

КОНТРОЛЬ ОСНАСТКИ ДЛЯ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ТРЕКЕРА

Н.А. Сазонникова
В.Н. Илюхин
С.В. Сурудин
Д.А. Мезенцев

Самарский Университет
34, Московское шоссе,
Самара, 443086,
Российская Федерация

nasazonnikova@yandex.ru

Контроль геометрии технологического оборудования оказывает значительное влияние на общее качество и производительность продукта во многих производственных процессах, таких как многопозиционная сборка и штамповка, а также на производительность и производственные затраты. Одним из наиболее перспективных средств контроля геометрии технологического оборудования в условиях цифровой экономики является лазерный трекер. Роботизированный процесс инкрементного формования листов обеспечивает необходимую гибкость и экономичность благодаря очень гибкой цепочке инструментов. В этом случае траектория универсального инструмента задается с помощью программы обработки, определяемой геометрией изделия. Контроль геометрии технологического оборудования роботизированного комплекса для поэтапной листовой штамповки осуществлялся в 2 этапа. На первом этапе измерения проводились вручную в режиме системы измерения абсолютного диапазона. На втором этапе динамическое измерение смещения плоскости заготовки осуществлялось автоматически в режиме интерферометра в процессе формования. Было показано, что наибольшее отклонение стапеля более 1 мм и оно происходит в направлении основного приложения силы, т.е. в глубину изготовления изделия. Это значение может оказать серьезное влияние на точность геометрии деталей. Исходя из результатов измерений, можно сделать вывод, что необходимо увеличить жесткость каркаса либо за счет добавления дополнительных крепежных элементов, либо за счет использования более жестких материалов его конструкции.

Ключевые слова: лазерный трекер; инкрементная штамповка; стапель; промышленный робот; измерение; роботизированная обработка

1 Введение

Контроль размеров технологических приспособлений во многих производственных процессах, таких как многопозиционная сборка и штамповка оказывает значительное влияние на общее качество и производительность изделия, а также на производительность и производственные затраты. Например, две трети несоответствий в автомобильной и аэрокосмической промышленности вызваны размерными ошибками, а около двух третей размерных ошибок вызваны неисправностями приспособлений [1]. Дефекты размеров, связанные с приспособлениями, на различных этапах

производства нового продукта составляют до 40 % всех дефектов размеров на этапе подготовки производства, до 70 % на этапе запуска и от 70 до 100 % в течение одной и двух смен производства, соответственно.

Требования к точности изготовления и условия контролю становятся специфическими в условиях цифровой экономики. [2]. Проведение контроля технологической оснастки с использованием современных измерительных средств позволяет снизить затраты на конечный продукт, повысить целостность и эффективность процесса, оптимизировать метрологические процессы, уменьшить избыточность инструментов и повысить качество продукции и соответствие спецификации, проводить контроль с учетом

специфики технологического процесса и влияния окружающей среды.

Общая важность измерения размеров оснастки в производственных процессах отражена в обширных исследованиях, направленных на ускорение ввода в эксплуатацию и запуск новых продуктов за счет диагностики первопричин ошибок несоответствия размеров [3, 4, 5].

В ряде производственных процессов установка инструментов, калибровка и техническое обслуживание приспособлений обеспечивают высокую точность выполнения технологических операций и играют важную роль в обеспечении общего качества продукции. Для оценки геометрических параметров и калибровки приспособлений все более широкое распространение в мире и в России получают лазерные трекары, которые позволяют повысить точность измерений и сократить время проведения измерений. Они пришли на смену теодолитным измерительным системам, которые ранее использовались для контроля сборочной оснастки при сборке летательных аппаратов и в ряде других производств [3].

Применение лазерного трекара для контроля оснастки позволяет не только в 8 раз (с 8 до 1 часа) сократить длительность контроля по сравнению с традиционными методами, но и повысить точность контроля, а также автоматизировать процесс. Обработку результатов измерений целесообразно осуществлять с помощью Spatial Analyzer [5].

Состояние технологической оснастки накладывает ограничения на совершенствование конструкции и качества продукции из-за отсутствия методик и средств контроля. Применение автоматизированного контроля и методик оценки качества технологической оснастки позволяет оценить быстро и с высокой точностью оценить геометрические параметры оснастки и наметить мероприятия по ее совершенствованию и повышению качества продукции [6].

