УДК 621.01

Л.Т. Дворников, А.В. Тутынин

Сибирский государственный индустриальный университет

К ИССЛЕДОВАНИЮ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ РОЛИКОВОГО КАНТОВАТЕЛЯ ПРОКАТНОГО СТАНА

Аннотация. Представлены результаты кинематического исследования механизма роликового кантователя прокатного стана в режиме кантовки заготовки с использованием графоаналитического метода. Предлагается более совершенная конструкция электромеханического кантователя.

Ключевые слова: роликовый кантователь, прокатный стан, гидроцилиндр, электромеханический кантователь, кинематическое исследование.

THE STUDY AND THE IMPROVEMENT OF A ROLLER-TYPE TURNOVER DEVICE OF A ROLLING MILL

Abstract. In the article the results of a kinematic research of the roller-type turnover device of a rolling mill mechanism in the canting mode of a workpiece with the use of a graphic-analytical method are presented. A more perfect construction of the electromechanical canting device is offered.

Keywords: roller-type turnover device, the rolling mill, hydraulic actuator, electromechanical canting device, kinematic research.

В металлургическом производстве широко применяют так называемые кантователи, с помощью которых производится поворот (кантовка) заготовок. В частности, для кантовки проката в заготовочных и сортовых клетях нашли применение роликовые кантователи [1]. Работает кантователь от двух независимых приводов – линейных гидроцилиндров, которые штоками поршней воздействуют на рычаги кантующего и прижимного роликов. Схема такого кантователя в одном из режимов работы приведена на рис. 1.

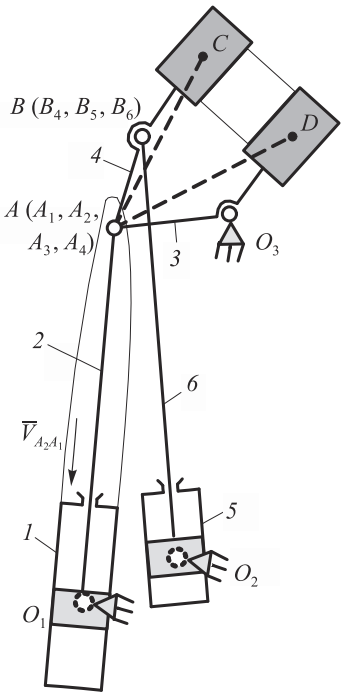

Рис. 1. Схема механизма роликового кантователя прокатного стана в режиме кантовки заготовки

Покажем структурные особенности рассматриваемого кантователя. Он состоит из шести подвижных звеньев ($n = 6$): гидроцилиндров *1* и *5*, штоков *2* и *6*, шатуна *4*, выполненного за одно целое с роликом *C*, и коромысла *3*, выполненного за одно целое с роликом *D*.

Звенья соединены между собой в восемь кинематических пар пятого класса ($p_5 = 8$): $O_1 - 1$, $1 - 2$, $O_2 - 5$, $5 - 6$, $2 - 3$, $2 - 4$, $6 - 4$, $3 - O_3$. Пары *1 – 2* и *5 – 6* выполнены поступательными, а в узле *A* установлены два шарнира.

Степень подвижности роликового кантователя определим, используя формулу П.Л. Чебышева $W = 3n - 2p_5$, где n – число подвижных звеньев; p_5 – число кинематических пар пятого класса.

Рассмотренная система при $n = 6$ и $p_5 = 8$ дает подвижность $W = 2$. Эти независимые движения задаются ползунами *2* и *6*.

Перейдем к кинематическому исследованию роликового кантователя. При кантовке заготовки движение задается подачей рабочей жидкости в штоковую полость гидроцилиндра *1 – 2*. При этом поршень *2*, перемещаясь, заставляет коромысло *3* и шатун *4* поворачиваться относительно точки O_3. Поскольку рабочая жидкость в гидроцилиндр *5 – 6* не подается, звенья *5* и *6* не имеют относительного движения. При подаче жидкости в объеме q в единицу времени появляется относительная скорость $\overline{V}_{A_1A_2}$.

