

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ

УДК 621.74.047

АНАЛИЗ РАБОТЫ МЕХАНИЗМА КАЧАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ С ПРИМЕНЕНИЕМ УПРУГИХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СОЧЛЕНЕНИЯХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАР

А. Г. Никитин, В. Н. Бережанский

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Рассмотрено влияние различных факторов на качество продукции металлургического производства. Показано, что надежность технологических машин и агрегатов определяется точностью операций, которые осуществляются в процессе работы всех узлов, и зависит от совокупности их параметров. От точности работы технологических машин и от жесткости конструкции машины в целом зависит качество выпускаемой продукции. Показано, чем больше жесткость конструкции машины, тем выше точность выполнения технологической операции и, соответственно, выше качество выпускаемой продукции. Проанализировано влияние зазоров в шарнирах кинематических пар кривошипных машин на возникновение динамических нагрузок, ведущих к быстрому выходу из строя вкладышей подшипников скольжения. Отрицательное влияние зазоров в кинематических парах на надежность технологических машин и точность выполняемых операций вызывает необходимость разработки конструктивных мероприятий для создания беззазорного соединения элементов кинематических пар. Исследования показали, что необходимый эффект можно получить путем применения малогабаритных упругих пневматических элементов, встраиваемых в кинематическую пару. Постоянно воздействуя на подвижный корпус с закрепленным на нем антифрикционным вкладышем, упругий элемент «выбирает» зазор между цапфой и вкладышем. Описана конструкция упругого пневматического устройства для выборки зазоров в подшипниках скольжения при работе механизма качания кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок. Экспериментально доказано снижение уровня вибрации за счет устранения зазоров.

Ключевые слова: технологические машины, качество, надежность, точность, динамическая сила, зазор, упругий пневматический элемент

Для цитирования. Никитин А.Г., Бережанский В.Н. Анализ работы механизма качания кристаллизатора МНЛЗ с применением упругих пневматических элементов в сочленениях кинематических пар // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2021. № 4 (38). С. 17–22.

ANALYSIS OF OPERATION OF THE CCM CRYSTALLIZER ROLLING MECHANISM WITH APPLICATION OF ELASTIC PNEUMATIC ELEMENTS IN JOINTS OF KINEMATIC PAIRS

A. G. Nikitin, V. N. Berezhanskii

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. Influence of various factors on quality of metallurgical products is considered. It is shown that quality of technological machines and aggregates, determined by their reliability and accuracy of operations performed during the operation of technological machines, depends on complex of their parameters. Relationship between the quality of technological machines and quality of manufactured products, characterized by accuracy of manufactured products, is determined. This relationship between the indicators of accuracy of manufactured products and quality of technological machine, in this case, depends on rigidity of machine design as a whole. This is due to the fact that the greater the rigidity of machine design, which also determines reliability of the machine, the higher is accuracy of technological operation and, accordingly, the higher is quality of the products. The influence of clearances in joints of kinematic pairs of crank machines on occurrence of dynamic loads

leading to rapid failure of the sliding bearing liners is analyzed. Negative influence of clearances in kinematic pairs on reliability of technological machines and the accuracy of operations performed makes it necessary to develop constructive measures to create a gap-free connection of elements of kinematic pairs. Studies have shown that necessary effect can be obtained by using small-sized elastic pneumatic elements embedded in a kinematic pair. Constantly acting on the movable framework with an anti-friction liner attached to it, the elastic element selects clearance between the trunnion and the liner. The design of an elastic pneumatic device for sampling clearances in sliding bearings during operation of the rolling mechanism of the mold is described and reduction of the vibration level due to elimination of clearances is experimentally proved.

Keywords: technological machines, quality, reliability, accuracy, dynamic force, clearance, elastic pneumatic element

For citation: Nikitin A.G., Berezhanskii V.N. Analysis of operation of the CCM crystallizer roll-ing mechanism with application of elastic pneumatic elements in joints of kinematic pairs. *Bulletin of SibSIU*. 2021, no. 4 (38), pp. 17–22. (In Russ.).

Надежность технологических машин является основным фактором технического развития промышленности, направленным на повышение производительности и качества выпускаемой продукции.

Проблема улучшения качества продукции металлургического производства является задачей, связанной с выполнением противоречивых требований, обусловленных технологическим процессом получения продукции. Эта задача, чаще всего, является многокритериальной, что осложняет выбор параметра оптимизации. В связи с этим требуется дальнейшее развитие теоретических основ и положений о прикладном применении напряженно-деформированного состояния конструкций машин в целом и их элементов с учетом реальных условий, в которых производится продукция и эксплуатируется машина.

