

А.А.Бейсембаев<sup>1</sup>, А.С.Ербосынова<sup>1</sup>✉, П.Н.Павленко<sup>2</sup>, М.Ш.Байбатшаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Satbayev University, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Национальный авиационный университет, Киев, Украина

E-mail: y.sarsenbayev@satbayev.university

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ ТРАЕКТОРИЙ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА ДЛЯ СНЯТИЯ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТОВАРНОГО МАГНИЯ

**Аннотация.** В работе рассмотрены вопросы роботизации процесса снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава, с применением манипуляционного робота (МР), имеющего подвижную и поворотную лопатку. МР поступательным движением подвижной лопатки, собирает оксидную пленку на поворотную лопатку. Далее вращательным движением поворотной лопатки оксидная пленка сбрасывается в специальную тару. Для управления данным МР разработаны программные траектории по степеням подвижности, которые описываются квадратичными полиномами. Разработанные программные траектории моделируются с применением *MatLab* версии *R2015b*.

**Ключевые слова.** Литейный конвейер, магниевый расплав, оксидная пленка, манипуляционный робот, программная траектория, планирование программной траектории, квадратичная интерполяция.

### Введение.

Товарный магний производится на литейных конвейерах, в форме магневых отливок, называемых чушками [1,2]. Литейный конвейер, представляет собой бесконечную цепь 1, натянутую на приводной 2 и натяжной 3 барабаны. На бесконечной ленте закреплены изложницы 5, в которые заливается магниевый расплав при их непрерывном движении (рисунок 1).

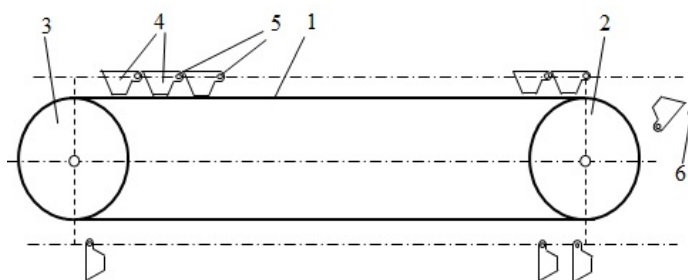


Рисунок 1 – Схема литейного конвейера производства товарного магния

Залитый в изложницу магниевый расплав переходит в твердую фазу, вследствие теплообмена с изложницей. Далее изложница 4 достигнув приводного барабана, вращением вокруг оси 5 опрокидывается, соударением с упором 6, в результате магниевая чушка под собственным весом выпадает из изложницы (рисунок 1).

Процесс разливки происходит в открытом воздушном пространстве, поэтому поверхностные слои окисляются с образованием оксидной пленки, которая всплывает на поверхность залитого в изложницу магниевого расплава. Технологическая операция (ТО) снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава выполняется во вредных для

здоровья, работающего условиях вручную, и носит однообразный, монотонный характер. Поэтому актуальна проблема роботизации данной ТО.

Лента литейного конвейера непрерывно перемещается, поэтому ТО снятия оксидной пленки необходимо выполнять с поверхности металлического расплава, залитого в непрерывно движущиеся изложницы [3]. Период времени перемещения одной изложницы, составляет 5 [с]. Это достаточно малый промежуток времени, поэтому предлагается снимать оксидную пленку одновременно с поверхностями магниевого расплава двух изложниц, поэтому период времени увеличивается до 10 [с].

Для выполнения ТО снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава предлагается применить манипуляционный робот (МР), кинематическая структура которого показана на рисунке 2. Предложенный МР состоит из неподвижного основания 1, с установленной на нем поступательного шарнира 2, для бокового перемещения МР. Далее расположен поступательный шарнир 3, для подъема и опускания МР. Этот шарнир связан со следующим поступательным шарниром 4, который служит для линейного перемещения штока 7, к которому крепятся подвижные лопатки 8. С шарниром 4 связан вращательный шарнир 5, на котором закреплены вращательные лопатки 6.

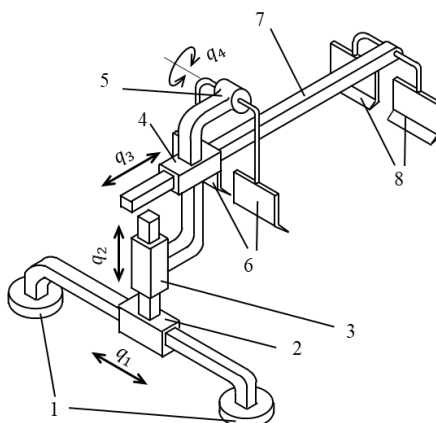


Рисунок 2 – Манипуляционный робот для снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава

Геометрическая интерпретация процесса снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава представлена на рисунке 3.

