

УДК 621.43

Е.К. ГОРДИЕНКО¹, А.В. БЕЛОГУБ²¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина²ОАО «АВТРАМАТ», Харьков, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОРШНЕЙ ДВС

Рассматривается вопрос одновременного повышения точности и производительности механической обработки трехмерной поверхности поршня ДВС на двухкоординатном оборудовании. Проводится комплексный анализ существующей технологической оснастки на предмет неиспользованных резервов по повышению точности готового изделия и производительности обработки, а также численный анализ сил, действующих в приспособлении. Особое внимание уделено модернизации имеющейся оснастки, снижения инерционности её движущихся частей, повышения жесткости и повышения кинематической точности.

Ключевые слова: копирное приспособление, щуп, рычаг, копир, точность, производительность, кинематическая точность, инерционность, поршень, боковая поверхность поршня, прямая задача, обратная задача.

Постановка проблемы в общем виде

Боковая поверхность поршня, по сути, является трехмерной поверхностью. Обработка такой поверхности не представляет особой сложности на оборудовании с количеством управляемых координат три и более. Но стоимость такого оборудования значительно выше, чем двухкоординатного.

Для ОАО «АВТРАМАТ» до сих пор остается актуальным использование существующего парка оборудования. В основном это токарные станки с дополнительной технологической оснасткой для объемного копирования, которая позволяет получить необходимую трехмерную поверхность. При этом общее снижение себестоимости продукции за счёт увеличения производительности при повышении точности геометрических параметров является современной тенденцией машиностроения.

Анализ последних исследований. В работе [1] проведен анализ копирного приспособления на предмет кинематических погрешностей, возникающих в процессе обработки боковой поверхности поршня, и предложена методика устранения возникающих погрешностей корректировкой формы самого копира. В [2] была проведена оценка деформации системы «рычаг – копир – щуп» и ее влияние на точность обработки готового изделия. Было показано, что погрешности от деформации системы при заданных граничных условиях соизмеримы с допуском на получаемый размер.

Целью данной работы является комплексный анализ факторов, влияющих на формообразование

боковой поверхности поршня; выявление преимуществ и недостатков схем обработки и отражение их на конструкции оснастки; численная оценка силовых факторов; подготовка теоретической базы процесса получения боковой поверхности поршня.

Основная часть

Существует несколько схем копирных обработок. Остановимся на схемах, которые применяются на ОАО «АВТРАМАТ» (рис. 1).

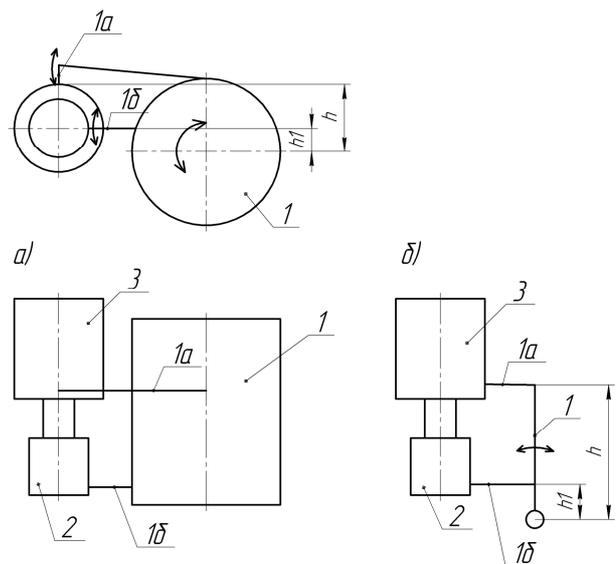


Рис. 1. Схемы копирной обработки:
1 – рычаг (передающее звено); 1а – щуп;
1б – резец; 2 – деталь; 3 – копир

Приспособление, изображенное на рис. 1, а, имеет ось качания, направленную вдоль оси вращения заготовки. Особенностью такого приспособления является изменение главного переднего угла резания во время обработки. В копирном приспособлении с осью качания, перпендикулярной оси вращения детали (рис. 2, б), при отработке движений по копиру имеет место так называемое «рыскание» резца, что с точки зрения резания характеризуется изменениями главного и вспомогательного углов в плане в процессе обработки. В дальнейшем мы будем рассматривать приспособление, изображенное на рис. 2, б.