Генеральным направлением развития металлургического производства является разработка принципиально новых технологических процессов получения различных продуктов, осуществляемых инновационными технологическими машинами и агрегатами, а также модернизацией существующих процессов и машин.

Качество технологических машин и агрегатов, определяемых их надежностью и точностью выполняемых операций, зависит от совокупности параметров, которые задаются в процессе их проектирования на основании научных исследований, технологических и конструкторских разработок. В свою очередь, сами технологические машины и агрегаты являются изделиями, качество работы которых определяется в процессе их эксплуатации [1].

Показатели качества как машин, так и производимой ими продукции должны иметь постоянное значение в течение всего наперед заданного периода времени.

Показатели качества непосредственно технологических машин можно разделить на две взаимосвязанные группы.

Показатели, относящиеся к первой группе, определяют точность выпускаемой продукции и постоянство этого показателя в течение всего наперед заданного периода времени. Показатель точности выпускаемой продукции зависит как от используемого в производстве технологического процесса, так и от качества используемых средств производства. Связь между показателями точности выпускаемой продукции и качества технологической машины зависит от жесткости конструкции машины в целом. Это вызвано тем обстоятельством, что чем больше жесткость конструкции машины, которая определяет также ее надежность, тем выше точность выполнения технологической операции и, соответственно, выше качество выпускаемой продукции.

Однако необоснованное увеличение жесткости машины ведет не только к повышению точности выпускаемой продукции и уменьшению потерь энергии, расходуемой на развитие упругих деформаций элементов машины, но и к увеличению материалоемкости машины (так как при этом растут размеры элементов конструкции машины), а также динамического воздействия на обрабатываемый материал и окружающую среду (фундамент машины и здание в целом).

Ко второй группе относятся показатели качества оборудования, характеризующие его производительность, надежность и долговечность, энергоемкость и материалоемкость.

Металлургические машины относятся к технологическому оборудованию, возможность повышения производительности которых практически не ограничена. Эта возможность не означает, что показатель производительности определяется максимально достигаемой скоростью движений рабочих инструментов металлургической машины и, следовательно, минимальным временем обработки материала.

Факторами, ограничивающими производительность, являются показатели надежности и долговечности машин, которые должны иметь

постоянное значение в течение всего наперед заданного периода времени, с экономической оценкой затрат на изготовление, эксплуатацию и обслуживание машин. Таким образом, производительность технологической (металлургической) машины должна определяться количеством выпускаемой продукции в единицу времени, отнесенным к материальным затратам на получение этого количества выпускаемой продукции.

Показатель энергоемкости технологических машин зависит от частоты циклов ее работы при совершении операций, определяющих скорость перемещения инструмента, которая, в свою очередь, влияет на упругие свойства конструктивных элементов машины.

Упругие деформации механической системы машины являются не только источником динамического воздействия. Они влияют на непроизводительный расход энергии во время выполнения технологической операции: чем больше скорость перемещения инструмента, тем больше потери энергии.

Материалоемкость является показателем качества технологической машины. Факторами, влияющими на этот показатель, являются стоимость и масса машины. Масса напрямую воздействует на точность выпускаемой продукции. Жесткость и несущая способность машины через параметры виброустойчивости и виброактивности влияют на надежность работы машины, а, следовательно, и на ее производительность.

Одним из основных показателей качества металлургических машин, характеризующих их технический уровень и конкурентоспособность, является надежность в условиях эксплуатации, которая количественно оценивается отсутствием отказов в процессе работы. Очевидно, что чем меньше продолжительность простоев машины на устранение ее отказа, тем выше производительность машины.

Среди многочисленных технических причин относительно кратковременных, но достаточно частых простоев в условиях эксплуатации рычажных механизмов привода качания кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) значительное место занимают простои, связанные с заменой вкладышей подшипников скольжения из-за их износа. Быстрый износ вкладышей является результатом не только контактного трения между цапфами и вкладышами подшипников скольжения, но и действия динамических сил, также являющихся источником вибраций машины [2 – 5].

Шарниры рычажных механизмов имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что палец в обойме находится с зазором, что обуславливает соударение элементов шарнира во время их относительного движения в зазоре при изменении направления движения ведущего звена (перебег зазора) во время работы механизма. Это приводит к повышенному износу элементов шарнира, а также возникновению дополнительных динамических сил, достигающих значительной величины и снижающих надежность машины в целом.

