

Experimental Determination of Conditions for Fluid Friction when Drawing with Wire-Drawing Soap

The method is given for carrying out experiments on wire drawing at different conditions. The main formulas are given to determine thickness of the lubrication layer on the drawn wire on the basis of the received experimental data. The results of the experiments on determination of the lubrication layer thickness are given.

Keywords: drawing, lubrication, assembled drawing die, hydrodynamic friction, fluid friction.

Получено 30.05.14

УДК 621.929.9

М. Г. Яруллин, доктор технических наук, профессор, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ

М. Р. Мингазов, аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ

КИНЕМАТИКА ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧЕК РАБОЧИХ ЗВЕНЬЕВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО 4R-МЕХАНИЗМА КАК АКТИВАТОРА ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ *

Получены и исследованы законы движения и свойства кинематических параметров точек звеньев пространственного 4R-механизма как характерных точек емкости перемешивающего устройства. Приведены уравнения, описывающие перемещение, скорость и ускорение характерных точек механизма. Произведен расчет для конкретного механизма.

Ключевые слова: пространственный 4R-механизм, кинематика механизма, направляющие косинусы, перемешивание, характерные точки.

Перемешивание является распространенным технологическим процессом во многих отраслях промышленности и народного хозяйства (машиностроение, металлообработка, медицина, сельское хозяйство). Поэтому существует большое разнообразие перемешивающего оборудования, где емкость для смесей совершает вращательные движения относительно различных своих геометрических осей – от простых до сложных планетарно-пространственных.

Большой интерес (как с точки зрения науки, так и практики) представляют перемешивающие устройства, способные задавать частицам сложную пространственную траекторию движения с переменными скоростями и ускорениями с целью увеличения однородности и качества перемешивания, как в сухих, так и в жидких средах [1, 2].

Нами разработаны несколько вариантов активаторов перемешивающих устройств, в основе которых лежат пространственные nR -механизмы, позволяющие достигать вышеуказанные эффективные виды движения [3, 4]. Основным составляющим (первичной ячейкой) таких nR -механизмов является пространственный 4R-механизм, впервые упомянутый Беннеттом [5]. Благодаря тому что геометрические оси звеньев механизма скрещиваются в пространстве, при движении рабочий орган механизма (шатуна) описывает сложную пространственную траекторию с переменными скоростями и ускорениями [6–8]. Анализ работы компьютерных моделей механизма показывает, что такая траектория движения рабочего звена способствует качественному перемешиванию

компонентов. Поэтому весьма актуальна задача исследования кинематики данного механизма с привязкой его к перемешивающим устройствам. В нашей работе [9] представлены результаты анализа кинематики ведомого кривошипа. Данная работа является ее продолжением и посвящена анализу кинематики наиболее интересных точек (с точки зрения их расположения на емкости), которые в дальнейшем будем называть характерными точками.

Цель исследований – определить законы движения и свойства кинематических параметров отдельных точек звеньев базового механизма как характерных точек емкости создаваемых перемешивающих устройств.


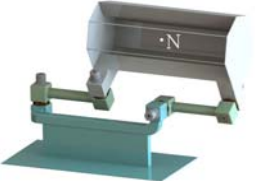

Кинематика характерных точек

Выбор исследуемых точек для анализа обусловлен возможными вариантами расположения перемешивающей емкости на звене 4R-механизма (табл. 1).

В первом варианте механизма (табл. 1) рабочий орган спроектирован в виде емкости-шатуна. Наиболее интересной точкой для исследования (с точки зрения кинематики) в этом случае является точка M – центр масс емкости шатуна. При движении эта точка описывает траекторию, похожую на искаженный эллипс в пространстве (рис. 1).

Во втором механизме (табл. 1) рабочий орган также выполнен в виде емкости-шатуна, но со смещенным центром масс в точке N . А в третьем механизме (табл. 1), емкость установлена на ось шарниров шатуна и кривошипа. В этом случае интерес для исследования кинематики движения представляет точка K – центр масс осевого барабана.

