

УДК 621.3

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ТРЕКЕРА В ПРОЦЕССЕ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОЙ ШТАМПОВКИ

© Свинарев Н.Н., Сазонникова Н.А.

*Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева, г. Самара, Российская Федерация*

e-mail: Salve63@mail.ru

Листовая штамповка является довольно трудоемким и дорогостоящим процессом. Для реализации данной технологии необходимы значительные время и средства, чтобы спроектировать и изготовить оснастку, а в дальнейшем отработать процесс на прессовом оборудовании, что целесообразно только в условиях крупносерийного производства. Развитие оборудования с числовым программным управлением и средств создания управляющих программ привело к появлению нового процесса в листовой штамповке – инкрементальной штамповки [1]. Инкрементальная штамповка – это простой способ локальной деформации материала без использования дорогостоящей оснастки. Технология позволяет обрабатывать конструкционные, коррозионностойкие, высокопрочные и оцинкованные стали, цветные металлы, титан и другие материалы, что делает данный вид обработки перспективным для дальнейшего развития технологии.

Целью данного исследования является повышение точности перемещений робота-манипулятора за счет их контроля в процессе инкрементальной штамповки с использованием лазерного трекера.

Исходя из требований к точности изготовления детали и условий протекания технологического процесса, выбран состав автоматизированного комплекса для инкрементальной штамповки. Он состоит из робота-манипулятора KUKAKR 160 R1570, лазерного трекера API Radian R-20, отражателей, установленных на адаптере пуансона и заготовке (заготовка закреплена на установке для штамповки), и компьютера с программой управления. Указанный трекер отвечает требованиям по точности измерений координат и частоте опроса параметров технологического процесса (см. рис. 1).

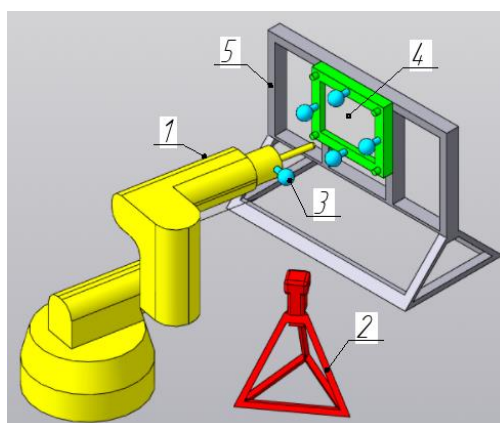


Рис. 1. Автоматизированный комплекс для инкрементальной штамповки:  
1 – робот – манипулятор; 2 – лазерный трекер; 3 – отражатель;  
4 – заготовка; 5 – оснастка для заготовки

При работе робота без обратной связи может накапливаться ошибка позиционирования, что может привести к браку штампуемой детали. Поэтому необходимо обеспечить систему обратной связи по положению. Для этого в систему добавляется лазерный трекер. На рис. 2 показана схема расположения всех частей автоматизированного комплекса для инкрементальной штамповки.

По результатам измерений лазерного трекера с помощью программы определяется, насколько точно выполняется перемещение, т. е. не превышает ли разность действительного и требуемого значения размера допустимую величину [2]. Если превышения нет, то управляющая программа не будет осуществлять коррекцию. На рис. 2 показан алгоритм коррекции перемещения робота-манипулятора.

Четыре отражателя жестко закреплены на прижиме технологической оснастки и образуют базовую плоскость, относительно которой ведется отсчет положения пуансона. Измерительная база должна быть достаточно жесткой и не деформироваться в процессе обработки. Еще один отражатель расположен на адаптере рядом с инструментальным центром робота-манипулятора для измерения положения центральной точки пуансона при штамповке относительно базовой плоскости.