Износ элементов кинематических пар, образующих шарнир, приводит к нарушению точности хода исполнительного механизма, что снижает качество выпускаемого продукта.

В процессе литья стали на МНЛЗ корочка затвердевающего в кристаллизаторе слитка при определенных условиях может прилипнуть к стенкам кристаллизатора. Разрыв корочки приводит к вытеканию жидкой стали из сердцевины слитка, что ведет к аварийной остановке и ремонту машины, а также к уменьшению надежности машины в целом. Для предупреждения прилипания корочки необходимо создать в ней знакопеременные напряжения, то есть кристаллизатор в процессе работы должен совершать возвратно-поступательные движения. Для уменьшения силы ударов в шарнирах кинематической цепи рычажного механизма качания кристаллизатора при знакопеременных нагрузках и более точного выдерживания задаваемого закона движения необходимо уменьшать величину зазоров в сочленениях кинематических пар (рис. 1) [6].

На узлы и детали рычажного механизма качания кристаллизатора в процессе эксплуатации действуют динамические силы, которые вызываются действием ударных нагрузок. Они возникают при сбросе нагрузки, когда с предварительно упругодеформированной механической системы снимают вынуждающую (технологическую) силу при движении кристаллизатора вниз, так как под действием силы технологического сопротивления при движении кристаллизатора вверх цапфа прижата к поверхности вкладыша подшипника. Цапфа перемещается в противоположную сторону от направления действия силы технологического сопротивления на величину зазора, ударяясь о вкладыш [7]. При этом происходит перебег зазора с последующими затухающими по силе за счет демпфирования отскоками. Возникающая динамическая (ударная) сила приводит к возбуждению упругих колебаний (в дальнейшем – вибраций) механической системы (подшипников, корпуса кристаллизатора и т.д.).

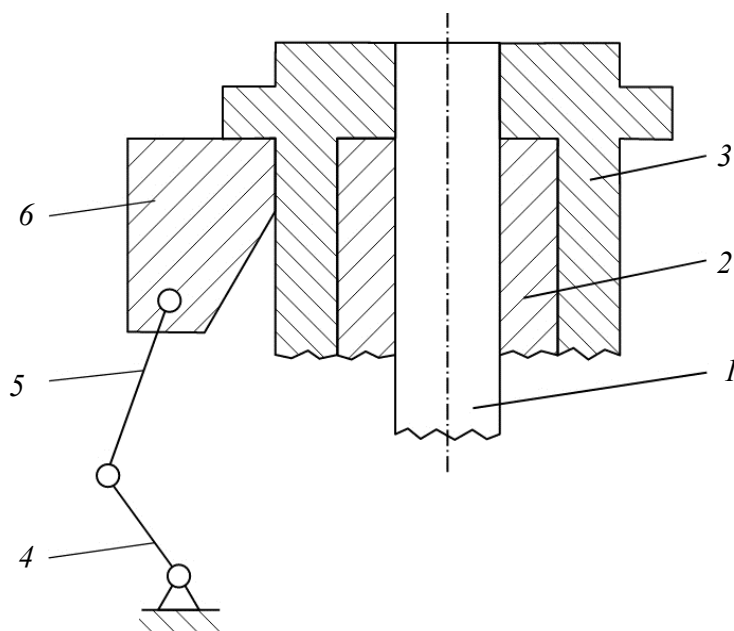


Рис. 1. Кинематическая схема механизма качания кристаллизатора:

1 – слиток; 2 – медный водоохлаждаемый вкладыш; 3 – корпус кристаллизатора; 4 – кривошип; 5 – шатун; 6 – ползун

Fig. 1. Kinematic scheme of the mold swing mechanism:

1 – ingot; 2 – copper water-cooled insert; 3 – crystallizer body; 4 – crank; 5 – connecting rod; 6 – slider

Зазоры в кинематических парах, наличие которых обязательно для обеспечения подвижности звеньев, с увеличением продолжительности эксплуатации машины постепенно увеличиваются, что приводит к уменьшению точности (прямолинейности) движения кристаллизатора, а также увеличению дополнительных динамических сил.

