

УДК 621.452.3

В.Ф. МОЗГОВОЙ, К.Б. БАЛУШОК, И.И. КОТОВ, В.А.ПАНАСЕНКО, М.К. БИРУК*ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина***СТРАТЕГИИ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК МОНОКОЛЁС
НА ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ С ЧПУ С ПЕРЕМЕННОЙ 3D-КОРРЕКЦИЕЙ**

Рассмотрены вопросы технологической подготовки производства для обработки лопаток моноколёс авиационных двигателей на современных обрабатывающих станках с ЧПУ фрезерной группы. Изложены проблемы обработки и описаны пути достижения требуемой точности и шероховатости поверхностей длинномерных лопаток на основе применения математических методов расчёта и эмпирических закономерностей, положенных в основу применения переменной 3D-коррекции для гибкой корректировки управляющих программ на основе параметрического прогаммирования. Проведенные исследования на станках с ЧПУ показали высокую эффективность применения данного метода при решении технологических задач по обработке лопаток моноколёс.

Ключевые слова: моноколесо, лопатка, станок с ЧПУ, вектор нормали, отклонение, жёсткость, упругая деформация, шероховатость, точность обработки.

Введение

Совершенствование конструкции авиационных двигателей идёт по пути ужесточения рабочих характеристик за счёт усложнения конструкций основных деталей и узлов, применения новых композиционных материалов, способных выдерживать повышенные температурные и динамические нагрузки. Это обуславливает поиск новых методов обработки и решения актуальных технологических задач. Одной из актуальных проблем современного авиадвигателестроения являются вопросы, связанные с проблематикой обработки моноколёс и ЦБК. Одним из самых сложных их компонентов являются лопатки. Лопатки характеризуются как наиболее нагруженные и трудоёмкие в изготовлении детали моноколёс. Точность изготовления, шероховатость поверхностей лопаток, частотные характеристики являются основными критериями оценки качества изделия в целом. Наряду с другими важными требованиями, от этих параметров зависят общие характеристики работы всего двигателя.

Как известно, и это подтверждено многочисленными исследованиями, источниками погрешностей при любой механической обработке, а для высокоскоростной – особенно, является недостаточная жёсткость системы СПИД [1]. При высокоскоростном фрезеровании обеспечиваются необходимые параметры качества обработки, стойкость инструмента и необходимая производительность. В совокупности технологическая система, включающая составляющие - деталь, инструмент, приспособление, станок, не является идеально жёсткой. Кроме

того, структурные составляющие – шпиндель станка инструментальная оправка, приспособление приносят свои погрешности [2].

Все эти факторы негативно влияют при обработке лопаток на выполнение конструкторских требований чертежа.

Цель работы. Поиск оптимальных решений по устранению негативного влияния вредных факторов при обработке нежёстких лопаток осевых моноколёс на обрабатывающих центрах с ЧПУ. К рассмотрению предлагается метод применения переменной 3D-коррекции, призванной компенсировать влияние нежёсткой конструкции лопаток, случайных, технологических и др. факторов на точностные характеристики обработанных лопаток моноколёс. Значение коррекции вводится как переменная величина в зависимости от местоположения точки контакта инструмента с деталью по высоте лопатки, что позволило достичь желаемого результата.

Результаты экспериментальных исследований

Конструкция осевых моноколёс ГТД, требуемая точность, геометрические характеристики и необходимая шероховатость лопаток (табл. 1) обусловили поиск принципиально новых методов обработки, а также решения сложных технологических задач. Существенное влияние на трудоёмкость изготовления и методы достижения результатов оказывают физико-механические свойства современных титановых и жаропрочных сплавов, из которых изготовлены моноколёса [3].