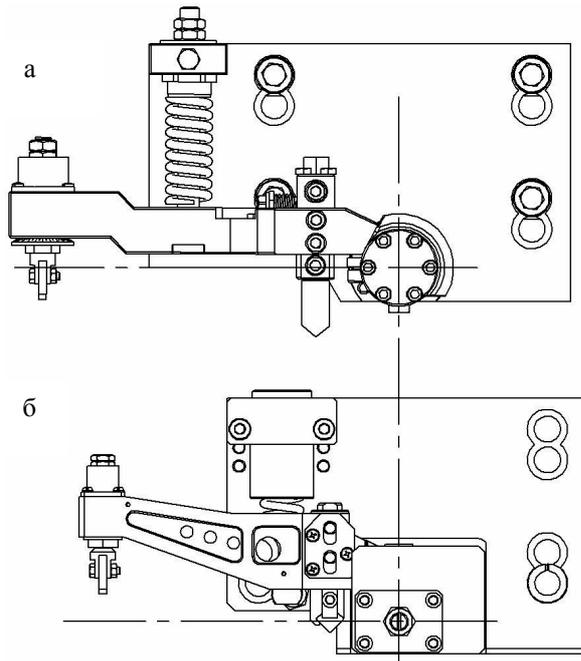


Рис. 2. Модернизация копирного приспособления

Копирное приспособление

Рассмотрим принцип работы копирного приспособления. Копир закреплен на шпинделе станка и вращается вместе с ним. Геометрия копира в сечениях плоскостями, проходящими через ось его вращения, представляет собой профиль в виде «бочки», а в сечениях плоскостями, перпендикулярными оси вращения, – овал. Суппорт станка, на котором установлено копирное приспособление, движется вдоль оси вращения шпинделя (копира) с определенной подачей, которая зависит от оборотов шпинделя.

Щуп, расположенный на рычаге приспособления, безотрывно движется по копиру. Благодаря трехмерной поверхности копира, рычаг совершает качательные движения в плоскости, параллельной плоскости движения суппорта и пересекающейся с осью вращения шпинделя. Резец, закрепленный на

рычаге, обрабатывает деталь по копиру. Поверхность копира переносится не «один к одному», а некоторым передаточным отношением $h1/h$ (рис. 1). Это используется для уменьшения погрешности изготовления копира, которая переносится на поршень.

Нас интересует комплексное повышение точности готового изделия и производительности обработки. Поэтому удобно условно разделить все, связанные с этим, факторы на:

- кинематические (влияющие на теоретическую точность переноса формы с поверхности копира на деталь);
- динамические (влияющие на инерционность движущихся элементов).

Модернизации было подвергнуто приспособление, изображенное на рис. 2, а (приспособление после модернизации – рис. 2, б).

Среди нововведений, которые отражаются на кинематической точности (рис. 3), можно отметить использование схемы с максимальным приближением вершины резца к оси качания рычага (рис. 3, б). Использование такого подхода уменьшает отклонения передаточного отношения от номинального значения при таких же углах качания, как и на схеме (рис. 3, а).

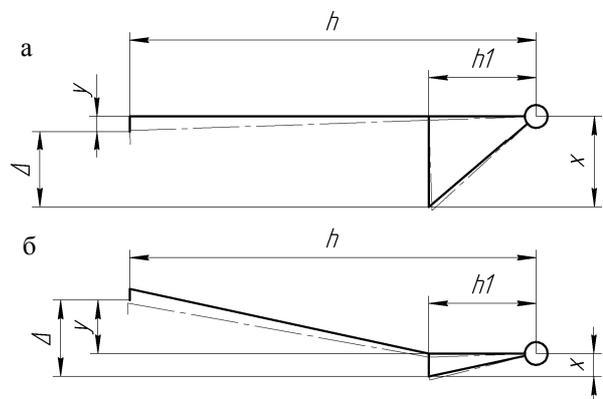


Рис. 3. Изменения с точки зрения кинематики

Другая часть нововведений посвящена уменьшению массы движущихся частей приспособления, как раз это и позволит увеличить производительность обработки.

На рычаг с одной стороны действуют переменные силы со стороны щупа и резца, а с другой – они должны быть скомпенсированы усилием пружины.