Таблица 1. Расположение исследуемых точек на звене 4R-механизма

Наименование точки	Расположение исследуемой точки
Точка М. Центр масс шатунна-барабана	
Точка N. Центр масс шатунного барабана	
Точка К. Центр масса осевого барабана	

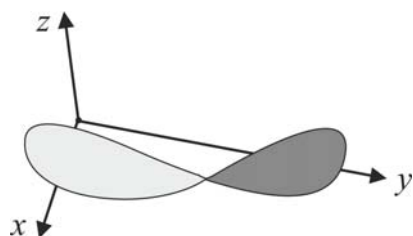


Рис. 1. Траектория движения точки М

Метод нахождения кинематических параметров для точек М, N и К основан на составлении векторных уравнений движения с использованием направляющих косинусов. На рис. 2 представлены замкнутые векторные контуры для составления уравнений движения исследуемых точек.

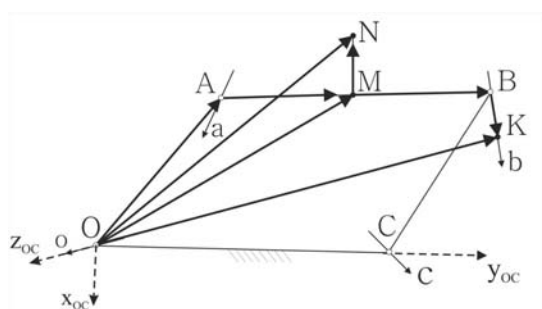


Рис. 2. Векторные контуры для исследования кинематики

Положения точек М, N и К можно определить радиус-векторами \overline{OM} , \overline{ON} и \overline{OK} соответственно:

$$\overline{OM} = \overline{OA} + \overline{AM}; \quad \overline{ON} = \overline{OA} + \overline{AM} + \overline{MN};$$

$$\overline{OK} = \overline{OA} + \overline{AB} + \overline{BK}.$$

Проекции векторов \overline{OM} , \overline{ON} и \overline{OK} на оси X_{Oc} , Y_{Oc} , Z_{Oc} :

$$M : \begin{cases} X_M = OA \cdot K_{X_{Oc}}^{Y_{OA}} + AM \cdot K_{X_{Oc}}^{Y_{AM}}, \\ Y_M = OA \cdot K_{Y_{Oc}}^{Y_{OA}} + AM \cdot K_{Y_{Oc}}^{Y_{AM}}, \\ Z_M = OA \cdot K_{Z_{Oc}}^{Y_{OA}} + AM \cdot K_{Z_{Oc}}^{Y_{AM}}; \end{cases}$$

$$N : \begin{cases} X_N = OA \cdot K_{X_{Oc}}^{Y_{OA}} + AM \cdot K_{X_{Oc}}^{Y_{AM}} + MN \cdot K_{X_{Oc}}^{Y_{MN}}, \\ Y_N = OA \cdot K_{Y_{Oc}}^{Y_{OA}} + AM \cdot K_{Y_{Oc}}^{Y_{AM}} + MN \cdot K_{Y_{Oc}}^{Y_{MN}}, \\ Z_N = OA \cdot K_{Z_{Oc}}^{Y_{OA}} + AM \cdot K_{Z_{Oc}}^{Y_{AM}} + MN \cdot K_{Z_{Oc}}^{Y_{MN}}; \end{cases}$$

$$K : \begin{cases} X_K = OA \cdot K_{X_{Oc}}^{Y_{OA}} + AB \cdot K_{X_{Oc}}^{Y_{AB}} + BK \cdot K_{X_{Oc}}^{Y_{BK}}, \\ Y_K = OA \cdot K_{Y_{Oc}}^{Y_{OA}} + AB \cdot K_{Y_{Oc}}^{Y_{AB}} + BK \cdot K_{Y_{Oc}}^{Y_{BK}}, \\ Z_K = OA \cdot K_{Z_{Oc}}^{Y_{OA}} + AB \cdot K_{Z_{Oc}}^{Y_{AB}} + BK \cdot K_{Z_{Oc}}^{Y_{BK}}. \end{cases}$$