Таблица 1
Геометрическая характеристика
колёса 1-й ступени КНД

Параметры колеса	Колесо 1-й ступени КНД
Высота лопатки, мм	120
Толщина S_{max} , мм верхнего сечения нижнего сечения	2,81 10,35
Хорда L_{max} , мм верхнего сечения нижнего сечения	119,88 116,1
R_{min} , мм входной кромки выходной кромки	0,363 0,373
R_{max} , мм входной кромки выходной кромки	0,78 0,762
Шероховатость, R_a , мкм	0,4 \sqrt
Отклонение точек профиля, мм	не больше 0,06

На АО "Мотор Сич" обрабатываются различного класса моноколёса. Получистовая и чистовая обработка лопаток моноколёса выполняется методом высокоскоростного фрезерования на 5-ти координатных станках фирмы HERMLE. Одним из прогрессивных методов чистовой обработки лопаток является спиральный метод прохода конической фрезой вокруг лопатки, обеспечивающий стабильную нагрузку на режущую часть инструмента [2]. Это минимизирует влияние технологических факторов на величину возникающих погрешностей [4].

При данном методе обработки фреза, обкатывая лопатку по снижающейся спирали, касается профиля пера лопатки в точке [3]. Тело фрезы при обкатке в любом положении имеет гарантированный боковой угол относительно поверхности, что обеспечивает точечный контакт. Этот угол назначается технологом-программистом на этапе создания прохода инструмента в САМ-системе, поддерживающей 5-ти координатную стратегию обработки.

Для отработки нового метода был выбран диск моноколёса 1-й ступени КНД изделия АИ-222. Предварительно была построена математическая модель моноколёса (рис. 1).

Колесо характеризуется большим наружным диаметром - $\varnothing 700$ мм, длинномерными и относительно тонкими лопатками длиной 120 мм с мини-

мальным S_{max} по высоте (рис. 2). Колесо выполнено из титанового сплава ВТ6.

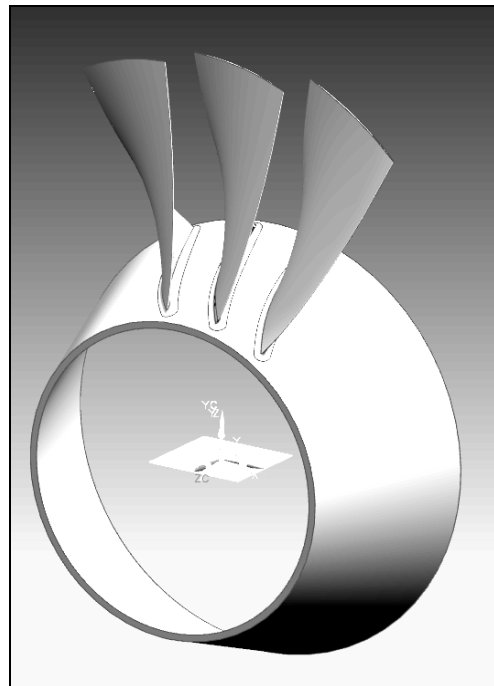


Рис. 1. Фрагмент матмодели осевого колеса 1-й ступени КНД

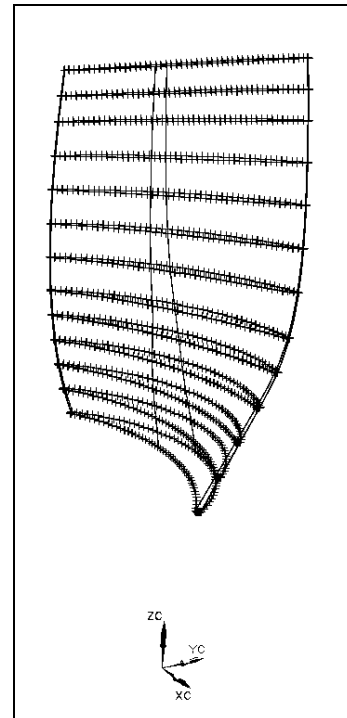


Рис. 2. Профиль сечений колеса 1-й ступени КНД

Первые результаты опробования показали, что для получения стабильного результата при 5-ти координатной обработке лопаток (рис. 3) необходима

3D-коррекция инструмента. Причём, коррекция не должен быть связана с глобальным пересчётом траектории движения инструмента через САМ-систему. И такое решение было найдено.