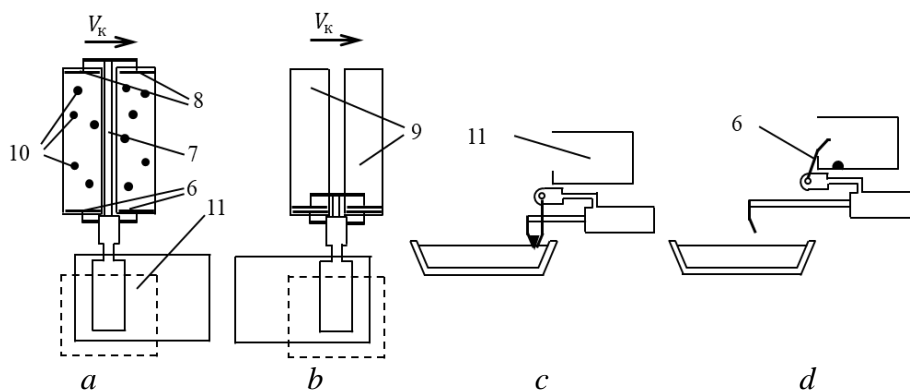


Рисунок 3 – Процесс снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава

На рисунке 3а показано начальное расположение вращательных лопаток 6 и подвижных лопаток 8, для сбора оксидной пленки 10 с поверхности магниевого расплава,

залитого в изложницы 9. При помощи горизонтального движения подвижного штока 7, подвижные лопатки 8, собирают образовавшуюся оксидную пленку, на поворотные лопатки 6 (рисунки 3*b*, 3*c*). Далее производится обратный ход подвижной лопатки 8, в это время поворотные лопатки 6 вращением вокруг оси, сбрасывают собранную оксидную пленку в специальную емкость для сбора оксидной пленки 10 (рисунок 3*d*).

Ширина подвижных и поворотных лопаток равна 0.155 [м], а расстояние между ними составляет 0.05 [м]. Это позволит полностью собрать всю образовавшуюся оксидную пленку с поверхностей залитого в изложницы магниевого расплава [4].

### Материалы и методы.

В общем случае по каждой степени подвижности МР, пределы изменения значений обобщенных координат, скоростей и ускорений, ограничены условиями, которые определяются энергетическими характеристиками приводов, заданными следующими соотношениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq q_1 \leq 0.4, 0 \leq q_2 \leq 0.1, 0 \leq q_3 \leq 0.7 \text{ [м]}, 0 \leq q_4 \leq -\frac{\pi}{2} \text{ [рад]} \\ -0.2 \leq \dot{q}_1 \leq 0.2, -0.1 \leq \dot{q}_2 \leq 0.1, -0.5 \leq \dot{q}_3 \leq 0.5 \text{ [м/с]}, -\frac{7\pi}{3.6} \leq \dot{q}_4 = \frac{7\pi}{3.6} \text{ [рад/с]} \\ -0.2 \leq \ddot{q}_1 \leq 0.2, -0.2 \leq \ddot{q}_2 \leq 0.2, -0.5 \leq \ddot{q}_3 \leq 0.5 \text{ [м/с}^2\text{]}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Программные траектории по степеням подвижности МР аппроксимируем квадратичными полиномами, с выполнением условия совпадения значений скоростей и ускорений в точках сопряжения, соответствующим точкам разгона до заданной скорости движения, движения с заданной скоростью и торможения с остановкой в заданной точке [5].

Исходное положение МР задается значениями обобщенных координат, по первой степени подвижности  $q_{1,1} = 0.1$  [м], по второй степени подвижности  $q_{2,1} = 0.1$  [м], по третьей степени подвижности  $q_{3,1} = 0.605$  [м], по четвертой степени подвижности  $q_{4,1} = \frac{3\pi}{2} = 4.712$  [рад].