Учитывая направляющие косинусы, получим уравнения перемещений в проекциях на три координатные оси для точек М, N и К:

$$M : \begin{cases} X_M = -l_1 \cdot \sin \varphi + (l_2 / 2) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \varphi - \\ - (l_2 / 2) \cdot \cos \gamma \cdot \sin \varphi, \\ Y_M = l_1 \cdot \cos \varphi + (l_2 / 2) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \varphi + \\ + (l_2 / 2) \cdot \cos \gamma \cdot \cos \varphi, \\ Z_M = -(l_2 / 2) \cdot \sin \gamma \cdot \sin \alpha_1; \end{cases} \quad (1)$$

$$N : \begin{cases} X_N = -l_1 \cdot \sin \varphi + (l_2 / 2) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \varphi - \\ - (l_2 / 2) \cdot \cos \gamma \cdot \sin \varphi - \\ - MN \cdot (\cos \gamma \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \varphi + \sin \gamma \cdot \sin \varphi), \\ Y_N = l_1 \cdot \cos \varphi + (l_2 / 2) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \varphi + \\ + (l_2 / 2) \cdot \cos \gamma \cdot \cos \varphi - \\ - MN \cdot (\cos \gamma \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \varphi - \sin \gamma \cdot \cos \varphi), \\ Z_N = -(l_2 / 2) \cdot \sin \gamma \cdot \sin \alpha_1 + MN \cdot \cos \gamma \cdot \sin \alpha_1; \end{cases} \quad (2)$$

$$K : \begin{cases} X_K = -l_1 \cdot \sin \varphi + l_2 \cdot \sin \gamma \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \varphi - \\ - l_2 \cdot \cos \gamma \cdot \sin \varphi - \\ - BK \cdot (\cos \gamma \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \varphi + \sin \gamma \cdot \sin \varphi), \\ Y_K = l_1 \cdot \cos \varphi + l_2 \cdot \sin \gamma \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \varphi + \\ + l_2 \cdot \cos \gamma \cdot \cos \varphi - \\ - BK \cdot (\cos \gamma \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \varphi - \sin \gamma \cdot \cos \varphi), \\ Z_K = -l_2 \cdot \sin \gamma \cdot \sin \alpha_1 + BK \cdot \cos \gamma \cdot \sin \alpha_1. \end{cases} \quad (3)$$

Полученные уравнения (1)–(3) позволяют описать характер перемещения исследуемых точек в пространстве для любого сочетания структурных параметров базового механизма (l_1 , l_2 , α_1 , α_2), а также положения ведущего кривошипа относительно стойки (угла поворота φ). Данные уравнения являются универсальными для пространственных nR-механизмов.

Дифференцируя полученные выражения, можно найти уравнения для определения скоростей и ускорений характерных точек. Для процесса перемещения особенно важна роль ускорения, поскольку

при перемешивании твердых частиц происходит так называемое инерционное перемешивание. Частицы перемешиваемых компонентов в емкости имеют различные векторы ускорений, как по величине, так и по направлению. Это приводит к возникновению сил инерции $\bar{F}_{ин} = m \cdot \bar{a}$, которые достаточно сильно влияют на процесс перемешивания. Поэтому определение ускорений характерных точек является весьма важным справочным (факторным) материалом.

Итак, уравнения для определения скоростей исследуемых точек имеют окончательный, удобный для инженерных расчетов вид:

$$V_M : \begin{cases} X_M^V = \cos \gamma \cdot \cos \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot A - \\ - \sin \gamma \cdot \sin \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot B - l_1 \cdot w_1 \cdot \cos \varphi, \\ Y_M^V = \cos \gamma \cdot \sin \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot A + \\ + \sin \gamma \cdot \cos \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot B - l_1 \cdot w_1 \cdot \sin \varphi, \\ Z_M^V = -(l_2 / 2) \cdot w_2 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \gamma; \end{cases} \quad (4)$$