В точке *A* выделим четыре точки: A_1, A_2, A_3 и A_4. Точка A_1, принадлежащая гидроцилиндру *1*, совершает поворот относительно точки O_1 со скоростью $\overline{V}_{A_1O_1}$, направленной перпендикулярно O_1A.

Скорость $\overline{V}_{A_2O_3}$ точки A_2, принадлежащей штоку поршня *2*, определится формулой $\overline{V}_{A_2O_3} = \overline{V}_{A_1O_1} + \overline{V}_{A_2A_1}$.

Отметим, что $\overline{V}_{A_2O_3} \perp O_3A$ и $\overline{V}_{A_2O_3} = \overline{V}_{A_3O_3} = \overline{V}_{A_4O_3}$.

Из полюса p плана скоростей (рис. 2) отложим штрихами вектор скорости $\overline{V}_{A_2A_1}$ в выбранном масштабе $\mu_v = \dfrac{V_{A_2A_1}}{pa_2'}$ и из его конца проведем линию, параллельную направлению скорости $\overline{V}_{A_1O_1}$, т.е. перпендикулярно O_1A. Направив далее из полюса p линию, перпендикулярную O_3A, найдем ее пересечение с прямой, перпендикулярной O_1A. Точка их пересечения определит скорости $\overline{V}_{A_2O_3}, \overline{V}_{A_3O_3}, \overline{V}_{A_4O_3}$.

Далее определим скорость $\overline{V}_{B_6O_3}$ точки B_6, равную скорости $\overline{V}_{B_6A_4}$ точки B_4. Эта скорость направлена перпендикулярно O_2B и определится из выражений $\overline{V}_{B_6O_3} = \overline{V}_{A_4} + \overline{V}_{B_6A_4}$; $\overline{V}_{B_6O_3} = \overline{V}_{B_5O_2} + \overline{V}_{B_6B_5}$, причем, $\overline{V}_{B_6O_3} \perp O_3B, \overline{V}_{A_4} \perp O_3A, \overline{V}_{B_6A_4} \perp AB$.

Скорость $\overline{V}_{B_6A_5}$ не является заданной, а возникает в процессе движения кантователя. Скорость $\overline{V}_D$ точки D определится по формуле $o_3d = \dfrac{O_3Do_3a_3}{O_3A}$.

Скорость $\overline{V}_C$ точки C определится при пересечении скорости $\overline{V}_{CA_4}$ и дуги радиусом a_3d.

Угловые скорости звеньев *2*, *3*, *4* и *5* определятся из формул $\omega_2 = \dfrac{V_{A_1O_1}}{l_{O_1A}} = \dfrac{\overline{o_1a_1}\mu_v}{l_{O_1A}}$; $\omega_3 = \omega_4 = \dfrac{V_{B_6A}}{l_{AB}} = \dfrac{\overline{a_4b_6}\mu_v}{l_{AB}}$; $\omega_5 = \dfrac{V_{B_5O_2}}{l_{O_2B}} = \dfrac{\overline{o_2b_5}\mu_v}{l_{O_2B}}$.

Далее обратимся к ускорениям точек и звеньев кантователя. Ускорение $\overline{a}_{A_1O_1}$ точки A_1 относительно точки O_1 определится выражением $\overline{a}_{A_1O_1} = \overline{a}^n_{A_1O_1} + \overline{a}^\tau_{A_1O_1}$, где $\overline{a}^n_{A_1O_1} = \omega_2^2 l_{O_1A}$ – нормальное ускорение точки A_1 относительно точки O_1, направленное к точке O_1; $\overline{a}^\tau_{A_1O_1}$ – тангенциальное ускорение точки A_1 относительно точки O_1, направленное перпендикулярно O_1A.