Так как процесс снятия оксидной с пленки с поверхности магниевого расплава производится при непрерывно движущихся изложницах, необходимо осуществить разгон до заданной скорости движения изложниц  $V_k = 0.04$  [м/с]. Тогда закон программного управления по первой степени подвижности описывается следующим выражением

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 0: q_{1,1} = 0.1 \text{ [м]}, \\ \forall t \in [0, 0.2]: q_{1,1}^p = 0.1 + \frac{0.2t^2}{2}, \\ t = 0.2: q_{1,2} = 0.104 \text{ [м]}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Далее осуществляется процесс опускания лопаток на поверхность магниевого расплава, для сбора оксидной пленки, тогда закон программного управления будет иметь следующий вид

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 0.2: q_{2,1} = 0.1 \text{ [м]}, \\ \forall t \in [0.2, 0.7]: q_{2,2}^p = 0.1 - \frac{0.2t^2}{2}, \\ \forall t \in [0.7, 1.2]: q_{2,2}^r = 0.075 - 0.1t + \frac{0.2t^2}{2}, \\ t = 1.2: q_{2,3} = 0.05 \text{ [м]}. \end{array} \right. \quad (3)$$

На следующем шаге производится сбор оксидной пленки подвижной лопаткой на поворотную лопатку. Закон программного управления по третьей степени подвижности можно записать следующим образом

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 1.2: q_{3,1} = 0.605 \text{ [м]}, \\ \forall t \in [1.2, 1.7]: q_{3,2}^p = 0.605 - \frac{0.5t^2}{2}, \\ \forall t \in [1.7, 3.62]: q_{3,2}^a = 0.5425 - 0.25t, \\ \forall t \in [3.62, 4.12]: q_{3,2}^r = 0.0625 - 0.25t + \frac{0.5t^2}{2}, \\ t = 4.12: q_{3,3} = 0 \text{ [м]}. \end{array} \right. \quad (4)$$

Далее осуществляется движение по второй степени подвижности, лопатки с собранной оксидной пленкой поднимаются вверх, который описывается следующим выражением

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 4.12: q_{2,3} = 0.05 \text{ [м]}, \\ \forall t \in [4.12, 4.62]: q_{2,4}^p = 0.05 + \frac{0.2t^2}{2}, \\ \forall t \in [4.62, 5.12]: q_{2,4}^r = 0.075 + 0.1t - \frac{0.2t^2}{2}, \\ t = 5.12: q_{2,5} = 0.1 \text{ [м]}, \end{array} \right. \quad (5)$$

Начиная с  $t = 0.2$  [с] до величины времени  $t = 5.12$  [с] производится движение по первой степени подвижности  $\dot{q}_{1,2}^a = 0.04$  [М/с], которое описывается следующим образом

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 0.2: q_{1,2} = 0.104 \text{ [м]}, \\ \forall t \in [0.2, 5.12]: \dot{q}_{1,2}^a = 0.04t, \\ t = 5.12: q_{1,3} = 0.3 \text{ [м]}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Далее производится одновременно торможение по первой степени подвижности и обратное перемещение подвижной лопатки по третьей степени подвижности МР. Закон программного управления по первой степени подвижности будет иметь следующий вид

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 5.12: q_{1,3} = 0.3 \text{ [м]}, \\ \forall t \in [5.12, 5.32]: \dot{q}_{1,3}^r = 0.3 + 0.04t - \frac{0.2t^2}{2}, \\ t = 5.32: q_{1,4} = 0.304 \text{ [м]}. \end{array} \right. \quad (7)$$

Закон программного управления по третьей степени подвижности МР описывается следующим образом

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 5.12: q_{3,3} = 0 \text{ [м]}, \\ \forall t \in [5.12, 6.12]: q_{3,4}^p = \frac{0.5t^2}{2}, \\ \forall t \in [6.12, 6.34]: q_{3,4}^a = 0.25 + 0.5t, \\ \forall t \in [6.34, 7.34]: q_{3,4}^r = 0.305 + 0.5t - \frac{0.5t^2}{2}, \\ t = 7.34: q_{3,5} = 0.605 \text{ [м]}. \end{array} \right. \quad (8)$$

Параллельно с движением (8) по третьей степени подвижности, выполняется движение по четвертой степени подвижности для сброса оксидной пленки в ёмкость для сбора оксидной пленки. Учитывая, что по данной степени подвижности осуществляется движение от упора до упора с применением пневматического привода, который является не управляемым по величине ускорения. Закон программного управления по четвертой степени подвижности МР описывается следующим образом