$$V_N : \begin{cases} X_N^V = \cos \gamma \cdot \cos \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot A - \\ - \sin \gamma \cdot \sin \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot B - l_1 \cdot w_1 \cdot \cos \varphi + \\ + \sin \gamma \cdot \cos \varphi \cdot MN \cdot A + \cos \gamma \cdot \sin \varphi \cdot MN \cdot B, \\ Y_N^V = \cos \gamma \cdot \sin \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot A + \\ + \sin \gamma \cdot \cos \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot B - l_1 \cdot w_1 \cdot \sin \varphi + \\ + \sin \gamma \cdot \sin \varphi \cdot MN \cdot A - \cos \gamma \cdot \cos \varphi \cdot MN \cdot B, \\ Z_N^V = -(l_2 / 2) \cdot w_2 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \gamma - \\ - MN \cdot w_2 \cdot \sin \gamma \cdot \sin \alpha_1; \end{cases} \quad (5)$$

$$V_K : \begin{cases} X_K^V = \cos \gamma \cdot \cos \varphi \cdot l_2 \cdot A - \sin \gamma \cdot \sin \varphi \cdot l_2 \cdot B - \\ - l_1 \cdot w_1 \cdot \cos \varphi + \sin \gamma \cdot \cos \varphi \cdot BK \cdot A + \\ + \cos \gamma \cdot \sin \varphi \cdot BK \cdot B, \\ Y_K^V = \cos \gamma \cdot \sin \varphi \cdot l_2 \cdot A + \sin \gamma \cdot \cos \varphi \cdot l_2 \cdot B - \\ - l_1 \cdot w_1 \cdot \sin \varphi + \sin \gamma \cdot \sin \varphi \cdot BK \cdot A - \\ - \cos \gamma \cdot \cos \varphi \cdot BK \cdot B, \\ Z_K^V = -l_2 \cdot w_2 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \gamma - \\ - BK \cdot w_2 \cdot \sin \gamma \cdot \sin \alpha_1, \end{cases} \quad (6)$$

где

$$A = \cos \alpha_1 \cdot w_2 - w_1, \quad B = \cos \alpha_1 \cdot w_1 - w_2.$$

Последующим дифференцированием получены уравнения для определения ускорений данных точек:

$$A_M : \begin{cases} X_M^A = -\sin \gamma \cdot \cos \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot C - \\ - \cos \gamma \cdot \sin \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot D + l_1 \cdot w_1^2 \cdot \sin \varphi, \\ Y_M^A = -\sin \gamma \cdot \sin \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot C + \\ + \cos \gamma \cdot \sin \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot D - l_1 \cdot w_1^2 \cdot \cos \varphi, \\ Z_M^A = (l_2 / 2) \cdot w_2^2 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \gamma; \end{cases} \quad (7)$$

$$A_N : \begin{cases} X_N^A = -\sin \gamma \cdot \cos \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot C - \\ - \cos \gamma \cdot \sin \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot D + l_1 \cdot w_1^2 \cdot \sin \varphi + \\ + \cos \gamma \cdot \cos \varphi \cdot MN \cdot C - \sin \gamma \cdot \sin \varphi \cdot MN \cdot D, \\ Y_N^A = -\sin \gamma \cdot \sin \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot C + \\ + \cos \gamma \cdot \sin \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot D - l_1 \cdot w_1^2 \cdot \cos \varphi + \\ + \cos \gamma \cdot \sin \varphi \cdot MN \cdot C + \sin \gamma \cdot \sin \varphi \cdot MN \cdot D, \\ Z_N^A = (l_2 / 2) \cdot w_2^2 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \gamma - \\ - MN \cdot w_2^2 \cdot \cos \gamma \cdot \sin \alpha_1; \end{cases} \quad (8)$$