Так как движение точки A_2 относительно точки A_1 поступательное, то ускорение $\overline{a}_{A_2O_3}$ точки A_2, равное ускорениям $\overline{a}_{A_3O_3}$ и $\overline{a}_{A_4O_3}$ точек A_3 и A_4, относительно точки O_3 определится выражением

$$\overline{a}_{A_2O_3} = \overline{a}_{A_1O_1} + \overline{a}^k_{A_2A_1} + \overline{a}^r_{A_2A_1},$$

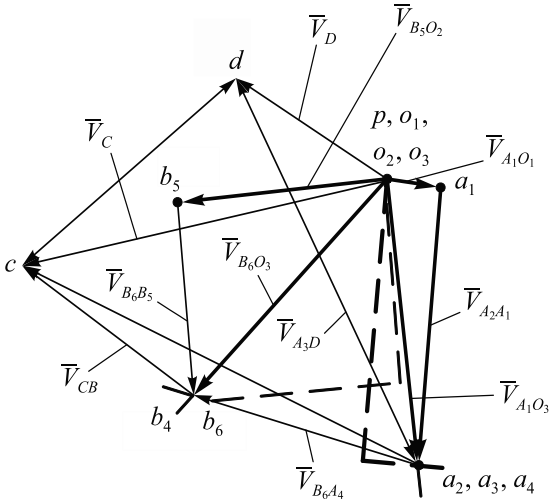

Рис. 2. План скоростей кантователя в режиме кантовки заготовки

где $\overline{a}^k_{A_2A_1} = 2\omega_2\overline{V}_{A_2A_1}$ – есть кориолисово ускорение точки A_2 относительно точки A_1 и его направление определяется путем поворота скорости $\overline{V}_{A_2A_1}$ на 90° в сторону вращения звеньев *1* и *2*; $\overline{a}^r_{A_2A_1}$ – релятивное ускорение точки A_2 относительно точки A_1, параллельное линии O_1A.

Поскольку скорость $\overline{V}_{A_2A_1}$ постоянна во времени, то ускорение $\overline{a}^r_{A_2A_1}$ равно нулю. С другой стороны, ускорение $\overline{a}_{A_2O_3}$ можно определить как

$$\overline{a}_{A_2O_3} = \overline{a}^n_{A_2O_3} + \overline{a}^\tau_{A_2O_3},$$

где $\overline{a}^n_{A_1O_1} = \omega_2^2 l_{O_1A}$ – нормальное ускорение точки A_2 относительно точки O_3, направленное к этой точке; $\overline{a}^\tau_{A_2O_3}$ – тангенциальное ускорение точки A_2 относительно точки O_3, направленное перпендикулярно линии O_3A.

Таким образом, для определения ускорения $\overline{a}_{A_2O_3}$ получим систему уравнений

$$\begin{cases} \overline{a}_{A_2O_3} = \overline{a}^n_{A_1O_1} + \overline{a}^\tau_{A_1O_1} + \overline{a}^k_{A_2A_1}; \\ \overline{a}_{A_2O_3} = \overline{a}^n_{A_2O_3} + \overline{a}^\tau_{A_2O_3}. \end{cases} \quad (1)$$

Учтем, что кориолисово ускорение $\overline{a}^k_{A_2A_1}$ совпадает по направлению с ускорением $\overline{a}^\tau_{A_2O_3}$.

Ускорение $\overline{a}_{B_5O_2}$ точки B_5 находится из соотношения

$$\overline{a}_{B_5O_2} = \overline{a}^n_{B_5O_2} + \overline{a}^\tau_{B_5O_2},$$

в котором $\overline{a}^n_{B_5O_2} = \omega_5^2 l_{O_2B}$ – нормальное ускорение точки B_5 относительно точки O_2, направленное к этой точке; $\overline{a}^\tau_{B_5O_2}$ – тангенциальное ускорение точки B_5 относительно точки O_2, направленное перпендикулярно O_2B.

Ускорение $\overline{a}_{B_6O_3}$ точки B_6, равное ускорению $\overline{a}_{B_4O_3}$ точки B_4, определится относительно точки A как

$$\overline{a}_{B_6O_3} = \overline{a}_{A_4} + \overline{a}^n_{B_6A_4} + \overline{a}^\tau_{B_6A_4}, \quad (2)$$

где $\overline{a}^n_{B_6A_4} = \omega_4^2 l_{AB}$ – нормальное ускорение точки B_6 относительно точки A_4, направленное параллельно AB; $\overline{a}^\tau_{B_6A_4}$ – тангенциальное ускорение точки B_6 относительно точки A_4, направленное перпендикулярно AB.