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 6.14: q_{4,1} = 4.712 \text{ [рад]}, \\ \forall t \in (6.14, 6.74]: q_{4,2}^c = 4.712 - 6.108t, \\ \forall t \in (6.74, 7.34]: q_{4,2}^n = 1.047 + 6.108t, \\ t = 7.34: q_{4,3} = 4.712 \text{ [рад]}. \end{array} \right. \quad (9)$$

Далее осуществляется возвращение в исходной положение по первой степени подвижности, закон программного управления в этом случае имеет следующий вид

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 7.34: q_{1,3} = 0.304 \text{ [м]}, \\ \forall t \in [7.34, 8.34]: q_{1,4}^p = 0.304 - \frac{0.2t^2}{2}, \\ \forall t \in [8.34, 8.36]: q_{1,4}^a = 0.204 - 0.2t, \\ \forall t \in [8.36, 9.36]: q_{1,4}^r = 0.3 - 0.2t + \frac{0.2t^2}{2}, \\ t = 9.36: q_{1,5} = 0.1 \text{ [м]}. \end{array} \right. \quad (10)$$

Таким образом на выполнение одного цикла снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава, залитого в две изложницы необходимо  $t = 9.36$  [с].

### Результаты.

Для проверки достоверности полученных выражений, описывающих программные траектории по степеням подвижности МР, выполним их моделирование в программной среде *MatLab* [6].

Изменения обобщенной координаты по первой степени подвижности МР описываются выражениями (2), (6), (7) и (8), которые задают программные траектории по положению и моделируются с применением программы *Tr\_q1.m*. Результат приведен на рисунке 4.

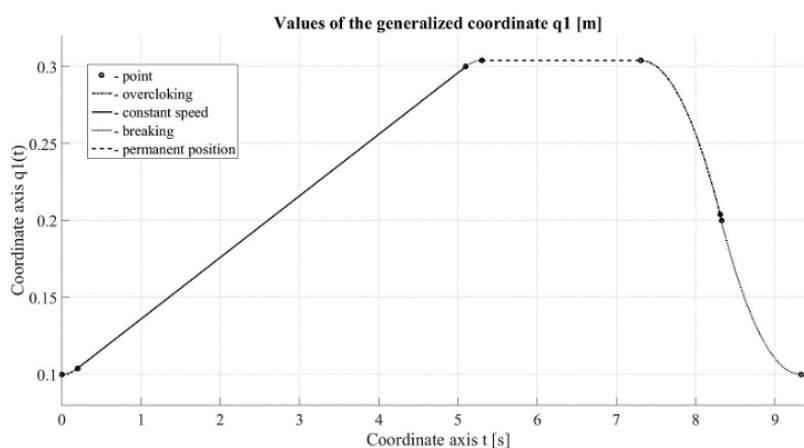


Рисунок 4 – Программная траектория по положению первой степени подвижности МР

С применением программы *Tr\_speed\_q1.m.* выполнено моделирование процесса изменения скорости обобщенной координаты, то есть программной траектории по скорости первой степени подвижности МР. С применением программы *Tr\_acceleration\_q1.m.* выполнено моделирование процесса изменения ускорения обобщенной координаты, то есть программной траектории по ускорению первой степени подвижности МР. Полученные графики программных траекторий по скорости и ускорению первой степени подвижности МР приведены на рисунке 5.

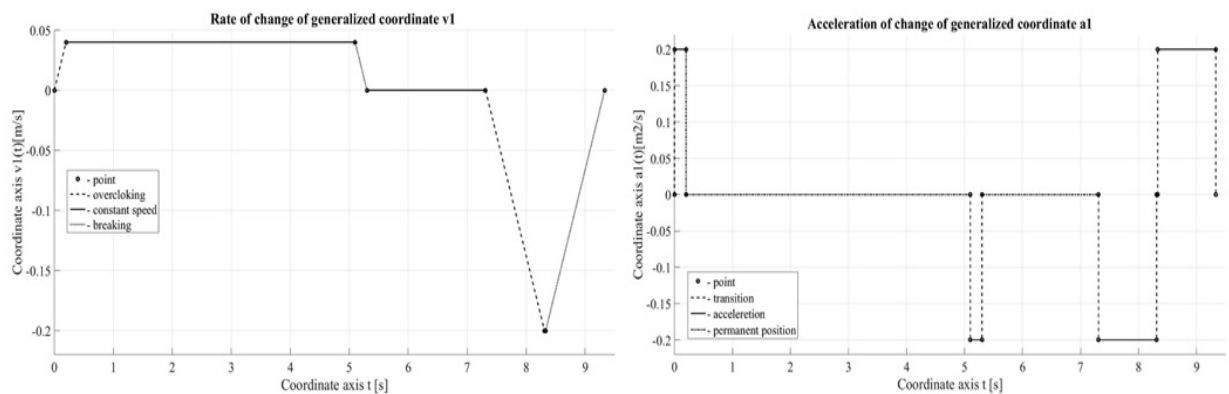


Рисунок 5 – Программные траектории по скорости и ускорению первой степени подвижности МР