$$A_K : \begin{cases} X_K^A = -\sin \gamma \cdot \cos \varphi \cdot (l_2 / 2) \cdot C - \\ - \cos \gamma \cdot \sin \varphi \cdot l_2 \cdot D + l_1 \cdot w_1^2 \cdot \sin \varphi + \\ + \cos \gamma \cdot \cos \varphi \cdot BK \cdot C - \sin \gamma \cdot \sin \varphi \cdot BK \cdot D, \\ Y_K^A = -\sin \gamma \cdot \sin \varphi \cdot l_2 \cdot C + \\ + \cos \gamma \cdot \sin \varphi \cdot l_2 \cdot D - l_1 \cdot w_1^2 \cdot \cos \varphi + \\ + \cos \gamma \cdot \sin \varphi \cdot BK \cdot C + \sin \gamma \cdot \sin \varphi \cdot BK \cdot D, \\ Z_K^A = l_2 \cdot w_2^2 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \gamma - BK \cdot w_2^2 \cdot \cos \gamma \cdot \sin \alpha_1, \end{cases} \quad (9)$$

где

$$C = A \cdot w_2 + B \cdot w_1, \quad D = A \cdot w_1 + B \cdot w_2.$$

Результаты

Таким образом, в результате проведенных исследований получены уравнения (1)–(9), описывающие такие кинематические параметры, как перемещение (S), скорость (V) и ускорение (A). Ниже представлены примеры расчетов для варианта базового механизма со структурными параметрами $l_1 = 100$ мм, $l_2 = 200$ мм, $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 90^\circ$.

Анализ обобщенной информации (рис. 3) кинематических свойств характерных точек показывает, что абсолютные значения кинематических параметров увеличиваются от точки M к точке K и достигают максимальных значений: $S_{\max}^K = 323$ мм, $V_{\max}^K = 34$ мм/с, $A_{\max}^K = 10$ мм/с². Также точка K имеет максимальную амплитуду ускорения $A_{\max}^K = 9$ мм/с².

Из графика видно, что характер изменения всех кинематических параметров исследуемых точек трехмерный, синусоидальный и знакопеременный. Траектории, а также годографы скоростей и ускорений этих точек являются деформированными пространственными замкнутыми кривыми сложной формы (эллипсами, восьмерками и т. д.).

Таким образом, проведенные исследования позволяют выдвинуть гипотезу: при расположении рабочей емкости на шатуне механизма интенсивность перемешивания возрастает по мере смещения центра масс емкости от точки M к точке N . Наиболее же интенсивное перемешивание компонентов с точки зрения кинематики предполагается в том случае, если емкость будет установлена на ось шарниров шатуна и ведомого кривошипа с центром масс в точке K .