Запишем уравнение моментов для рычага, относительно оси качания:

$$F_{\text{пр}} \cdot h_{\text{пр}} = F_{\text{рез.}} \cdot h1 + F_{\text{инерц.}} \cdot h, \quad (1)$$

где $F_{\text{пр}}$ – усилие, развиваемое пружиной;

$F_{\text{рез.}}$ – радиальная составляющая силы резания;

$F_{инерц.}$ – сила инерции рычага, приведенная в плоскость щупа;

$h_{пр}$, h_1 , h – плечи действия сил $F_{пр}$, $F_{рез.}$, $F_{инерц.}$ относительно оси качания рычага.

Закон движения щупа по копиру можно выразить:

$$r(t) = f [R(\varphi, z), \varphi(t), z(t)]; \quad (2)$$

$$\varphi(t) = 2\pi n_{шп} t; \quad (3)$$

$$z(t) = \frac{S}{2\pi} \varphi(t), \quad (4)$$

где $R(\varphi, z)$ – функция изменения формы копира;

$\varphi(t)$ – закон изменения угла поворота копира от времени;

$n_{шп}$ – обороты шпинделя (копира);

$z(t)$ – закон перемещения щупа вдоль копира от времени;

t – время;

S – подача.

Силы $F_{рез.}$, $F_{инерц.}$ носят переменный характер и могут быть выражены через функцию изменения формы копира (2):

$$F_{рез.}(t) = 0,4 \cdot 10 \cdot C_p \cdot \left(r(t) \cdot \frac{h_1}{h} + T \right)^X \cdot S^Y; \quad (5)$$

$$F_{инерц.}(t) = \frac{d^2(r(t))}{dt^2} \cdot m_{\Sigma}, \quad (6)$$

где C_p , x , y – табличные данные, зависящие от вида обработки и свойств материала;

h_1/h – передаточное отношение;

T – постоянная составляющая глубины резания;

m_{Σ} – суммарная масса движущихся частей, приведенная в плоскость щупа.

Из вышеприведенного следует, что для повышения оборотов шпинделя и, следовательно, производительности при неизменном усилии пружины необходимо уменьшать движущиеся массы m_{Σ} .

Усилие пружины, с одной стороны, должно обеспечить безотрывное движение щупа по копиру, а с другой – усилие необходимо снижать, для увеличения стойкости щупа, т.е. стабильности получаемых размеров.

Изменения конструкции, улучшающие динамические свойства приспособления:

1. Доработка рычага (рис. 4):

– применен алюминиевый сплав, как и в случае, показанном на рис. 2, а, только жесткость рычага была увеличена:

а) максимальный прогиб уменьшился в 5,4 раза при усилии 1000 Н, развиваемом пружиной, при

значительном уменьшении его массы (рис. 4, б);

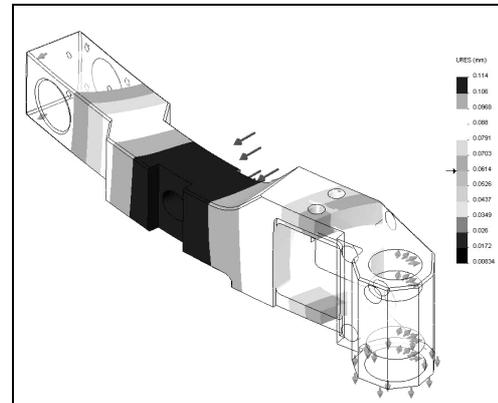
б) максимальный прогиб вдоль оси крепления реза уменьшился с 0,065 мм до 0,0135 мм;

– уменьшение момента инерции рычага с 136,9 кг/см² до 76,39 кг/см²;

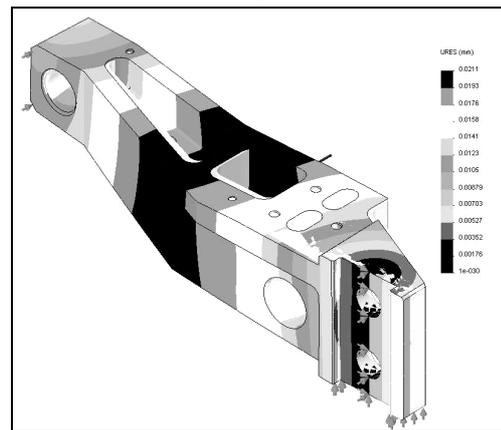
– при неизменном передаточном отношении уменьшено расстояние от центра качания до оси щупа с 228,4 мм до 189,7 мм.