Производство деталей из листового металла в настоящее время сталкивается с новыми проблемами. Гибкое и экономичное изготовление деталей небольшими партиями позволяет справиться с возрастающей сложностью деталей в сочетании с уменьшением размеров партии. Это особенно относится к области прототипирования, мелкосерийного производства, где характерны более короткие сроки выхода на рынок. Роботизированный процесс инкрементального формообразования предполагает необходимую гибкость и рентабельность благодаря очень гибкой цепочке инструментов [7]. При использовании данного метода отпадает необходимость изготовления специальных инструментов, зависящих от конечной детали, а траектория перемещения универсального инструмента задается с помощью программы обработки, определяемой геометрией изделия.

В ходе выполнения технологической операции возникают различные неблагоприятные воздействия, требующие компенсации, чтобы гарантировать оптимальные результаты формования. Эти неблагоприятные эффекты можно разделить на две группы: эффекты, возникающие в результате пластических деформаций в процессе формования и те, которые являются результатом неточностей в роботизированной системе и выбора траектории [8]. Стратегия формообразования и ее параметры относятся ко второй группе эффектов. В данной работе будет рассмотрено их влияние на геометрическую точность результата формовки, поскольку геометрическая точность является одним из основных показателей результатов обработки, и их увеличение означает значительное улучшение инкрементального формообразования.

2 Условия технологического процесса

Использование робота с несколькими степенями свободы позволяет упростить технологический процесс инкрементального формообразования, т.к. пуансон, прикрепленный к последнему звену робота, имеет почти неограниченную свободу перемещения, поэтому становится возможным воздействие на деталь в любой плоскости, что позволяет не изменять положение заготовки и уменьшает время штамповки детали (рисунок 1). Также для робота-манипулятора почти не важен размер заготовки, в то время как станок с ЧПУ способен обрабатывать деталь, размер которой не превышает размеров стола станка [9, 10].

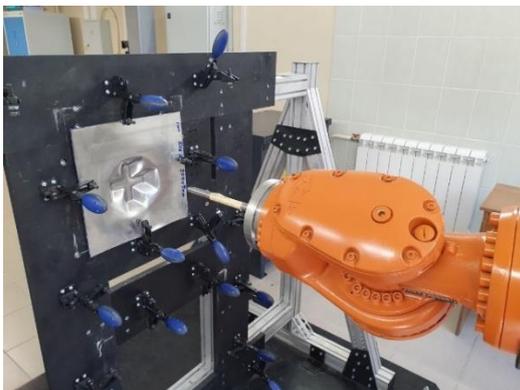


Рисунок 1. Установка для инкрементального формообразования

Современные роботы-манипуляторы характеризуются высокой повторяемостью перемещений, однако их точность недостаточна для многих технологических операций. Для повышения точности их перемещений применяются калибровка с помощью лазерного трекера, а также корректировка в процессе выполнения технологической операции также с применением лазерного трекера [10, 11].

В данной работе рассматривались следующие условия технологического процесса инкрементального формообразования:

1) Изготавливаемая деталь – заготовка для имплантата свода черепа (рисунок 2). Требуемая точность $\pm 0,1$ мм.

2) Имплантат: диаметр 112 мм, высота 27 мм из алюминиевого сплава АМгб.

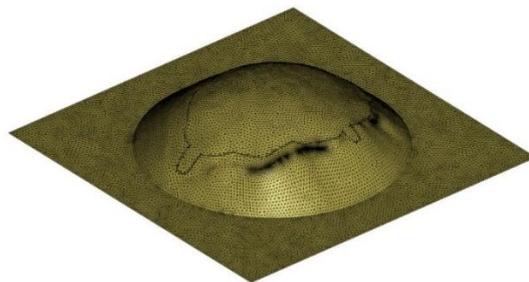


Рисунок 2. Общий вид изготавливаемой детали

Точность изготовления детали зависит от жесткости и стабильности положения оснастки (стапеля).

Лазерный трекер представляет собой следящую триангуляционную измерительную систему, работающую в реальном масштабе времени [12, 13]. Для обеспечения требуемой точности измерения необходимо выбрать схему измерений, отвечающую условиям данного технологического процесса и определить влияние параметров измерительной системы на результаты оценки перемещений робота.