Таблица 2. Кинематика исследуемых точек

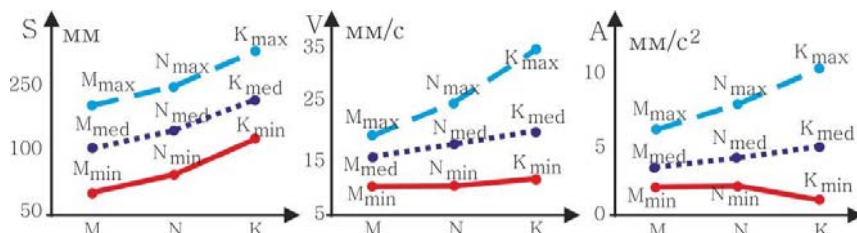
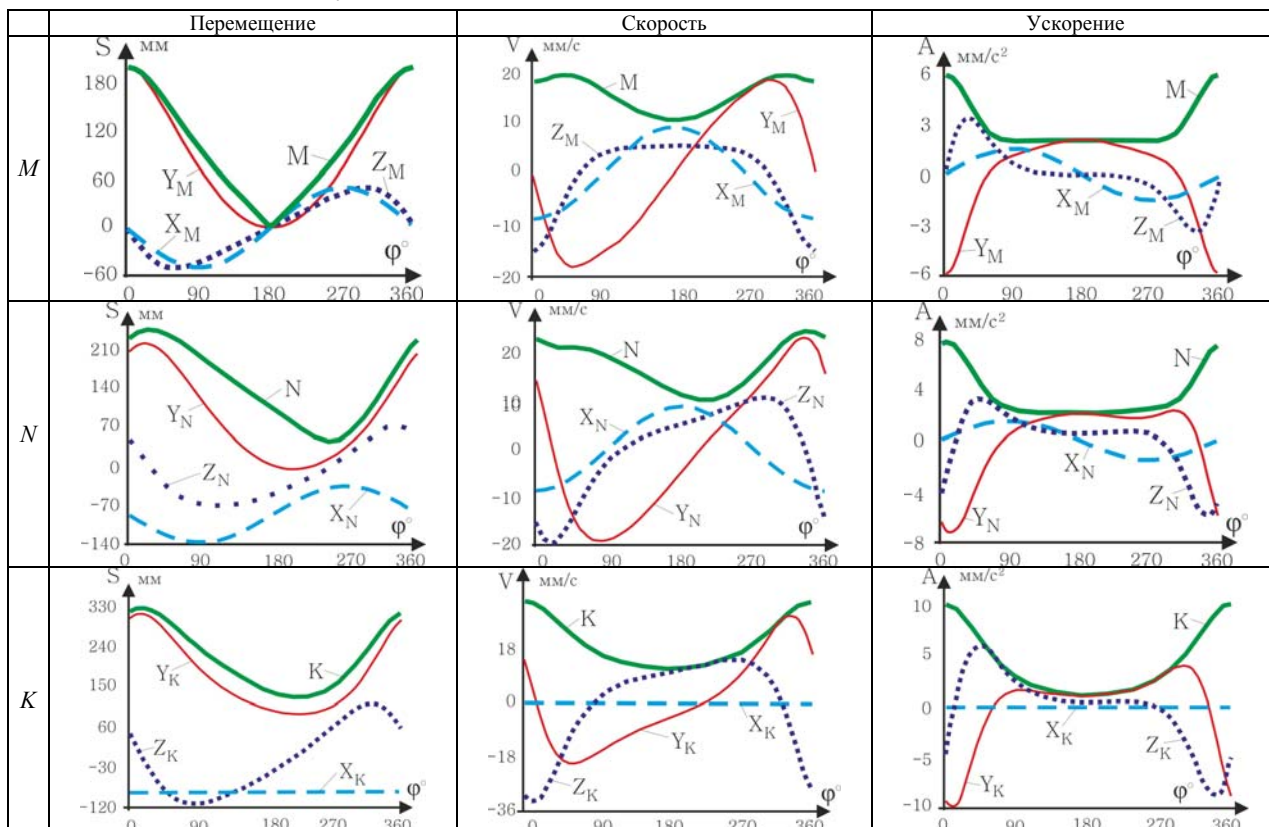


Рис. 3. Предельные значения кинематических параметров исследуемых точек

Полученные нами уравнения кинематики являются универсальными, пригодны для определения положений, скоростей и ускорений характерных точек для пространственных 4R-механизмов со структурными параметрами $l_1, l_2, \alpha_1, \alpha_2$ и представлены в удобном для инженерных расчетов виде.

Библиографические ссылки

1. А. с. № 895485. Смеситель / П. Г. Мудров, Б. А. Никулин. 07.01.82.
2. А. с. № 1330182. Устройство для закалки изделий / П. Г. Мудров, А. Г. Мудров, М. Г. Яруллин. 15.04.87.
3. Мудров А. Г., Яруллин М. Г. Пространственные механизмы для жидкостной обработки изделий // The Eight IFToMM International Symposium on Theory of Machines and Mechanisms. University POLITEHNICA of Buharest-ROMANIA. August 28 – September 1, 2001. – Vol. II. – P. 229–234.

4. Яруллин М. Г. Погружная пространственная моечная машина // Повышение эффективности сельскохозяйственного производства. – Казань, 1987. – С. 86–88.
5. Bennett G. T. A new mechanism // Engineering. – 1903. – Vol. 76.
6. Мудров П. Г. Пространственные механизмы с вращательными парами. – Казань : Изд-во Каз. ун-та, 1976. – 264 с.
7. Дименберг Ф. М. Теория пространственных шарнирных механизмов. – М. : Наука, 1982. – 336 с.
8. Саркисян Ю. Л. Аппроксимационный синтез механизмов. – М.: Наука, 1982. – 304 с.
9. Мингазов М. Р. Кинематика ведомого кривошипа пространственного четырехзвенного шарнирного механизма особой структуры // XXI Туполевские чтения (школа молодых ученых) : междунар. молодежная науч. конф. (19–21 ноября 2013 г.) : сб. докл. – Казань : Изд-во Каз. гос. техн. ун-та, 2013. – С. 214–218.