2. Доработан узел щупа, его масса снижена с 295 г до 137,5 г.

3. Доработан узел пружины. Пружина той же жесткости имеет меньшую массу, сам узел сдвинут ближе к оси качания рычага, что благоприятно сказывается на значениях приведенной массы. Внутри пружины отсутствует стальной шток, который ранее качался вместе с рычагом. Эти мероприятия способствуют уменьшению момента инерции качающегося узла. Усилие, развиваемое пружиной, теперь регулируется в широком диапазоне.



а



б

Рис. 4. Доработка рычага:
а – до доработки; б – после доработки

Численный анализ сил, действующих в приспособлении

Численный анализ необходим для определения оптимального усилии пружины, исходя из условия безотрывного движения щупа по копиру. Опреде-

лим это усилие из уравнения (1) на примере копира для поршня 21128 - 1004015Н (рис. 5).

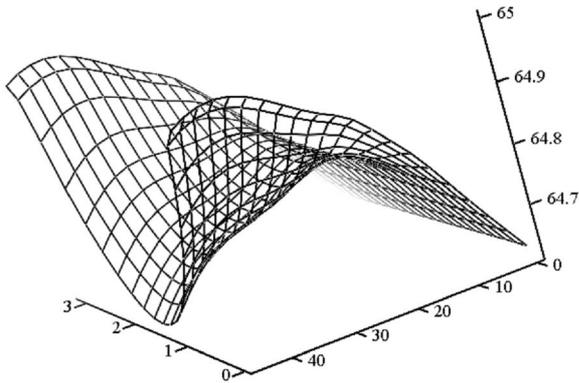


Рис. 5. Профиль копира

Продифференцировав функцию профиля по каждой из координат (рис. 6), получим скорости и ускорения щупа.

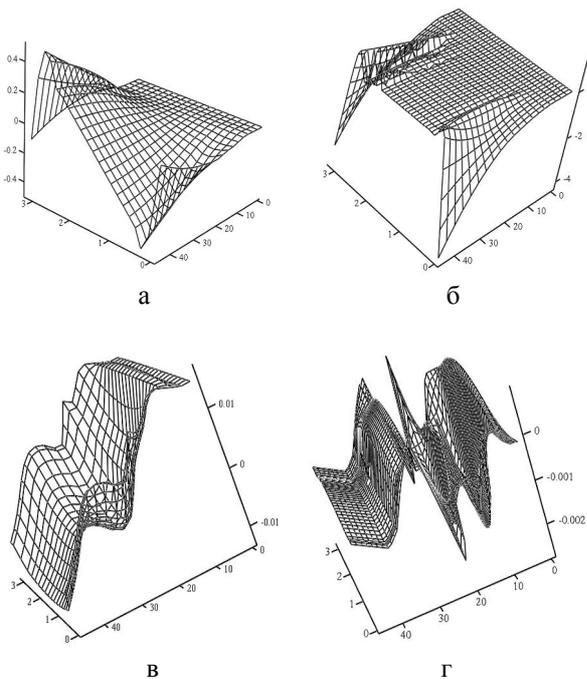


Рис. 6. Частные производные 1-го и 2-го порядков функции формы профиля по каждой из переменных: а, б – по углу поворота; в, г – по перемещению вдоль оси копира

Анализируя поверхности ускорений (рис. 6, б, г), заметим, что ускорение щупа в большей степени определяется изменением овала, чем изменением профиля. Это означает, что максимальные значения сил инерции будут в сечении с наиболее выраженным овалом, т.е. для $z = 45$ мм. На основании рассчитанных по (6) максимальных значений сил инерции в зависимости от оборотов построим характери-

стику для движущихся масс обоих копирных приспособлений (рис. 7). Пунктирная линия соответствует приспособлению до модернизации.