С другой стороны, ускорение $\overline{a}_{B_6O_3}$ точки B_6 относительно точки O_3 определится как $\overline{a}_{B_6O_3} = \overline{a}^n_{B_6O_3} + \overline{a}^\tau_{B_6O_3}$.

Зная ускорение $\overline{a}_{B_6O_3}$ и учитывая, что $\overline{a}_{B_6O_3} = \overline{a}^n_{B_5O_2} + \overline{a}^\tau_{B_5O_2} + \overline{a}^k_{B_6B_5} + \overline{a}^r_{B_6B_5}$, где $\overline{a}^k_{B_6B_5} = 2\omega_5\overline{V}_{B_6B_5}$ – кориолисово ускорение точки B_6 относительно точки B_5 и его направление определяется путем поворота скорости $\overline{V}_{B_6B_5}$ на угол 90° в сторону вращения звеньев *5* и *6*; $\overline{a}^r_{B_6B_5}$ – релятивное ускорение точки B_6 относительно точки B_5, параллельное O_2B, можно определить $\overline{a}^r_{B_6B_5}$ и $\overline{a}^\tau_{B_5O_2}$.

Покажем план ускорений кантователя в режиме кантовки заготовки (рис. 3). Из полюса π плана откладываем вектор ускорения $\overline{a}^n_{A_1O_1}$ в выбранном масштабе $\mu_a = \dfrac{\overline{a}^n_{A_1O_1}}{\pi n_1}$. Далее из конца этого вектора перпендику-

лярно O_1A отложим вектор ускорения $\overline{a}^k_{A_2A_1}$ и продолжим этот вектор ускорением $\overline{a}^\tau_{A_1O_1}$. Далее, используя второе уравнение системы (1), из полюса π проведем параллельно O_3A вектор ускорения $\overline{a}^n_{A_2O_3}$ и из его конца линию ускорения $\overline{a}^\tau_{A_2O_3}$ перпендикулярно O_3A, которая в пересечении с линией ускорения $\overline{a}^\tau_{A_1O_1}$ определит истинное положение точек A_2, A_3, A_4 на плане. Далее, из полюса π плана ускорений откладываем вектор ускорения $\overline{a}^n_{B_6O_3}$ и из его конца перпендикулярно проведем линию ускорения $\overline{a}^\tau_{B_6O_3}$.

Используя уравнение (2), из точки A_4 отложим вектор ускорения $\overline{a}^n_{B_6A_4}$ и из его конца перпендикулярно прямой AB проведем линию ускорения $\overline{a}^\tau_{B_6A_4}$, которая в пересечении с линией ускорения $\overline{a}^\tau_{B_6O_3}$ определит истинное положение точек B_4, B_6 на плане. Далее из полюса π плана отложим ускорение $\overline{a}^n_{B_5O_2}$ и из его конца перпендикулярно линии O_2B проведем линию ускорения $\overline{a}^\tau_{B_5O_2}$. Из точки B_6 отложим перпендикулярно O_2B вектор ускорения $\overline{a}^k_{B_6B_5}$ и из его конца перпендикулярно проведем линию ускорения $\overline{a}^r_{B_6B_5}$. Точка пересечения этих линий вполне определит ускорения $\overline{a}^r_{B_6B_5}$ и $\overline{a}^\tau_{B_5O_2}$.

Вектора ускорений $\overline{a}_C$ и $\overline{a}_D$ находим аналогично определению скоростей $\overline{V}_C$ и $\overline{V}_D$.

Угловые ускорения звеньев *2*, *3*, *4* и *5* определим из соотношений

$$\varepsilon_2 = \frac{a^\tau_{A_1O_1}}{l_{O_1A}} = \frac{\overline{ka_2\mu_a}}{l_{O_1A}};\ \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \frac{a^\tau_{B_6A_4}}{l_{AB}} = \frac{\overline{mb_6\mu_a}}{l_{AB}};$$

$$\varepsilon_5 = \frac{a^\tau_{B_5O_2}}{l_{O_2B}} = \frac{\overline{pb_5\mu_a}}{l_{O_2B}}.$$

Выполненное исследование позволяет найти все силы и моменты сил инерции в роликовом кантователе и обратиться к задаче его кинетостатического исследования.