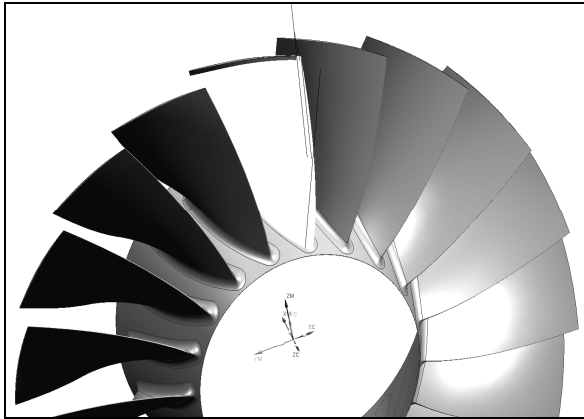


Рис. 3. 5-ти координатная спиральная обработка лопаток моноколеса 1-ой ступени КНД

В результате совместной работы специалистов АО “Мотор Сич” и специалистов ЗАО ГК “Постпроцессор” (г. Москва) была разработана и внедрена методика трёхмерной коррекции, апробированная при высокоскоростной обработке моноколёс и ЦБК на станках фирмы HERMLE. Параллельно был разработан и отлажен постпроцессор на модельный ряд станков HERMLE – C30U, C40U и C50U (рис. 4).



Рис. 4. 5-ти координатный высокоскоростной обрабатывающий центр C50U фирмы HERMLE

В качестве базовой системы расчёта траектории движения инструмента была применена CAD/CAM-система UG-NX8.0. Разработанная автоматизация подготовки управляющих программ под UG-NX8.0 полностью удовлетворяла требованиям технологии и безопасности работы оборудования.

Предложенная стратегия обработки и применение 3D-коррекции инструмента при непрерывном 5-ти координатном движении инструмента позволили выполнить конструкторские требования по шероховатости и точности, предъявляемые к лопаткам. Выполнить 3D-коррекцию в этом случае означало “отодвинуть” или “придвинуть” фрезу на величину коррекции к обрабатываемой поверхности по вектору нормали в точке контакта инструмента с деталью (рис. 5). В данном случае величина коррекции определялась как ΔR отклонения фактического радиуса фрезы от расчётного.

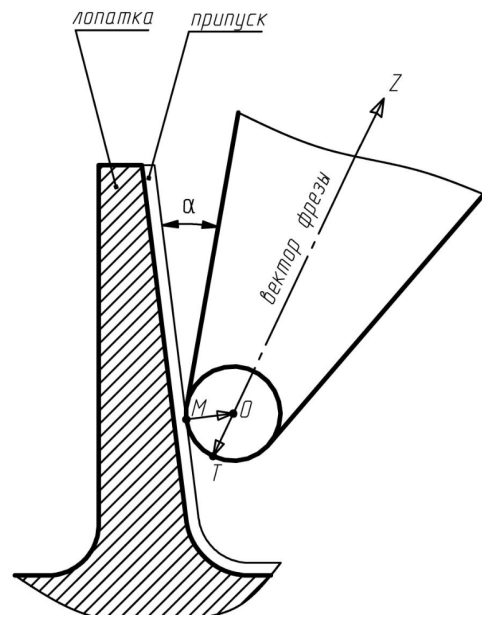


Рис. 5. МО–вектор нормали к поверхности в точке касания; ОТ – вектор оси инструмента

Производство не стоит на месте, и первые результаты работы в цеху потребовали быстрой корректировки управляющих программ без глобального пересчёта УП. И такое решение снова было найдено. Специалисты предложили не ограничиваться применением коррекции, зависящей от изменения радиуса инструмента, а пошли дальше, предложив вводить коррекцию на “оставляемый припуск” к обрабатываемой поверхности, причём, припуск с положительным или отрицательным знаком. Это значительно расширило возможности управляющей программы, повысило её мобильность.

