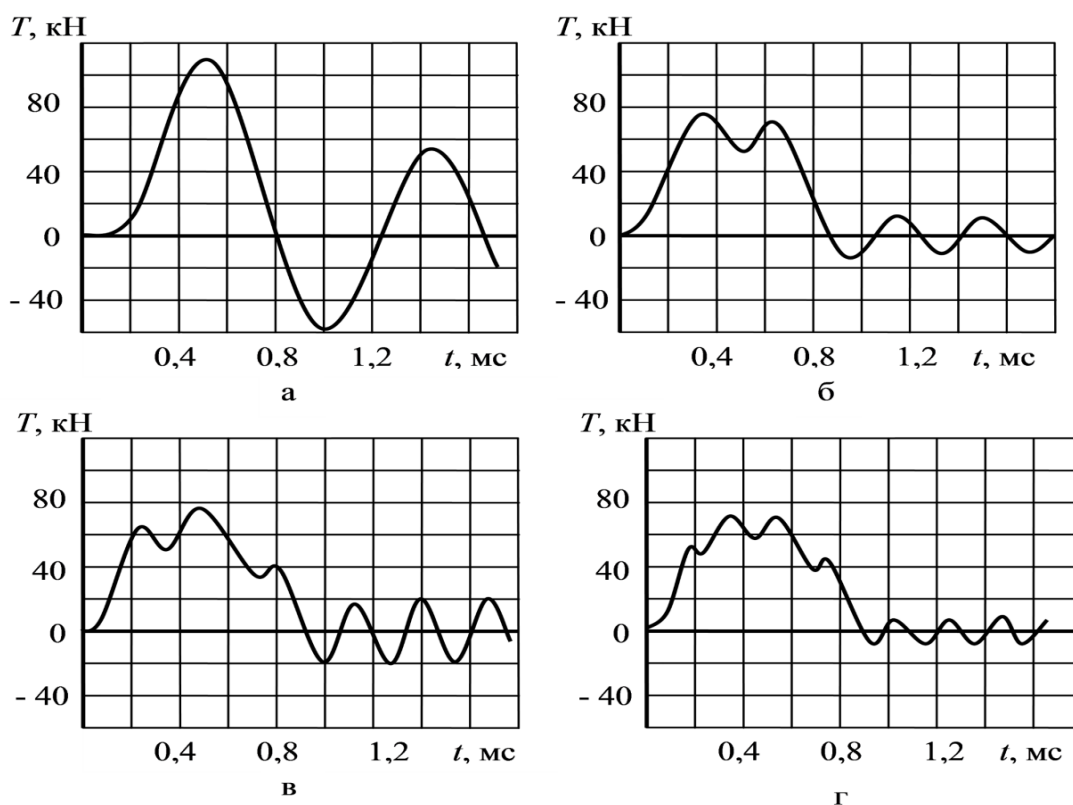


Рис. 3. Диаграммы изменения усилий в опоре от времени при различном коэффициенте жесткости опоры c_0 равном:
а - $20 \cdot 10^8$ Н/м, б - $80 \cdot 10^8$ Н/м, в - $140 \cdot 10^8$ Н/м, г - $280 \cdot 10^8$ Н/м,

Такой характер изменения усилий объясняется тем, что они определяются суммой двух гармоник (5), одна из которых имеет частоту k_1 , равную собственной частоте колебаний опоры, а вторая - частоту k_2 , равную частоте ударного импульса.

С изменением коэффициента жесткости опоры период гармоник с частотой k_1 меняется. Эта гармоника, налагаясь на вторую гармонику с неизменной частотой, приводит к повышению амплитуды усилий при малой жесткости опоры. Это хорошо видно на рис. 3.

С увеличением жесткости опоры форма импульса сил в опоре (рис. 3г) приближается к форме импульса сил в контакте бойка с наковальней (рис. 2а), но амплитуда импульса сил $T(t)$ при этом меньше амплитуды импульса сил $P(t)$ в α_1 раз.

На рис. 4а видно, что, увеличивая жесткость опоры коромысла в два раза по сравнению с существующей, можно добиться снижения усилий в ней на 25 – 30%.

По данным работы [3] можно принять, что коэффициент жесткости роликовых подшипников в диапазоне изменения внутреннего диаметра подшипника от 40 до 100 мм линейно зависит от этого диаметра.

При этом коэффициент жесткости одного подшипника определяется по формулам:

$$c_{2200} = 200 \cdot 10^8 d, \quad c_{2300} = 225 \cdot 10^8 d,$$

$$c_{2400} = 270 \cdot 10^8 d, \quad c_{2300} = 340 \cdot 10^8 d,$$

где d – внутренний диаметр подшипника в м. Индекс в обозначении коэффициента жесткости показывает тип подшипника. Пользуясь приведенными формулами можно подобрать оптимальное количество и тип подшипников опоры.