По проведенному кинематическому исследованию можно сделать вывод о, в целом, стабильной работе роликового кантователя. Однако, по мнению авторов, конструкция рассматриваемого кантователя может быть усовершенствована. Недостатком ее является использование в качестве приводных штоков поршней гидроцилиндров, что связано с утечками рабочей жидкости через уплотнения и зазоры, ее нагревом при работе, приводящим к уменьшению вязкости рабочей жидкости, увеличению утечек и неравномерному движению штоков поршней, сопровождающемуся рывками.

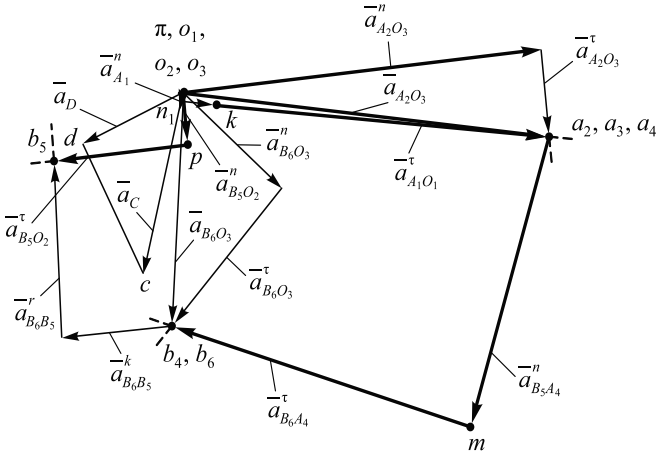

Рис. 3. План ускорений кантователя в режиме кантовки заготовки

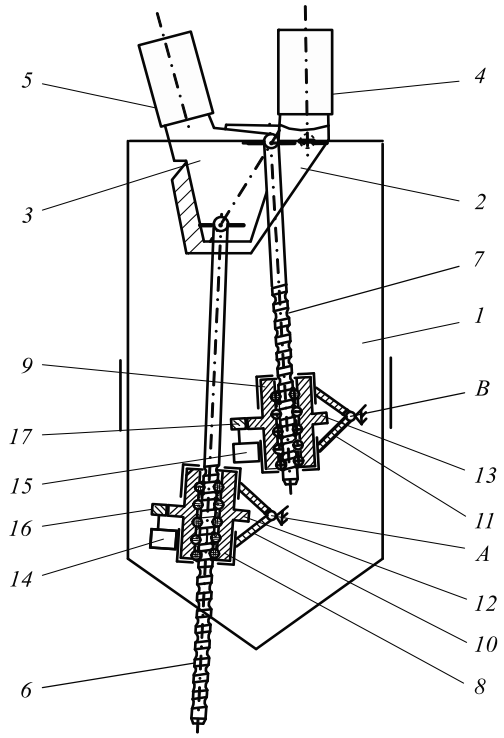

Рис. 4. Электромеханический кантователь прокатного стана: *1* – корпус кантователя; *2* – коромысло; *3* – шатун; *4* – кантующий ролик; *5* – прижимной ролик; *6*, *7* – приводные штоки, выполненные с винтовой нарезкой; *8*, *9* – гайки; *10*, *11* – корпуса гаек; *12*, *13* – зубчатые колеса; *14*, *15* – приводные электродвигатели гаек; *16*, *17* – приводные шестерни; *A* и *B* – шарниры

На основании проведенных кинематических расчетов предлагается усовершенствованная конструкция электромеханического кантователя прокатного стана [2], в котором вместо гидроцилиндров используется шариковинтовое соединение (рис. 4).

Выводы. Предлагаемые конструктивные особенности позволяют повысить КПД кантователя, обеспечить его высокую нагрузочную способность и большую долговечность благодаря использованию шариковинтовых соединений, а также плавное и равномерное движение элементов схвата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Целиков А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов: учебник для вузов. В 3-х т. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката / 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с.
2. Пат. 2484909 РФ, МПК B21B39/24. Электромеханический кантователь прокатного стана / Л.Т. Дворников, А.В. Тутынин. заявл. 08.12.2011; опубл. 20.06.2013.

© 2013 г. *Л.Т. Дворников, А.В. Тутынин*
Поступила 5 сентября 2013 г.