В общем случае, коррекция суммировалась из двух составляющих – величины желаемого припуска на поверхности лопатки (как отмечалось выше, он может быть как с плюсом, так и с минусом) и величины “посадки” инструмента - износа радиуса сферы фрезы. Эти величины независимы друг от друга, но могут работать и одновременно, суммируясь друг с другом. Чтобы “разнести” эти величины в УП им были присвоены имена разных параметров.

При всех равных условиях технологические методы достижения заданных параметров считаем равными. 3D-коррекция при 5-ти координатной обработке методом "оставляемого припуска" реализуется математическим смещением фрезы в пространстве по нормали к поверхности в точке контакта. При этом, в каждом кадре программы пересчитывается координата управляемой точки (Т) фрезы – вершины (рис. 5). Фреза занимает новое рассчитанное положение относительно обрабатываемой поверхности в соответствии со знаком и величиной коррекции.

Смещение точки будет тем больше, чем больше величина припуска (коррекции) и дельта изменения величины радиуса инструмента (ΔR). Пересчёт новых координат инструмента происходит непосредственно в каждом кадре УП через параметрическое программирование. Здесь особо важное значение приобретает быстродействие УЧПУ станка. Чем выше быстродействие УЧПУ, тем быстрее движется инструмент, и тем соответственно, выше скорость обработки. Самые скоростные промышленные системы управления демонстрируют быстродействие порядка 400 мкс (0,0004с) [4]. Этого достаточно для обеспечения непрерывного и быстрого расчёта кадров программы и подачи их на выполнение.

Однако, при чистовом фрезеровании тонкотельных высоких лопаток моноколёс технологи неожиданно столкнулись с проблемой недопустимых отклонений по высоте лопаток. Эти отклонения были ярко выражены при обработке высоких и нежестких лопаток. При обмерах выяснилось, что отклонения носят циклический характер и увеличиваются от прикомлевой зоны к периферии со знаком плюс. Частотная характеристика лопаток находилась в области верхних допустимых пределов и не удовлетворяла требованиям чертежа после ручной полировки лопаток.

Как выяснилось, принцип применения 3D-коррекции в "чистом" виде не всегда решал задачу достижения конструкторских требований по допустимым отклонениям точек профиля пера лопаток.

Этот принцип при обработке высоких и нежестких лопаток давал нестабильный результат, и в большинстве случаев, не удовлетворял конструкторским требованиям. На вершине лопаток отмечались отклонения в плюс, а в нижних сечениях – в минус (рис. 6), хотя величина коррекции равномерно "работала" по всей высоте лопатки.

Применение демпфирующей массы в межлопаточном пространстве моноколёс не решал вопрос стабильности получаемых отклонений точек профиля, хотя, всё же играл некоторую положительную роль для повышения общей жёсткости лопаток при фрезеровании.

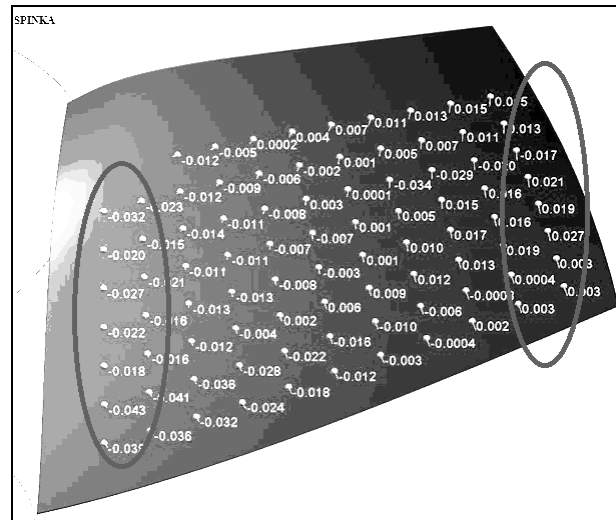


Рис. 6. Отклонения точек профиля сечений (корыта) лопатки колеса 1-й ступени КНД

Исследованиями установлено, что отрицательные действующие технологические факторы являются причиной возникновения погрешностей и недопустимых отклонений при обработке лопаток [3]. Однако, существовала и ещё одна причина получаемых отклонений. Она заключалась в физико-механических свойствах обрабатываемого материала и конструкции моноколеса.