Лазерный трекер представляет собой следящую измерительную систему, позволяющую проводить оценку пространственного положения заданной точки в полярной системе координат (рисунок 3).



Рисунок 3. Лазерный трекер API Radian и сферический отражатель

Так как измерения проводятся в полярной системе координат (рисунок 4), то результаты измерений состоят из значения расстояния (S), вертикального угла (V) горизонтального угла (Hz). Эти три значения

являются сферическими координатами измеренной точки. Декартовы координаты точки i затем вычисляются с использованием уравнений (1) – (3) [14, 15].

$$X = S * \cos V * \cos H_z \quad (1)$$

$$Y = S * \cos V * \sin H_z \quad (2)$$

$$Z = S * \sin V \quad (3)$$

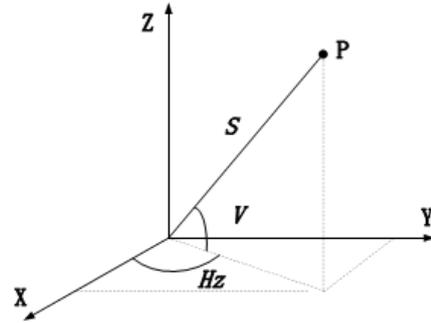


Рисунок 4. Полярная система измерений лазерного трекера, P – контролируемая точка, S – дальность, H_z – угол в горизонтальной плоскости, V – вертикальный угол

Ошибки определения координат определяются выражениями [16]:

$$m_x = \sqrt{(\cos V \cos H_z)^2 m_s^2 + (S \sin V \cos H_z)^2 m_v^2 + (S \cos V \sin H_z)^2 m_{H_z}^2} \quad (4)$$

$$m_y = \sqrt{(\cos V \sin H_z)^2 m_s^2 + (S \sin V \sin H_z)^2 m_v^2 + (S \cos V \cos H_z)^2 m_{H_z}^2} \quad (5)$$

$$m_z = \sqrt{\sin^2 V m_s^2 + (S \cos V)^2 m_v^2} \quad (6)$$

где m_x , m_y и m_z – погрешности определения координат X, Y и Z, m_s – погрешность определения дальности S, мкм, m_v и m_{H_z} – погрешности определения углов, выраженные в мкм.

Замеры проводились в 2 этапа. Режим измерений выбирается оператором в зависимости от сложности измерений и необходимой точности. На первом этапе измерения проводились оператором вручную в режиме ADM (абсолютного дальномера). В данном случае препятствия между трекером и отражателем, ограниченные возможности лазерного трекера и человеческий фактор неизбежно приводят к прерыванию луча в режиме IFM и трекер автоматически переключается в режим ADM. В режиме ADM была измерена поверхность пластины, посредством последовательного касания отражателем объекта измерения и записи координат цели в программное обеспечение SpatialAnalyzer (SA). На рисунках 5 и 6 показаны результаты контроля плоскости пластины до проведения обработки (рисунок 5) и после обработки (рисунок 6).

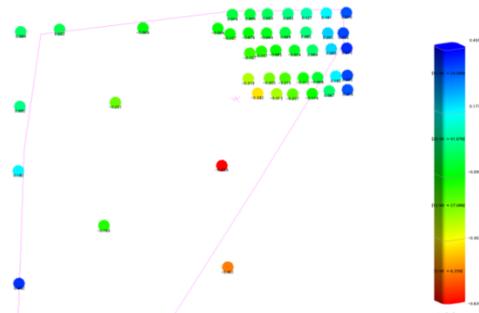


Рисунок 5. Контроль геометрии плоскости пластины до проведения обработки

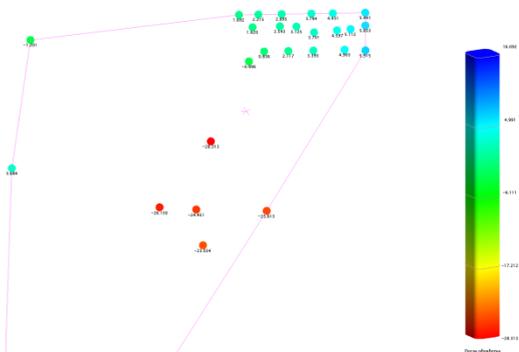


Рисунок 6. Контроль геометрии плоскости пластины после проведения обработки

После замера 48-и точек поверхности пластины необходимо провести анализ на наличие промахов в замере. Для выполнения данной операции в ПО Spatial Analyzer необходимо построить плоскость: Создать – Плоскость – По точкам – выделить нужные точки – «Enter». На основе параметра плоскостность делается вывод о наличии промахов в замере.