Программные траектории по положению второй степени подвижности МР описываются выражениями (3) и (5), которые моделируются с применением программы *Tr\_q2.m.* Результат приведен на рисунке 6.

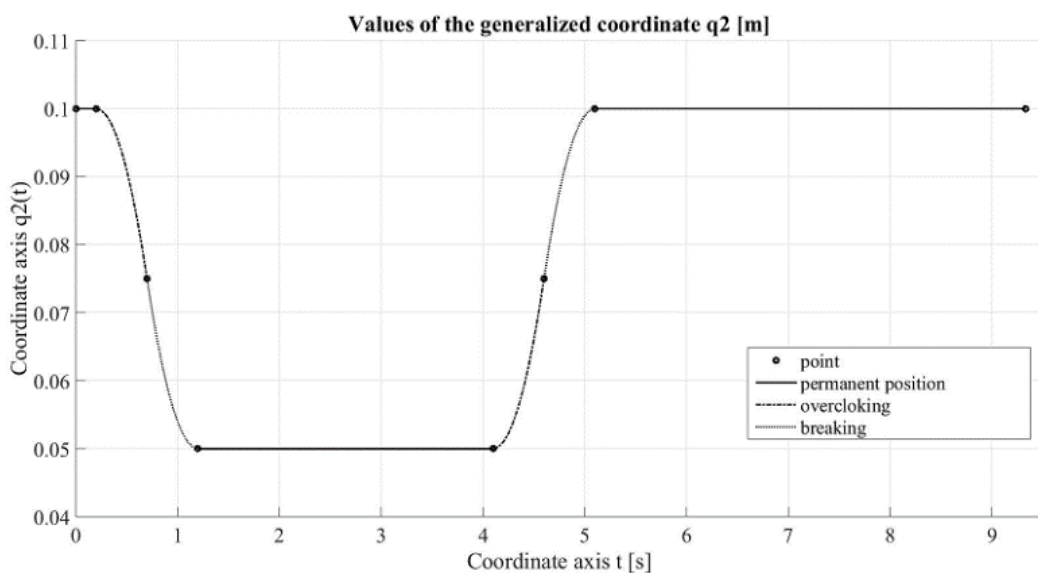


Рисунок 6 – Программная траектория по положению второй степени подвижности МР

С применением программ *Tr\_speed\_q2.m.*, *Tr\_acceleration\_q2.m* выполнено моделирование программной траектории по скорости и ускорению второй степени подвижности МР. Полученные графики программных траекторий по скорости и ускорению второй степени подвижности МР приведены на рисунке 7.

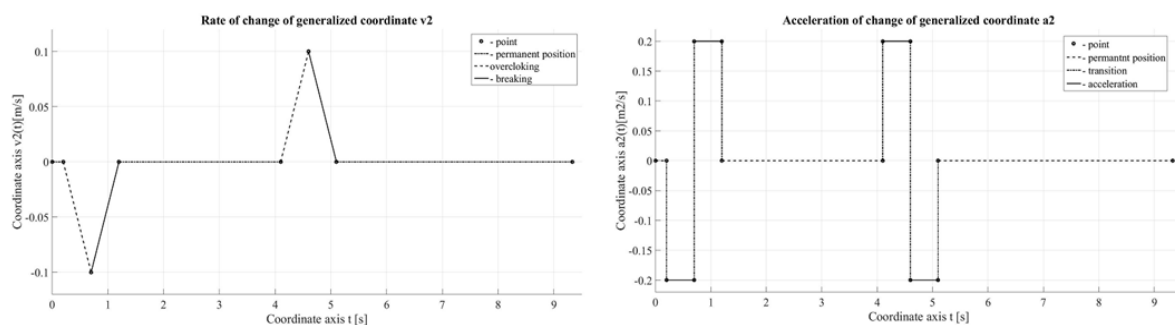


Рисунок 7 – Программные траектории по скорости и ускорению второй степени подвижности МР

Программные траектории по положению третьей степени подвижности МР описываются выражениями (4) и (8), которые моделируются с применением программы *Tr\_q3.m*. График программной траектории по положению второй степени подвижности МР приведен на рисунке 8.