Выполненные замеры точек профиля пера лопатки должны были дать одинаковые отклонения по всему профилю. Однако, на периферии лопатки величина припуска оказывалась больше, а к основанию, возле радиуса, сопряжения поверхности лопатки со ступицей, припуск уменьшался тем сильнее, чем выше была высота лопатки. Получался, как бы, обратный конус на лопатке. Возникла необходимость в решении технологической задачи, и в первую очередь, необходимо было найти метод компенсации возникающих отклонений.

Специалисты предположили, что причиной отклонений точек профиля на периферии лопаток является упругая деформация лопаток, возникающая от действующих сил резания на нежесткую конструкцию лопатки. Возникал консольный упругий изгиб лопатки.

Стало очевидно, что при обработке нежестких и высоких лопаток необходим новый принцип применения переменной или "адресной" коррекции инструмента, величина которой зависела бы от положения точки контакта инструмента с деталью по высоте лопатки.

Метод реализации идеи пришёл не сразу. Ведь давно известно, что создание управляющих программ 5-ти координатной обработки немыслимо без правильно построенной математической модели, если речь идет о сложной криволинейной поверхности

сти. Один из вариантов получения переменного припуска вытекает из предыдущей фразы – сделать модель лопатки постепенно расширяющуюся или сужающуюся в каждом сечении относительно номинала.

Однако, такая концепция громоздка и не давала нужного эффекта по следующим причинам:

- создать такую технологическую модель не так просто – требуется высококвалифицированный специалист;
- если выбранные “добавки” к припуску выбраны неудачно – модель потребует перестраивать, а это дополнительная потеря времени;
- при создании модели высока вероятность ошибки;
- технолог-программист должен фактически перемоделировать конструкторскую модель лопатки, что меняет авторство и смещает акцент ответственности за конструкцию лопатки.

Специалисты отдела программных станков АО “Мотор Сич” пошли другим путем. Отправной точкой для реализации применения переменного припуска являлась существующая управляющая программа с 3D-коррекцией. Специальными независимым программным обеспечением программа преобразовывается в параметрический вид, который позволяет:

1. Вводить компенсирующие добавки к заданному припуску прямо на станке руками оператора.
2. При наличии на станке измерительных щупов проводить замеры, и сразу же проверять правильность обработки.
3. При неудачно подобранных величинах коррекции, не отходя от станка, быстро менять их, и снова запустить обработку.

Суть метода заключается в следующем. Если обычная 3D-коррекция позволяет задать равномерный по всей поверхности обрабатываемой детали дополнительный припуск (как с плюсом, так и с минусом), то переменная коррекция даёт возможность изменять его по ходу движения фрезы вдоль высоты лопатки, автоматически изменяя величину коррекции на каждом витке фрезы. Изменение величины коррекции по высоте лопатки происходит по линейному закону между граничными значениями вводимой коррекции сверху и внизу лопатки, заданной через параметрическое программирование.

Применение переменной коррекции, как показала практика, наиболее целесообразно при спиральной обработке высоких лопаток. Это даёт возможность компенсировать отклонения точек профиля, вызванные упругой деформацией верхней части лопаток.

Применение переменной коррекции или, иными словами, “адресного” припуска, позволило до-

биться равномерного отклонения точек профиля по высоте лопатки. Для этого на первом витке спирали задается необходимая отрицательная добавка к припуску, а на последнем – положительная. Между ними величина припуска постепенно изменяется от витка к витку по линейному закону (рис. 7).