Отклонение от плоскостности определяется разностью наибольшего и наименьшего значений и составляет:

$$0,450 - (-0,619) = 1069 \text{ мкм}$$

Согласно свидетельству об утверждении типа, предел допускаемой погрешности объемных (3D) статических измерений абсолютным дальномером ADM, 2σ, составляет ±15 мкм.

Далее приведены формулы расчета абсолютной доверительной погрешности среднего значения измеряемой величины – плоскостности, определяемой по 10 циклам замеров в соответствии с [9, 10].

A - измеряемая величина;

\bar{A} - среднее значение измеряемой величины;

ε - случайная погрешность измеряемой величины;

n - количество выполненных циклов измерений.

Среднее значение угловых величин вычисляется по формуле:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad (7)$$

Среднеквадратическое отклонение вычисляется по формуле:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n - 1} \quad (8)$$

Среднеквадратическое отклонение среднего арифметического (оценки измеряемой величины) вычисляется по формуле:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

Доверительные границы случайной погрешности ε вычисляются по формуле:

$$\varepsilon = t_{p,n-1} S_{\bar{x}} \quad (10)$$

где n – количество выполненных циклов измерений;

$t_{p,n-1}$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности (P=0,95) и числа выполненных циклов измерений (n).

Распределение Стьюдента используется при проведении экспериментов и испытаний для оценки того, насколько вероятно, что истинное значение величины при данном количестве измерений находится в заданном диапазоне, определяемым коэффициентом Стьюдента.

Истинное значение измеряемой величины «A» с доверительной вероятностью «P» лежит в интервале значений от ($\bar{A} - \varepsilon$) до ($\bar{A} + \varepsilon$).

Погрешность центровки отражателя следует исключить путем установки отражателя в одном и том же положении относительно измерительной головки трекара.

Границу неисключенной систематической погрешности (далее НСП) Θ_{Σ} вычисляются по формуле:

$$\Theta_{\Sigma} = \Theta_x \quad (11)$$

где Θ_x – инструментальная погрешность измерений.

Другие составляющие систематической погрешности пренебрежительно малы по сравнению с инструментальной погрешностью.

Расчет суммарной доверительной погрешности измеряемой величины.

Границы доверительной погрешности оценки измеряемой величины вычисляются по формуле:

$$\Delta = K S_{\Sigma} \quad (12)$$

где K – коэффициент, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности и НСП.

Суммарное среднее квадратическое отклонение S_{Σ} оценки измеряемой величины вычисляются по формуле:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_x^2 + S_{\Theta}^2} \quad (13)$$

где S_{Θ} - среднее квадратическое отклонение НСП, которое оценивают по формуле:

$$S_{\Theta} = \frac{\Theta_{\Sigma}}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

где Θ_{Σ} – границы НСП.

Коэффициент K , зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности и НСП вычисляются по формуле:

$$K = \frac{\varepsilon + \Theta_{\Sigma}}{S_{\Theta} + S_{\bar{x}}} \quad (15)$$

Суммарная доверительная погрешность результатов измерений вычисляется по формуле:

$$\Delta \bar{X} = \Delta + \Theta_x + \Theta_{отр} \quad (16)$$

где Θ_x – инструментальная погрешность измерений;

$\Theta_{отр}$ – погрешность центровки отражателя.

Погрешность центровки отражателя следует исключить путём установки отражателя в одном и том же положении относительно измерительной головки трекера.

Таким образом, суммарная погрешность принимает вид:

$$\Delta \bar{X} = \Delta + \Theta_x \quad (14)$$

В результате расчета $\Delta = 17,3627$ мкм $\Delta \bar{X} = 32,3627$ мкм.