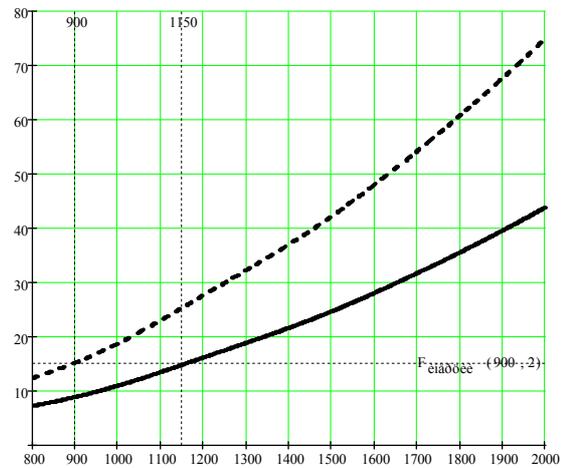


Рис. 7. Зависимость максимальных значений сил инерции (Н) от оборотов шпинделя (об/мин)

Очевидно, что благодаря уменьшению инерционности движущихся частей приспособления, мы можем увеличить частоту вращения шпинделя на 27,8% (с 900 до 1150 об/мин).

Радиальная составляющая силы резания рассчитывается по эмпирической формуле (5), взятой из [3]. В данной формуле не учтена зависимость силы резания от скорости резания. Максимальные значения силы резания соответствуют максимальной глубине резания. В нашем случае это сечения $z = 0$ мм и $z = 45$ мм. Т.к. нас интересует максимальное суммарное значение моментов сил, которым противодействует пружина, то в дальнейшем будем рассматривать сечение $z = 45$ мм.

Определим силы инерции, радиальные силы резания и усилие пружины для «половинки» копира в сечении $z = 45$ мм, учитывая плечи на которых действуют эти силы (рис. 8) при $n = 1150$ об/мин.

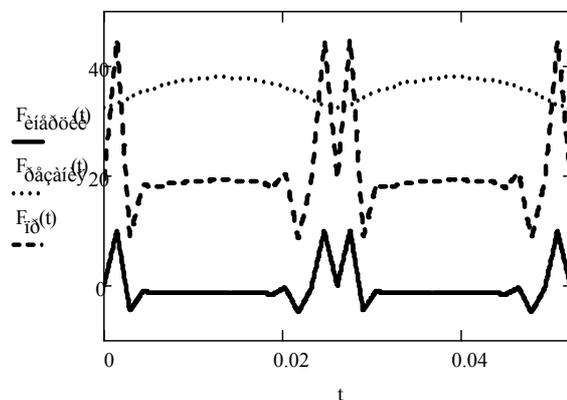


Рис. 8. Силы, действующие в приспособлении

Подготовка теоретической базы процесса формообразования боковой поверхности поршня ДВС

За основу расчёта формы копира взята методика, описанная в [1]. Она подразумевает два допущения:

- сила прижатия щупа к копиру постоянна;
- при первом пробном проходе построения идеального копира так называемым «острым» щупом передаточное отношение неизменно.

А также износ щупа учитывается в плоскости профиля (рис. 5, а), а в плоскости овала не учтен (рис. 5, б).

Предлагается, дополнив существующую методику износа щупа и взяв в учет силы резания и силы инерции, подготовить теоретическую базу процесса формообразования боковой поверхности поршня ДВС, основные принципы которой описаны ниже:

1. Решение обратной задачи. С помощью существующих расчетных пакетов для анализа кинематики и динамики механизмов (например, Cosmos Motion) проводится пробный проход для создания идеального копира с учетом изменения передаточного отношения во время обработки («рыскания» щупа вдоль копира). Резец безотрывно обкатывается по поршню, а щуп нулевой толщины при этом «рисует» профиль идеального копира.

2. Проводится силовой анализ приспособления: на основании режимов резания определяются силы действующие в приспособлении. Силы прикладываются к узлам приспособления. Если погрешности вследствие деформации соизмеримы с допуском на размер, то в дальнейшем они должны быть учтены.

3. Моделируется износ щупа по уточненной методике, подразумевающей учет формы в обоих направлениях (рис. 9, А, Б) и переменную силу прижатия к копиру. Получаем поверхность изношенного щупа.

4. Решение прямой задачи. Полученный в п.1 копир, уточняется исходя из формы изношенного щупа (см. п. 2) и деформаций рычага (см. п. 3). С использованием того же расчетного пакета по вновь полученному копиру «обкатывается» щуп под влиянием силы резания, сил инерции и силы прижатия пружины. Максимальные обороты выбираются по одному из критериев:

- отрыв щупа от копира;
- ограничение по скорости резания.