С применением программ *Tr\_speed\_q3.m*, *Tr\_acceleration\_q3.m* выполнено моделирование программной траектории по скорости и ускорению второй степени подвижности МР. Полученные графики программных траекторий по скорости и ускорению второй степени подвижности МР приведены на рисунке 9.

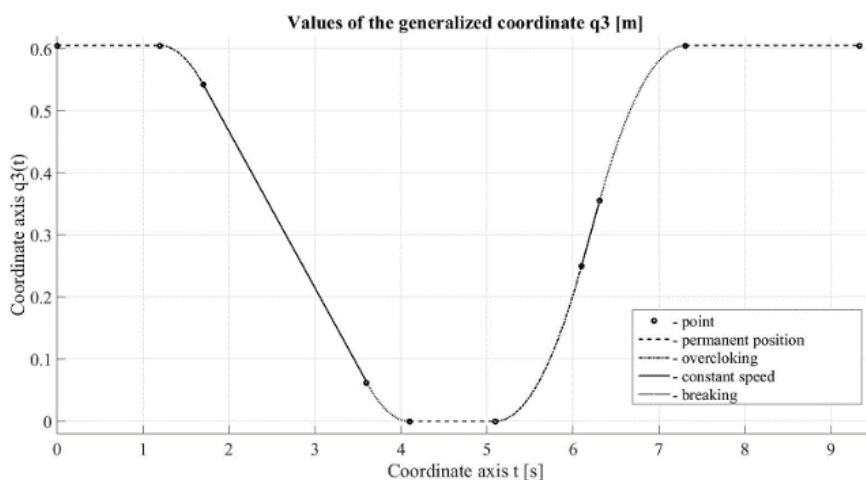


Рисунок 8 – Программная траектория по положению третьей степени подвижности МР

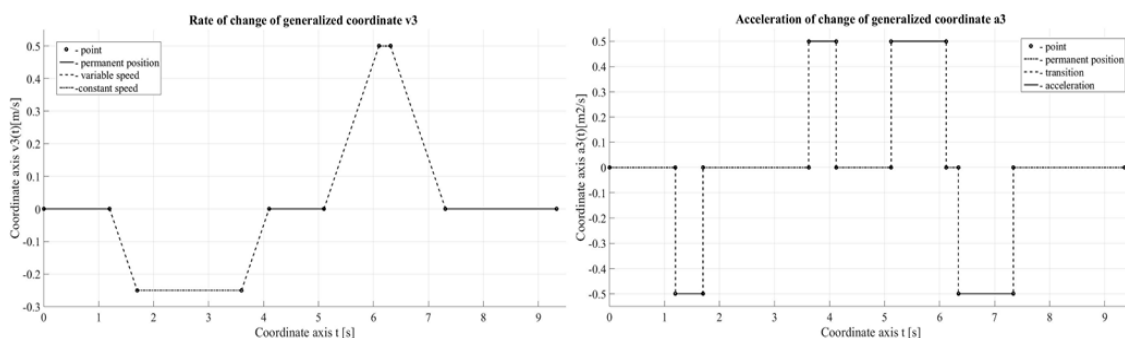


Рисунок 9 – Программные траектории по скорости и ускорению третьей степени подвижности МР

С применением программ *Tr\_q4.m.*, *Tr\_speed\_q4.m* выполнено моделирование программной траектории по положению и скорости четвертой степени подвижности МР. Полученные графики программных траекторий по положению и скорости четвертой степени подвижности МР приведены на рисунке 10.