На втором этапе был проведён динамический замер смещения пластины во время проведения операции выдавливания (рисунок 7, 8). Измерения проводились в автоматическом режиме IFM (режим интерферометра). Отражатель был неподвижно закреплён и не подвергался воздействию внешних факторов, способствующих прерыванию луча в режиме IFM.

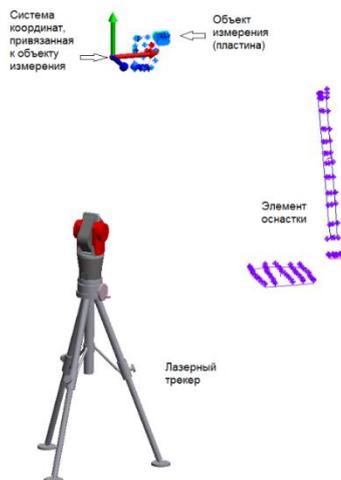


Рисунок 7. Расположение лазерного трекера в процессе проведения измерений

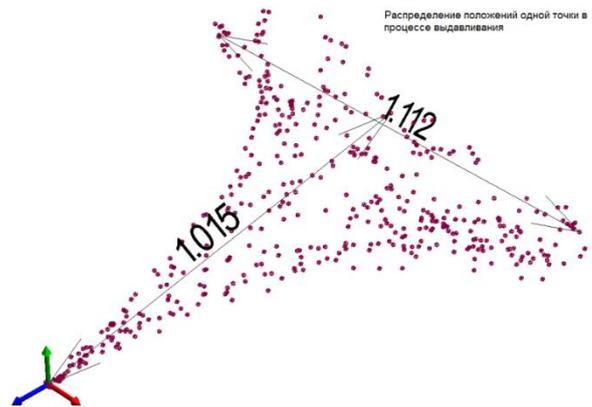


Рисунок 8. Полученное облако точек

Замер проводился с частотой 1Hz (1точка в секунду). Продолжительность замера – 511 секунд, соответственно, было измерено 511 точек. Отражатель был закреплен на оснастке специальным магнитным адаптером. Лазерный трекер работал в режиме сканирования (слежение и запись координат отражателя с заданной частотой).

Трекер располагался на едином основании с оснасткой на расстоянии ~1м от объекта измерения. Единое стабильное основание и малая дистанция минимизируют влияние внешних факторов (вибрация, ветер) на точность измерения. При измерениях использовались уголкового типа отражатели в сферической оболочке диаметром 0,5 дюйма и 1,5 дюйма, а также магнитные адаптеры для установки отражателей. -На первом этапе был использован отражатель диаметром 1,5 дюйма (1 шт.). Такие отражатели удобны в использовании при замерах в ручном режиме. На втором этапе был использован отражатель диаметром 0,5 (1 шт.). Такие отражатели удобны для замеров в автоматическом режиме, они имеют меньший вес, размеры и оказывают наименьшее механическое воздействие на объект измерений.

Результаты измерений обрабатывались в специальном программном обеспечении, используемом для управления координатно-измерительными системами и обработки информации – Spatial Analyzer (SA).

По результатам измерений, проведенных на первом этапе, был проведен анализ координат облака точек, а именно, в SA построена средняя плоскость и от нее определены максимальные отклонения до и после деформации.

По результатам измерений, проведенных на втором этапе, было получено облако координат перемещения одной точки в процессе выдавливания (рисунок 9).

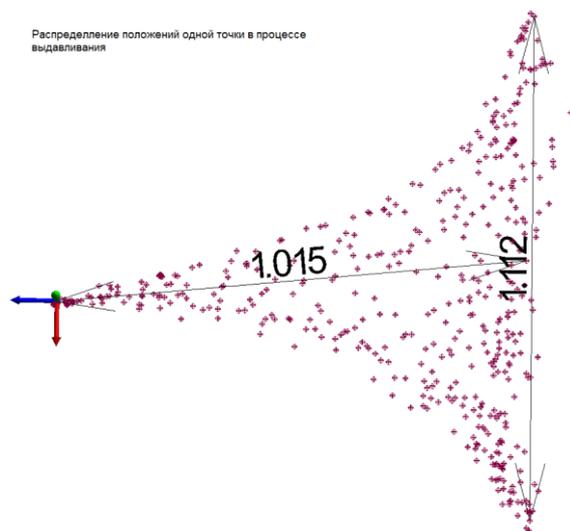


Рисунок 9. Облако точек, полученное в результате динамических измерений

Далее эти трехмерные координаты были импортированы из SA в Excel, где были построены графики перемещения данной точки по каждой из трех осей (рисунок 10).