Таким образом, надежность работы машины во многом зависит от создания условий, обеспечивающих беззазорный контакт сопряженных звеньев. На практике эту задачу традиционно решают применением конических сопряженных поверхностей [8] (что вызывает сложности при их изготовлении) или систем с пружинным поджатием полуштуков подшипников скольжения [9]. Стальные пружины обладают малой демпфирующей способностью, их параметры изменяются с течением времени, что требует постоянного контроля за их состоянием. Пружинные элементы невозможно создать автоматические или автоматизированные системы управления устройствами для выборки зазоров. Выше изложенное обуславливает необходимость разработки конструктивных мероприятий для создания беззазорного соединения элементов кинематических пар.

Исследования [10] показали, что необходимый эффект можно получить путем применения малогабаритных упругих пневматических элементов (рис. 2), встраиваемых в кинематическую пару.

Постоянно воздействуя на подвижный корпус с закрепленным на нем антифрикционным вкладышем, упругий элемент выбирает зазор между цапфой и вкладышем. Устанавливается он со стороны, противоположной действию силы технологического сопротивления на подшипник, что способствует не только выбору зазора в сочленении, но и обеспечивает компенсацию износа вкладыша. Избыточное давление внутри упругого элемента задается такой величины, чтобы в результате перемещения цапфы после изменения направления движения кристаллизатора не происходило раскрытия зазора в сочленении.

Жесткость упругого пневматического элемента, выполненного в виде цилиндра с ограниченной осевой деформацией, определяется соотношением [10]:

$$C = \frac{\pi l p_0}{2},$$

где p_0 – избыточное давление; l – длина цилиндра.

Применение механизмов выборки зазоров в шарнирах (подшипниках скольжения), которые в процессе работы привода качания кристаллизатора обеспечивают постоянный контакт поверхностей подвижных звеньев, позволяет предотвращать перебег зазоров и, следовательно, возникновение дополнительных динамических сил. Экспериментальные исследования [11] показали, что при использовании этого способа

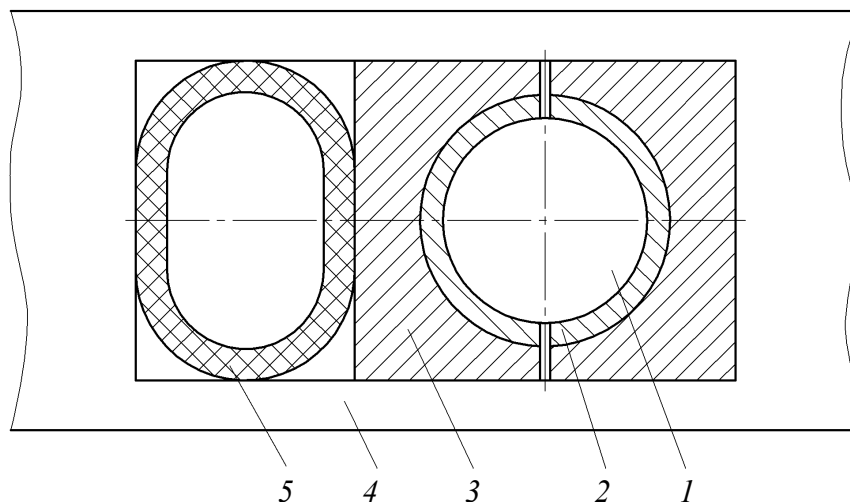


Рис. 2. Схема опоры с упругим пневматическим элементом:
1 – цапфа; 2 – вкладыш; 3 – подвижная полуопора; 4 – станина; 5 – упругий пневматический элемент

Fig. 2. Support diagram with an elastic pneumatic element:
1 – operating pin; 2 – insert; 3 – movable semi-support; 4 – support; 5 – elastic pneumatic element

уменьшается износ элементов кинематических пар, образующих шарнир, значительно снижаются динамические нагрузки и увеличивается межремонтный срок. Таким образом, повышение качества машины улучшает качество продукции и увеличивает ее производительность.

Выводы

Исследовано влияние вибрационного воздействия, возникающего из-за наличия зазоров в подшипниках скольжения, на надежность работы механизма качания кристаллизатора МНЛЗ. Описана конструкция упругого пневматического устройства для выборки зазоров в подшипниках скольжения при работе механизма качания кристаллизатора МНЛЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойцов Б.В., Крайнев Ю.В. Проблемы качества в России // Кузнечно-штамповочное производство. 1997. № 12. С. 2–4.
2. Иванов А.П. Динамика систем с механическими соударениями. М.: Международная программа образования, 1997. 336 с.
3. Brach R.M. Moments between impacting rigid bodies // Trans. ASME. I. Mech. Design. 1981. Vol. 103. No. 10. P. 812–817.
4. Budd C., Dux F. The effect of frequency and clearance variations on single-degree-of-freedom impact oscillator // J. Sound and vibrations. 1995. Vol. 184. No. 3. P. 475–502.
5. Haines R.S. A theory of contact loss at revolute joints with clearance // Journal of Mechanical Engineering Science. 1980. Vol. 22. No. 3. P. 129–136.

6. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 3. / Под ред. А.И. Целикова. М.: Металлургия. 1988. 680 с.
7. Никитин А.Г., Абрамов А.В., Гредина А.А., Горяшин В.В. Анализ работы шарнира кривошип-коренная опора кривошипно-коромыслового механизма щековой дробилки // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 12. С. 875–878.
8. Орлов П.И. Основы конструирования. Т. 1. М.: Машиностроение, 1988. 560 с.
9. Живов Л.И., Колесник Ф.И., Мищанин В.Г., Булат В.И. Влияние зазоров в кривошипно-ползунном механизме на вибрацию и шум гвоздильного автомата // Кузнечно-штамповочное производство. 1974. № 5. С. 29–31.
10. Никитин А.Г., Абрамов А.В., Баженов И.А. Расчет параметров упругого пневматического элемента, выполненного в виде цилиндра с ограниченной радиальной деформацией // Известия вузов. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 8. С. 620–624.
11. Никитин А.Г., Абрамов А.В., Баженов И.А. Экспериментальное исследование щековых дробилок, оснащенных упругими пневматическими элементами в сочленениях кинематических пар // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 2. С. 166–168.

REFERENCES

1. Boitsov B.V., Krainev Yu.V. Quality problems in Russia. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 1997, no. 12, pp. 2–4. (In Russ.).

2. Ivanov A.P. *Dynamics of systems with mechanical collisions*. Moscow: Mezhdunarodnaya programma obrazovaniya, 1997, 336 c. (In Russ.).
3. Brach R.M. Moments between impacting rigid bodies. *Trans. ASME. I. Mech. Design*. 1981, vol. 103, no. 10, pp. 812–817. (In Russ.).
4. Budd C., Dux F. The effect of frequency and clearance variations on single-degree-of-freedom impact oscillator. *J. Sound and vibrations*. 1995, vol. 184, no. 3, pp. 475–502.
5. Haines R.S. A theory of contact loss at revolute joints with clearance. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 1980, vol. 22, no. 3, pp. 129–136.
6. *Machines and units of metallurgical plants*. Vol. 3. A.I. Tselikova red. Moscow: Metallurgiya, 1988, 680 p. (In Russ.).
7. Nikitin A.G., Abramov A.V., Gredina A.A., Garyashin V.V. Analysis of the operation of the crank-main bearing of crank-rocker mechanism of a jaw crusher. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 12, pp. 875–878. (In Russ.).
8. Orlov P.I. Basics of machine design. Vol. 1. Moscow: Mashinostroyeniye, 1988, 560 p. (In Russ.).
9. Zhivov L.I., Kolesnik F.I., Mishchanin V.G., Bulat V.I. Influence of clearances in the crank-slider mechanism on vibration and noise of the nailing machine. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo*. 1974, no. 5, pp. 29–31. (In Russ.).
10. Nikitin A.G., Abramov A.V., Bazhenov I.A. Calculation of the parameters of an elastic pneumatic element made in the form of a cylinder with limited radial deformation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 8, pp. 620–624. (In Russ.).

11. Nikitin A.G., Abramov A.V., Bazhenov I.A. Experimental study of the jaw crushers equipped with elastic pneumatic elements in joints of kinematic pairs. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 2, pp. 166–168. (In Russ.).

Сведения об авторах

Александр Григорьевич Никитин, д.т.н., профессор кафедры «Механика и машиностроение», Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0001-9198-6386

E-mail: nikitin1601@yandex.ru

Владимир Николаевич Бережанский, магистрант кафедры «Механика и машиностроение», Сибирский государственный индустриальный университет

Information about the authors

Aleksandr G. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Machinery and Technological Equipment, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0001-9198-6386

E-mail: nikitin1601@yandex.ru

Vladimir N. Berezhanskii, Master's student of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University

© 2021 г. А.Г. Никитин, В.Н. Бережанский
Поступила в редакцию 07.10.2021 г.