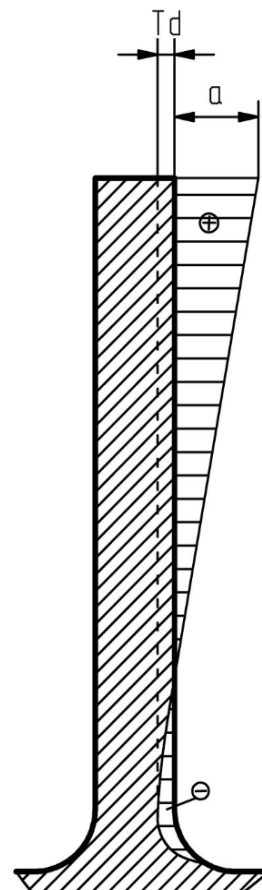


Рис. 7. Отклонения точек профиля пера по высоте лопатки

Такой подход при правильном назначении величины граничной коррекции (рис. 8) полностью компенсировал механические погрешности обработки (затягивание фрезы в области комля и упругую деформацию лопатки на периферии).

Методика переменной коррекции применима для любого пятикоординатного станка со стойкой SINUMERIK-840D при условии, что исходная управляющая программа создана с применением 3D-коррекции.

Обрабатываемыми деталями могут быть как моноколеса, так и одиночные лопатки.

Переменный припуск активно используется отделом программных станков АО «Мотор Сич» на станках HERMLE при обработке моноколес и одиночных лопаток.

Полученные результаты применения переменной 3D-коррекции приведены на рис. 9 и в табл. 2.

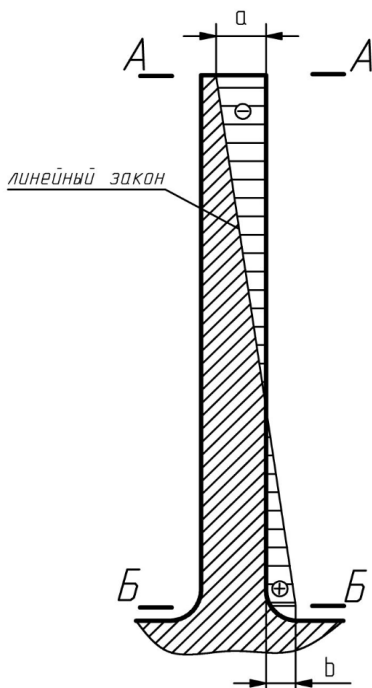


Рис. 8. Определение коррекции "а" в сечении А-А и коррекции "b" в сечении Б-Б лопатки

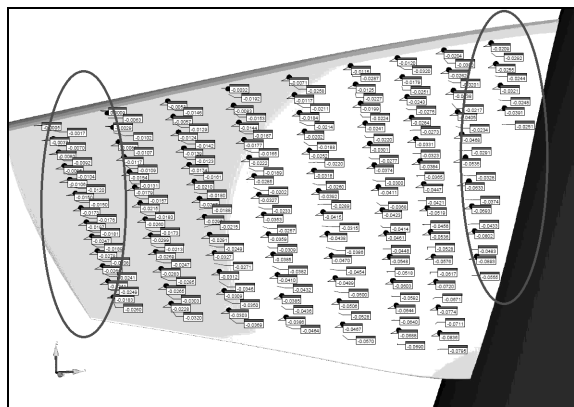


Рис. 9. Отклонения точек профиля сечений лопатки после применения переменной 3D-коррекции

Таблица 2

Отклонения точек профиля пера лопатки после применения переменной 3D коррекции

Сечение	Лопатка №1	Лопатка №5
	Отклонение ПП, мм	Отклонение ПП, мм
A10-A10	-0,026...-0,008	-0,021...-0,007
A9-A9	-0,032...-0,006	-0,024...-0,006
A8-A8	-0,037...-0,006	-0,028...-0,007
A7-A7	-0,046...-0,008	-0,036...-0,006
A6-A6	-0,057...-0,007	-0,047...-0,007
A5-A5	-0,069...-0,010	-0,059...-0,012
A4-A4	-0,084...-0,012	-0,075...-0,012
A3-A3	-0,089...-0,020	-0,069...-0,017
A2-A2	-0,039...-0,021	-0,034...-0,018

Исходные управляющие программы получены в системе UNIGRAPHICS NX7.5 и NX8. УП выводятся через внутренний постпроцессор. При создании траектории движения инструмента используется стратегия обработки лопатки непрерывной спиралью разработанная ЗАО ГК "Постпроцессор".