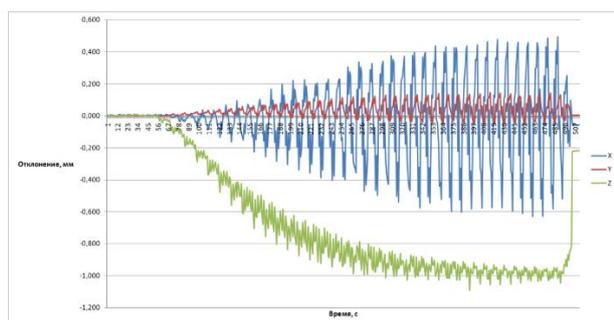


Рисунок 10. Значения перемещения стапеля в трех плоскостях, x – перемещение стапеля вверх-вниз; y – перемещение стапеля влево-вправо; z – перемещение стапеля в глубину изготовления изделия

Из рисунка 10 видно, что наибольшее отклонение стапеля происходит в направлении основного приложения усилия

– в глубину изготовления изделия и составляет значение более 1 мм. Данное значение может оказывать серьезное влияние на точность изготовления деталей. Максимально перемещение стапеля влево-вправо составляет 1 мм, что также может являться критическим значением при изготовлении изделий методом инкрементального формования. Перемещение стапеля вверх-вниз составляет 0,2 мм, что является неудовлетворительным значением.

По результатам измерений можно сделать выводы о том, что необходимо увеличивать жесткость рамы, либо за счет добавления дополнительных креплений, либо за счет применения более жестких материалов ее конструкции.

Желательно использовать трекер при первом пробном изготовлении новой детали методом инкрементального формования для контроля жесткости стапеля.

3 Заключение

В данной работе рассмотрена методика оценки отклонения положения стапеля от начального положения в процессе инкрементального формообразования. Использование автоматизированной измерительной системы на основе лазерного трекера в сочетании с программным пакетом Spatial Analyzer позволяет быстро и достаточно высокой точностью (до 33 мкм) провести оценку состояния технологической оснастки в процессе инкрементального формообразования и определить мероприятия совершенствованию конструкции стапеля с целью повышения точности изготовления изделий.

Список использованных источников

- [1] Чегларек Д. и Ши Дж., 1995, “Уменьшение вариаций размеров для сборки автомобильных кузовов”, *Manuf. Rev.*, 82, стр. 139-154.
- [2] Эндрю Фрэнсис, Пол Маропулос, Глен Маллинье, Патрик Киф. Дизайн для проверки. Процедура CIRP 56 (2016) стр. 61-66.
- [3] Чжэнью Конг, Вэньчжэнь Хуан, Дариуш Чегларек. Анализ видимости для Калибровки монтажного