Решением прямой задачи является полученная форма поршня.

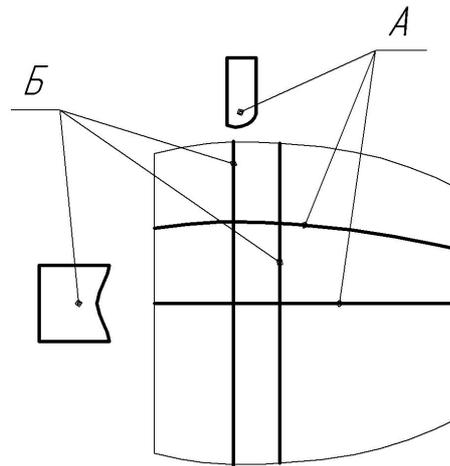


Рис. 9. Износ щупа от соприкосновения с копиром:
А – в плоскости профиля «бочки»;
Б – в плоскости овала

Выводы

1. Силовой анализ позволяет более точно определить граничные условия для дальнейшей оценки деформаций в приспособлении.

2. Сила резания определена эмпирически, во внимание взят тот факт, что она изменяет своё значение во времени. В дальнейшем планируется провести эксперимент и сопоставить полученные значения с расчётными.

3. Инерционная составляющая сил, действующих на рычаг, уменьшена, что позволит увеличить частоту вращения шпинделя на 27,8%.

Литература

1. К вопросу о финишных операциях при обработке поршня: *Авиационно-космическая техника и технология* // А.В. Белогуб, О.А. Солоха, А.Г. Щербина, А.С. Стрибуль, Ю.А. Гусев // Сб. науч. тр. Харьковского авиационного института. – Х., 2003. – Вып. 40. – С. 146-149.
2. Сатич Н.Л. Учет технологических факторов, влияющих на точность получения внешней поверхности юбки поршня и оценка возможности снижения брака в производстве / Н.Л. Сатич, А.В. Белогуб, А.С. Стрибуль // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2005. – № 2. – С. 70-73.
3. *Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т.* / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мецгерякова, А.Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – Т. 2. – С. 371-372.

Поступила в редакцию 30.05.2009

Рецензент: канд. техн. наук, проф. Ю.А. Гусев, Харьковский национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ТОЧНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ БОКОВОЇ ПОВЕРХНІ ПОРШНІВ ДВЗ

Є.К. Гордієнко, О.В. Білогуб

Розглядається питання одночасного підвищення точності та продуктивності механічної обробки трьох-мірної поверхні поршнів ДВЗ на двохкоординатному обладнанні. Проводиться комплексний аналіз існуючих технологічної оснастки на предмет невикористаних резервів по підвищенню точності готового виробу та продуктивності обробки, а також чисельний аналіз сил, котрі діють в оснастці. Особливу увагу приділено модернізації наявної оснастки для зниження її інерційності, підвищення жорсткості та підвищення кінематичної точності.

Ключові слова: копіювальний пристрій, щуп, копір, точність, продуктивність, кінематична точність, інерційність, поршень, бокова поверхня поршня, пряма задача, обернена задача.

INCREASING OF EFFICIENCY AND ACCURACY OF THE MACHINING OF THE LATERAL SURFACE OF PISTONS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

E.K. Gordienko, A.V. Belogub

The question of increasing of the efficiency together with increasing of the accuracy of the machining of three-dimensional surface of pistons of an internal combustion engines is examined on the two-axis-controlled equipment. The complex analysis of available technological equipment is realised for detection the unused reserves for the expansion of the accuracy of finished product and efficiency of the machining, and the numerical analysis of the forces which are have an actions in the device is also examine. Particular attention is given to modernization of available technological equipment for its inertance decrease, increasing of inflexibility and kinematic accuracy.

Key words: contour follower, probe, profile templet, accuracy, productivity, kinematic accuracy, time lag, piston, lateral surface of piston, direct problem, inverse problem.

Гордієнко Евгений Константинович – аспирант кафедри конструкції авіаційних двигателів Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна, e-mail: gordienko_ek@mail.ru.

Білогуб Александр Витальевич – канд. техн. наук, технічний директор ОАО «АВТРАМАТ», Харків, Україна, e-mail: a_belogub@mail.ru.