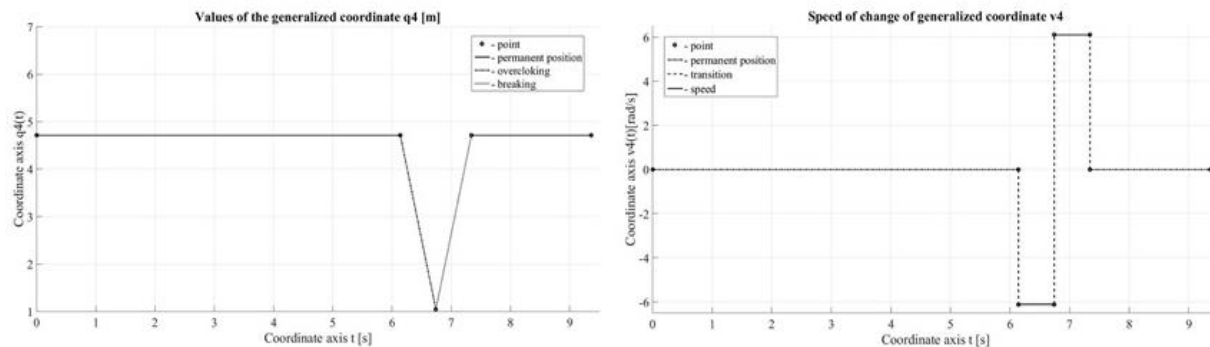


Рисунок 10 – Программные траектории по положению и скорости четвертой степени подвижности МР

### Обсуждение.

Отличительной особенностью является снятие оксидной пленки с поверхности магниевого расплава, с движущихся изложниц литейного конвейера. Для роботизации данного процесса предложено применение МР, который компенсирует движение изложниц за счет движения по второй степени подвижности. Одновременно, при помощи линейного перемещения подвижных лопаток собирает оксидную пленку на поворотную лопатку. Собранная оксидная пленка далее вращательным движением сбрасывается в специальную емкость для сбора оксидной пленки. Для реализации данного процесса разработаны программные траектории по положению, скорости и ускорению степеней подвижности МР с применением квадратичных полиномов.

### Заключение.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

- для снятия оксидной пленки с поверхности магниевого расплава залитого в непрерывно движущиеся изложницы литейного конвейера предложено применить МР, который своими степенями подвижности компенсирует это движение и с помощью лопаток собирает и сбрасывает оксидную пленку в специальную емкость;
- разработаны программные траектории по положению, скорости и ускорению степеней подвижности МР для выполнения технологической операции снятия оксидной пленки, которые аппроксимированы квадратичными полиномами;
- достоверность полученных программных траекторий подтверждается результатами моделирования в программной среде *MatLab*.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Металлургия магния: Учебное пособие//В.А. Лебедев, В.И. Седых. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. – 174 с. ISBN 978-5-8038-0645-5.
- [2] Янушевский А.С., Коршунов В.В. Производство магниевых отливок в металлические формы. Омский научный вестник. Машиностроение, машиноведение. №1 (151), 2017. с. 45-48. ISSN (Print)1813-8225 ISSN (Online) 2541-7541. [http://vestnik.omgtu.ru/images/stories/arhiv/2017/pmt/1\\_151\\_2017/27-48mashi2.pdf](http://vestnik.omgtu.ru/images/stories/arhiv/2017/pmt/1_151_2017/27-48mashi2.pdf)

[3] Бейсембаев А.А., Әсембай А. Стратифицированное описание литейного производства товарного магния. Вестник КазННТУ. №3(121) 2017. ISSN 1680-9211, с. 183-190. <https://vestnik.satbayev.university/index.php/journal/issue/view/34/33>

[4] Бүрлібай А.Ә. Разработка системы автоматизированного управления производством товарного магния. Диссертация на соискание ученой степени доктора PhD по специальности 6D070200 – Автоматизация и управление. КазННТУ, 2014. – 182 с.

[5] Булгаков А.Г., Воробьев В.А. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. - М.: Солон-Пресс, 2018. – 484 с. ISBN 978-5-91359-296-5.

[6] Амос Гилат. Matlab. Теория и практика. 5 – издание. /Перевод с английского Смоленцев Н.К. - М.: ДМК Пресс, 2016. – 416 с. ISBN: 978-5-97060-183-9.

## REFERENCES\*

[1] Metallurgiya magniya: Uchebnoe posobie/-V.A. Lebedev, V.I. Sedykh. - Ekaterinburg: UGTU-UI, 2010. – 174 s. ISBN 978-5-8038-0645-5.