- приспособления С использованием Преобразования пространства экрана. *Journal of Manufacturing Science and Engineering ABГУСТ* 2005, Том 127 / р/ 622-634.
- [4] Дин Ю., Чегларек Д. и Ши Дж., 2002, “Диагностика неисправностей многоступенчатых производственных процессов с использованием подхода пространства состояний”, *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, 1242, стр. 313-322.
- [5] Р. Флинн, К. Кристенсен, Р. Райан. Автоматизированное Метрологическое Решение Для Сокращения Времени Простоя и Переаттестации Инструмента Без Квалификации. *SAE Int. J. Aerosp.*, 5(1): 2012.
- [6] Г. Ф. Барбоза и Дж. Карвалью, “Аналитическая модель проектирования самолетов на основе концепций Design for Excellence (DFX) и использования композитных материалов, ориентированных на автоматизированные процессы”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, том 69, № 9-12, стр. 2333-2342, август 2013 г.
- [7] Р. Правин, Р. Лингам, Н.В. Редди., Система проектирования траектории движения инструмента для повышения точности при двустороннем инкрементном формовании: аналитическая модель для прогнозирования компенсаций для мелких / крупных деталей. *J. Manuf. Процесс.* 2020, 58, с.510-523.
- [8] Н. А. Сазонникова, В.Н. Илюхин, С.В. Сурудин, Н.Н. Свиначев. Повышение точности движения промышленного робота в процессе инкрементного формования. 2020 Международная конференция по динамике и виброакустике машин, *DVM 2020*. — 2020: 146.
- [9] А. Нубиола, А. Бонев. “Абсолютная калибровка робота ABB IRB1600 с использованием лазерного трекера”. *Робототехника и компьютерно-интегрированное производство*, № 29 (1), февраль 2013 г., стр.236-245.
- [10] Л. Ли, К. Чжао, К. Ли, С. Цинь. ”Определение конечного положения промышленных роботов на основе лазерного трекера”. *Instrumentation Measure Métrologie*, Том 18, № 5, октябрь 2019 г., стр. 459-464
- [11] К. Камали, А. Жубайр, А. Бонев, П. Биграс. “Упругогеометрическая калибровка промышленного робота при разнонаправленных внешних нагрузках с использованием лазерного трекера”. *IEEE Trans Robotics*, Канада, 2016 год.
- [12] Б. Мураликришнан, С. Филлипс и Д. Соьер. Лазерные трекеры для крупномасштабной размерной метрологии: Обзор. *Точное машиностроение*, 44 (2016), стр. 13-28.
- [13] С. Агуадо, Д. Сампер, Дж. Сантолария и Дж. Дж. Агилар, “Стратегия идентификации параметра ошибки при компенсации объемных ошибок станка на основе измерений лазерного трекера”, *Международный журнал станкостроения и производства*, том 53, № 1, стр.160–169.
- [14] Дж.Э. Мюланер, З. Ванг, П. С. Кеог, Дж. Браунелл и Д. Фишер. Неопределенность измерений для верификации крупногабаритных изделий: оценка данных больших авиационных газотурбинных двигателей // *Наука и техника в области измерений*, 27 (2016) 115003 -12pp.
- [15] Дж.Э. Мюланер, О. Мартин, П. Г. Маропулос. Усовершенствованная метрологическая оснастка для аэрокосмической промышленности (МЕТА): Стратегии повышения точности конструкций, изготовленных с помощью кондуктора // *SAE Aerotech measurement Meas. Sci. Технол.* 22 045103 (Тулус: SAE International).
- [16] Петров В. В., Медяников В. О., Краев Е. В. Применение лазерного трекера для контроля положения клиньев статора крупных гидротурбин Гидротехника, 2012, № 5, с. 58-63.
- [17] ГОСТ Р 8.736-2011. Прямые множественные измерения. Методы обработки результатов измерений. Основные положения [Текст]. - Введение. 2013-01-01. - М.: Стандартинформ, 2019. [4] Haibo Tian, Aimin Li, Farong Kou1 (2012), Том 192, “Workspace Analysis and Calculation for the Manipulator of a Explosive-handling Robot in Mine”, *Trans Tech Publications, Switzerland*, pp 211-216.

CONTROL OF EQUIPMENT FOR INCREMENTAL FORMING USING A LASER TRACKER

**Ilyukhin V.N.
Surudin S.V.
Mezentsev D.A.**

Samara University
34, Moskovskoe shosse,
Samara, 443086,
Russian Federation

nasazonnikova@yandex.ru

The technological equipment geometry control has a significant impact on the overall quality and performance of the product in many manufacturing processes such as multi-position assembly and stamping as well as on productivity and production costs. One of the most promising means of technology equipment geometry control in the digital economy condition is a laser tracker. The robotic incremental sheet forming process assumes the necessary flexibility and profitability due to a very flexible tool chain. In this case, the trajectory of the universal tool is set using a processing program determined by the product geometry. The technological equipment geometry control of the robotic complex for incremental sheet forming was carried out in 2 stages. At the first stage, the measurements were carried out manually in the absolute range measuring system mode. At the second stage, a dynamic measurement of the blank plane displacement was carried out automatically in the interferometer mode during forming process. It was shown that the largest slipway deviation more than 1 mm and it occurs in the direction of the main application of force, i.e. in the product manufacture depth. This value can have a serious impact on the of manufacturing parts geometry accuracy. Based on the measurement results, it can be concluded that it is necessary to increase the rigidity of the frame, either by adding additional fasteners, or by using more rigid materials of its construction.