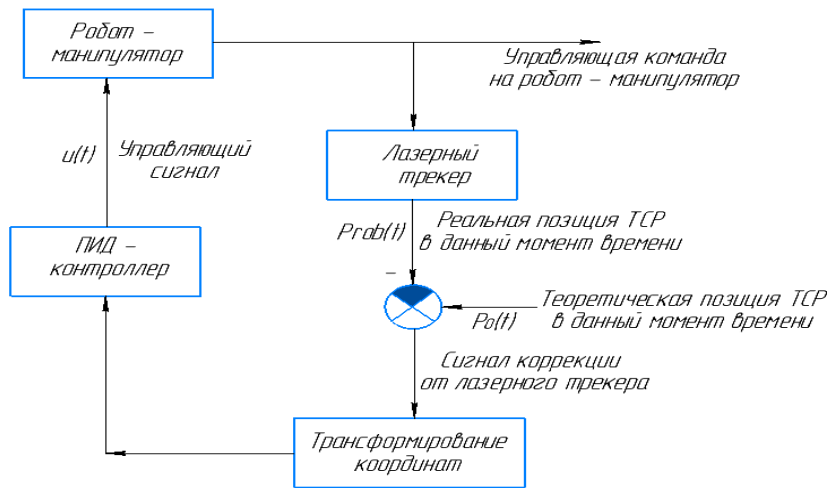


Рис. 2. Схема автоматизированного комплекса с использованием ПИД-регулятора

В предлагаемой математической модели в качестве входных данных используются значения координат перемещения робота в системе координат лазерного трекера, затем они переводятся в систему координат робота.

Данная модель позволяет определить рассогласование действительной и теоретической траектории перемещений робота-манипулятора в процессе штамповки, а также оценить эксцентриситет, градиент и энтропию траектории перемещений в процессе штамповки по заданной траектории.

$$P_{rob}(t) = \begin{bmatrix} x_{rob}(t) \\ y_{rob}(t) \\ z_{rob}(t) \\ 0 \end{bmatrix} = {}^t_b T^{-1} * P_{tracker}(t) = {}^t_b T^{-1} \begin{bmatrix} x_0(t) - x_{rob}(t) \\ y_0(t) - y_{rob}(t) \\ z_0(t) - z_{rob}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

где  $x_{rob}(t)$ ,  $y_{rob}(t)$ ,  $z_{rob}(t)$  – ошибка позиционирования по осям в реальном времени.

В процессе работы алгоритма компенсации может возникнуть статическая ошибка регулирования, также ошибка может накапливаться, что приведет в итоге к неправильной работе алгоритма. Для компенсации этих ошибок целесообразно использовать ПИД-регулятор.

$$u(t) = K_p * {}_b^t T^{-1} \begin{bmatrix} x_0(t) - x_{rob}(t) \\ y_0(t) - y_{rob}(t) \\ z_0(t) - z_{rob}(t) \\ 0 \end{bmatrix} + K_i * {}_b^t T^{-1} + K_D * {}_b^t T^{-1} \begin{bmatrix} x_0(t) - x_0(t-1) - x_{rob}(t) + x_{rob}(t-1) \\ y_0(t) - y_0(t-1) - y_{rob}(t) + y_{rob}(t-1) \\ z_0(t) - z_0(t-1) - z_{rob}(t) + z_{rob}(t-1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

где  $u(t)$  – выходное значение ПИД-регулятора;  $K_p$  – пропорциональный коэффициент;  $K_i$  – интегральный коэффициент;  $K_D$  – дифференциальный коэффициент.

В ходе работы были выявлены следующие факторы, влияющие на точность измерений координат робота: расстояние от трекера до отражателя; угол падения излучения на отражатель; расстояние между отражателями на оснастке; расстояние от отражателя до инструментального центра.

Для повышения точности в данной работе используется лазерный трекер, но он, как и любой измерительный прибор, имеет свою погрешность измерений, поэтому для определения точности работы системы вводится понятие неопределенности измерения. Для нахождения неопределенности системы будет использован метод Монте-Карло [3].

Данный метод позволяет вычислить необходимые параметры расположения объектов измерительной системы для оптимальной точности измерений. В качестве изменяемых параметров будут выступать вышеописанные факторы.

При моделировании измерительной системы будет измеряться расстояние от точки до плоскости, т. е. расстояние от ТСР робота до рабочей плоскости. Плоскость будет задаваться отражателями на рабочей плоскости установки для штамповки, а точка ТСР робота – отражателем на последнем звене робота.

Ошибку измерения каждой конфигурации «трекер – рабочая плоскость» можно определить по формуле

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} - L_{ij}, \quad (3)$$

где  $x_i, y_i, z_i$  – координаты положения  $i$ -го отражателя;  $x_j, y_j, z_j$  – координаты положения трекера;  $L_{ij}$  – теоретическое расстояние.

### Библиографический список

1. Аюшеев Т.В. Моделирование процесса изготовления деталей методом инкрементальной формовки // Проблемы механики современных машин / Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления. 2018. № 2. С. 104–108.
2. Xiaojia S., Fumin Z., Xinghua Q., Bailing L. An online real-time path compensation system for industrial robots based on laser tracker // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2016. September-October. № 14. P. 14.
3. Wang H. Configuration optimization of laser tracker stations for position measurement in error identification of heavy-duty machine tools. Measurement Science and Technology, 2019. 13 p.