M. G. Yarullin, DSc in Engineering, Professor, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev
 M. R. Mingazov, Post-graduate, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev

In this paper we develop motion laws and kinematic parameters properties of 4R linkage active link points. Equations and calculation of motion, velocity and acceleration of the 4R linkage specific points are presented.

Keywords: spatial 4R linkage, linkage kinematics, direction cosines, mixing, specific points.

Получено 31.05.14

УДК 536.24: 519.63

С. С. Макаров, кандидат технических наук, доцент, Институт механики УрО РАН, Ижевск

К. Э. Чекмышев, аспирант, Институт механики УрО РАН, Ижевск

С. Н. Храмов, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Е. В. Макарова, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ЗАКАЛКЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК *

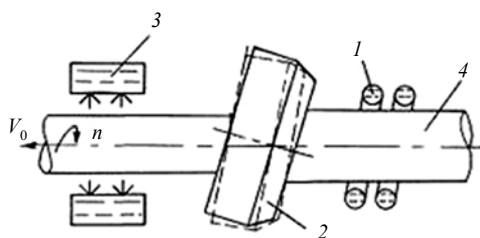
Приводятся результаты математического моделирования охлаждения осесимметричной металлической заготовки из конструкционной стали квазистационарными потоками охлаждающей среды. Дается математическое описание решения задачи конвективного теплообмена при охлаждении водой и воздухом. Анализируются результаты численных расчетов параметров теплообмена в зависимости от геометрии, теплофизических свойств веществ и времени процесса.

Ключевые слова: математическая модель, охлаждение, осесимметричная металлическая заготовка, параметры теплообмена, квазистационарный поток, численный расчет.

При изготовлении металлических осесимметричных заготовок деталей машиностроения, таких как трубы, валы, оси, втулки, пальцы, пружины и т. д., применяют эффективные упрочняющие технологии термической обработки. В работах В. Д. Садовского, М. Л. Берштейна, А. Г. Рахштадта, В. Ф. Жадана, О. И. Шаврина, В. Б. Дементьева получены научные результаты, позволяющие улучшить комплекс физико-механических свойств материала заготовок, существенно снизить металлоемкость продукции, а также использовать стали для ответственных отраслей техники, не содержащие остродефицитных легирующих элементов. На рис. 1, а приведена классическая схема упрочнения осесимметричных заготовок [1]. Суть процесса заключается в последовательном нагреве заготовки токами высокой частоты до температуры аустенизации, дефор-

мации в трех неприводных роликах на оправке при принудительном перемещении и охлаждении в спрейерном устройстве. Практически отработана технология изготовления осесимметричных заготовок ответственных деталей из конструкционных сталей марок 40, 40Х, 9Х, 60С2, 30ХГСА, 30ХГСНА и т. д., наружный диаметр которых 0,012...0,06 м (рис. 1, б).

Технология упрочнения осесимметричных заготовок включает этап охлаждения. Приоритетными задачами на данном этапе являются научные исследования, включающие разработку и совершенствование конструкции охлаждающих устройств, а также режимов подачи охлаждающих сред. Для осесимметричных заготовок широкое применение нашли струйные устройства, например, радиально многосопловой спрейер [2] (рис. 2, а), осевой спрейер с коническими соплами [3] (рис. 2, б).



а



б

Рис. 1. Схема упрочнения осесимметричных заготовок: а – классическая схема (1 – индуктор; 2 – деформирующие ролики; 3 – спрейер; 4 – заготовка); б – осесимметричные заготовки

© Макаров С. С., Чекмышев К. Э., Храмов С. Н., Макарова Е. В., 2014

* Работа выполнена при поддержке Программы научных проектов молодых ученых и аспирантов УрО РАН на 2014 г. (проект № 14-1-НП-1).