Keywords: laser tracker; incremental forming; slipway; industrial robot; measurement; robotic machining

References

- [1] Ceglarek, D., and Shi, J., 1995, "Dimensional Variation Reduction for Automotive Body Assembly," *Manuf. Rev.*, 82, pp. 139–154.
- [2] Andrew Francis, Paul Maropoulos, Glen Mullineux, Patrick Keogh. *Design for Verification*. Procedia CIRP 56 (2016) pp. 61 – 66.
- [3] Zhenyu Kong, Wenzhen Huang, DariuszCeglarek. *Visibility Analysis for Assembly Fixture Calibration Using Screen Space Transformation*. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* AUGUST 2005, Vol. 127 / p/ 622-634.
- [4] Ding, Y., Ceglarek, D., and Shi, J., 2002, "Fault Diagnosis of Multistage Manufacturing Processes by Using State Space Approach," *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, 1242, pp. 313–322.
- [5] R. Flynn, K. Christensen, R. Ryan. *Automated Metrology Solution To Reduce Downtime and De-Skill Tooling Recertification*. *SAE Int. J. Aerosp.*, 5(1):2012.
- [6] G. F. Barbosa and J. Carvalho, "Analytical model for aircraft design based on Design for Excellence (DFX) concepts and use of composite material oriented to automated processes," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 69, no. 9–12, pp. 2333–2342, Aug. 2013.
- [7] R. Praveen, R. Lingam, N.V Reddy, "Tool path design system to enhance accuracy during double sided incremental forming: An analytical model to predict compensations for small/large components." *J. Manuf. Process.* 2020, 58, pp. 510–523.
- [8] N. A. Sazonnikova, V.N. Ilyukhin, S.V. Surudin, N.N. Svinaryov. *Increasing of the Industrial Robot Movement Accuracy at the Incremental Forming Process*. 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2020. — 2020: 146.
- [9] Nubiola, A. Bonev. "Absolute calibration of an ABB IRB1600 robot using a laser tracker." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, No. 29(1), February 2013, pp. 236-245.
- [10] L. Li, C. Zhao, C. Li, S. Qin. "End Position Detection of Industrial Robots Based on Laser Tracker." *Instrumentation Measure Métrologie*, Vol. 18, No. 5, October, 2019, pp. 459-464.
- [11] K. Kamali, A. Joubair, A. Bonev, P. Bigras. "Elasto-geometrical Calibration of an Industrial Robot under Multidirectional External Loads Using a Laser Tracker." *IEEE Trans Robotics*, Canada, 2016.
- [12] B. Muralikrishnan, S. Phillips, and D. Sawyer. *Laser Trackers for Large Scale Dimensional Metrology: A Review*. *Precision Engineering*, 44 (2016), pp. 13–28.

- [13] S. Aguado, D. Samper, J. Santolaria, and J. J. Aguilar, "Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol.53, no.1, pp.160–169.
- [14] J E Muelaner , Z Wang , P S Keogh , J Brownell and D Fisher. Uncertainty of measurement for large product verification: evaluation of large aero gas turbine engine datums// *Measurement Science and Technology*, 27 (2016) 115003 -12pp.
- [15] J E Muelaner, O Martin, P G Maropoulos. Metrology Enhanced Tooling for Aerospace (META): Strategies for Improved Accuracy of Jig Built Structures// *SAE Aerotech measurement Meas. Sci. Technol.* 22 045103(Toulous: SAE International).
- [16] Petrov V. V., Medyanikov V. O., Kraev E. V. The use of a laser tracker to control the position of the stator wedges of large hydrogenerators *Hydraulic Engineering*, 2012, No. 5, pp. 58-63.
- [17] GOST R 8.736-2011. Direct multiple measurements. Methods of processing measurement results. The main provisions [Text]. - Introduction. 2013-01-01. - Moscow:Standartinform, 2019.[4] Haibo Tian, Aimin Li, Farong Kou1 (2012), Volume 192, "Analysis and calculation of the workspace for the manipulator robot manipulator in the mine", *Trans Tech Publications* Switzerland, pp. 211-216.