В случае, если используются шариковые подшипники, то для выбора их типа можно обратиться к работе [3], где приведены коэффициенты жесткости для шариковых подшипников.

На рис. 4б приведён график зависимости максимальных усилий в опоре от номера швеллера балки коромысла. Из этого графика следует, что для снижения усилий в опоре необходимо использовать для коромысла швеллер № 24 вместо швеллера № 27.

Однако при этом возрастут напряжения в самом швеллере, что необходимо учитывать при выборе его параметров.

Графики на рис. 4в и г отражают зависимость максимальных усилий в опоре и в контакте бойка с наковальней от момента инерции коромысла с бойком при неизменной энергии удара.

Они показывают, что увеличение момента инерции коромысла оказывает существенное влияние на усилия в опоре коромысла и практически не влияет на усилия в контакте бойка с наковальней.

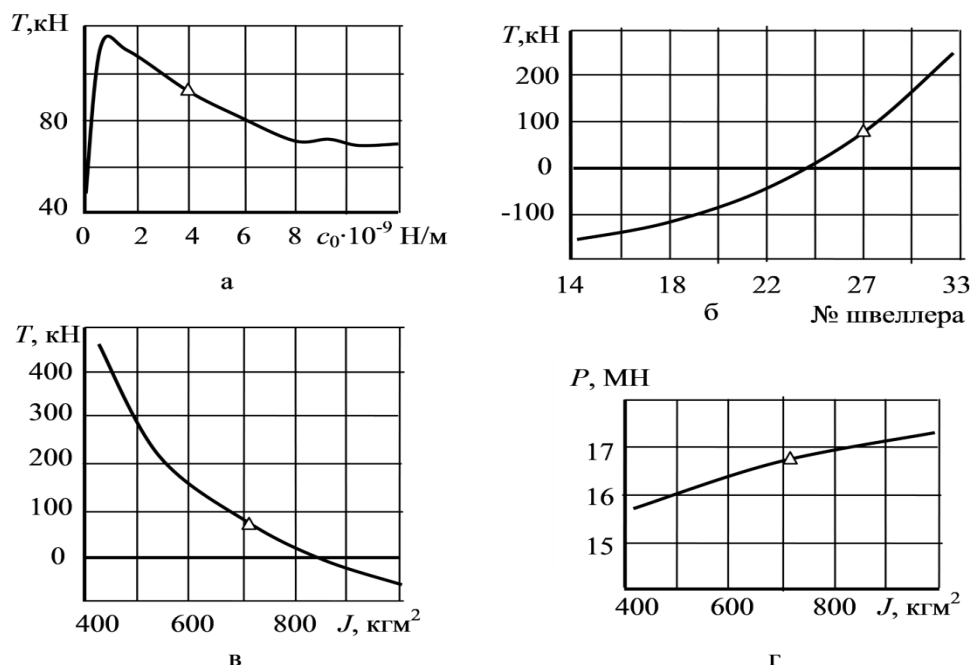


Рис. 4. Диаграммы зависимости усилий в опоре коромысла от её жесткости (а), номера швеллера балки коромысла (б) и момента инерции коромысла с бойком (в). г – диаграмма зависимости усилий в контакте бойка с наковальной от момента инерции коромысла.

С увеличением момента инерции вдвое усилия, действующие на наковальню, возрастают всего на 6 – 8%. С точки зрения снижения усилий в опоре целесообразно увеличить момент инерции коромысла с бойком на 20% по сравнению с существующим.

Таким образом, проведенные исследования выявили три пути снижения усилий в опоре коромысла. Это увеличение жесткости опоры, переход на швеллер с меньшим поперечным сечением и увеличение момента инерции коромысла, что целесообразно делать за счет массы бойка. При этом реализация второго пути возможна только после проведения исследований напряженного состояния балки коромысла, поскольку уменьшение сечения швеллера приведет к повышению напряжений в нем.

Использованная литература

1. Зиялиев К.Ж. Кинематический и динамический анализ шарнирно-четырёхзвенных механизмов переменной структуры с созданием машин высокой мощности. – Бишкек: Илим, 2005. – 196 с.
2. Еремьянц В.Э. Динамика ударных систем. Учебное пособие в 2-х частях. Часть 1. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2011. – 324 с.
3. Еремьянц В.Э. Влияние типа подшипника качения на коэффициент его жесткости //Вестник КРСУ, № 11, 2011. – Бишкек: Изд-во КРСУ. – С. 94 -100.