[2] Yanushevskij A.S., Korshunov V.V. Proizvodstvo magnievyykh otливok v metallicheskie formy. Omskij nauchnyj vestnik. Mashinostroenie, mashinovedenie. №1 (151), 2017. s. 45-48. ISSN (Print)1813-8225 ISSN (Online) 2541-7541. [http://vestnik.omgtu.ru/images/stories/arhiv/2017/pmt/1\\_151\\_2017/27-48mashi2.pdf](http://vestnik.omgtu.ru/images/stories/arhiv/2017/pmt/1_151_2017/27-48mashi2.pdf)

[3] Bejsembaev A.A., Asembaj A. Stratificirovannoe opisanie litejnogo proizvodstva tovarnogo magniya. Vestnik KazNITU. №3(121) 2017. ISSN 1680-9211, s. 183-190. <https://vestnik.satbayev.university/index.php/journal/issue/view/34/33>

[4] Burlibaj A.A. Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo upravleniya proizvodstvom tovarnogo magniya. Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni doktora PhD po special`nosti 6D070200 – Avtomatizatsiya i upravlenie. KazNITU, 2014. – 182 s.

[5] Bulgakov A.G., Vorob`ev V.A. Promyshlennye roboty. Kinematika, dinamika, kontrol` i upravlenie. - M.: Solon-Press, 2018. – 484 s. ISBN 978-5-91359-296-5.

[6] Amos Gilat. Matlab. Teoriya i praktika. 5 – izdanie. /Perevod s anglijskogo Smolenczev N.K. - M.: DMK Press, 2016. – 416 s. ISBN: 978-5-97060-183-9.

**Акамбай Бейсембаев**, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, [akambay.beisembayev@satbayev.university](mailto:akambay.beisembayev@satbayev.university)

**Анаркуль Ербосынова**, магистр, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, [a.yerbosynova@stud.satbayev.university](mailto:a.yerbosynova@stud.satbayev.university)

**Петр Павленко**, т.ғ.д., профессор, Ұлттық авиация университеті, Киев, Украина, [petrprav@ukr.net](mailto:petrprav@ukr.net)

**Мухит Байбатшаев**, т.ғ.д., қауымдастырылған профессор, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, [m.baibatshaev@satbayev.university](mailto:m.baibatshaev@satbayev.university)

## ТАУАРЛЫ МАГНИЙ ӨНДІРІСІНДЕ ТОТЫҚ ҚАБЫРШЫҒЫН ЖИНАУ ҮШІН МАНИПУЛЯТОРЛЫ РОБОТТЫҢ БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ТРАЕКТОРИЯЛАРЫН ЖАСАУ

**Аңдатпа.** Бұл жұмыста қозғалатын және бұрылатын қалақшасы бар манипуляторлы роботтың (МР) қолданып магний балқымасының бетінең тотық қабыршығын жинау процессің роботтандыру мәселері қарастырылған. МР қозғалатын қалашасының тік қимылдау нәтижесінде тотық қабыршығын бұрылатын қалақшаға жинайды. Одан кейін бұрылатын қалақшаға жиналған тотық айналу айналу қозғалыс арқылы арналған сымдылыққа жиналады. Осындай МР қимыл дәрежелері бойынша

бағдарламалық траекториялар квадраттық полиномдармен жазылады. Өңделген бағдарламалық траекториялар *MatLab* ортасында оның *R2015b* версиясын қолданып модельденді.

**Түйінді сөздер.** Құю конвейері, магний балқымасы, тотық қабыршығы, манипуляторлы робот, бағдарламалық траекториясы, бағдарламалық траекториясын жоспарлау, квадраттық интерполяциясы.

**Akambay Beisembayev**, candidate of technical sciences, associate professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, akambay.beisembayev@satbayev.university

**Anargul Yerbossynova**, master, Satbayev University, Almaty, a.yerbossynova@stud.satbayev.university

**Petro Pavlenko**, doctor of technical sciences, professor, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, petrav@ukr.net

**Muhit Baybatshaev**, doctor of technical sciences, associate professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, m.baibatshaev@satbayev.university

## DEVELOPMENT OF A SOFTWARE TRAJECTORY OF A MANIPULATION ROBOT FOR REMOVING OXIDE FILM IN THE PRODUCTION OF COMMERCIAL MAGNESIUM

**Abstract.** The paper considers the issues of robotization of the process of removing an oxide film from the surface of a magnesium melt, using a handling manipulative robot (MR) with a movable and rotary blade. MR by the translational movement of the movable blade collects the oxide film on the rotary blade. Further, by rotational movement of the rotary blade, the oxide film is dropped into a special container. To control the MR data, software trajectories have been developed for the degrees of freedom, which are described by quadratic polynomials. The developed software trajectories are modeled using *MatLab* version *R2015b*.

**Keywords.** Foundry conveyor, magnesium melt, oxide film, manipulation robot, program trajectory, program trajectory planning, quadratic interpolation.

\*\*\*\*\*