Добавки к припуску на верхнем и нижнем витках спирали инструмента вводятся оператором прямо на станке через параметры. Программы замера предварительно проводятся датчиками RENISHAW непосредственно на станке, что облегчает подбор параметров корректировки.

Средства для преобразования УП с 3D-коррекцией в параметрический вид с переменным припуском – вполне независимы. Им не требуется никакая дополнительная система. Они работают только с управляющей программой, где используется 3D-коррекция.

Заключение

Применение в производстве новых методов расчёта управляющих программ позволило выполнять обработку деталей со сложной пространственной коррекцией инструмента для сокращения сроков внедрения программ и получения при этом конструкторских требований чертежа. Положительный эффект внедрения прогрессивных методов позволил поднять на качественно новый уровень производство таких сложных деталей авиационных двигателей как осевые моноколёса.

Литература

1. Особенности обработки деталей авиационных ГТД на станках с ЧПУ [Текст] / В.А. Панасенко, С.А. Петров, С.В. Мозговой, Г.В. Карась // Вестник двигателестроения. – 2005. – №1. – С. 138-144.
2. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора, часть 1 [Текст]: моногр. / Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк и др. – Запорожье: Изд-во. АО "Мотор Сич", 2003. – 396 с.
3. Повышение эффективности процесса ВСФ центробежных колёс за счёт оптимизации режимов резания и использования высокопроизводительных методов обработки [Текст] / Э.В. Кондратюк, Г.В. Пухальская, В.Г. Жарик, Т.А. Панченко, С.В. Критчин // Вестник двигателестроения. – 2012. – № 1. – С. 103-113.
4. Повышение эффективности высокоскоростного фрезерования центробежных колёс [Текст] / Ю.В. Грачёв, Г.В. Пухальская, С.В. Критчин, Т.А. Панченко // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 1. – С. 95-100.

Поступила в редакцию 03.05.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. А.Я. Качан, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

СТРАТЕГІЯ ОБРОБКИ ЛОПАТОК МОНОКОЛЕС НА ОБРОБЛЮВАННИХ ЦЕНТРАХ З ЧПК З МІНЛИВОЮ 3D-КОРЕКТУРОЮ

В.Ф. Мозговой, К.Б. Балушок, В.О. Панасенко, І.І. Котов, М.К. Бірук

Надана методика застосування стратегії високошвидкої обробки лопаток моноколес на 5-ти координатних оброблюваних центрах з ЧПК з застосуванням мінливої 3D-коректурою. Встановлено, що дана коректура може компенсувати пружні, силові та невраховані похибки викликаючі недопустимі відхилення точок профіля лопаток. При цьому, величина вводу коректури визначається містоположенням точки контакту інструмента по висоті лопатки. Даний метод показав ефективність застосування мінливої компенсації та дозволив виконувати фрезерування з раніш визначеною точністю.

Ключові слова: моноколесо, лопатка, верстат з ЧПУ, вектор нормалі, відхилення, упруга деформація, шорсткість, точність обробки.

STRATEGY OF PROCESSING OF BLADES MONOWHEELS ON THE PROCESSING CENTRES CNC WITH VARIABLE 3D-CORRECTION

V.F. Mozgovej, K.B. Baluchok, V.A. Panasenko, I.I. Kotov, M.K. Biruk

The technique of application of strategy of high-speed processing of shovels monowheels on 5-axis the processing centres with CNC with application by variable 3D-correction is presented. It is established that the given correction can compensate the elastic, power and not considered errors causing inadmissible deviations of points a profile of shovels. Thus, the size of input of correction is defined by an arrangement of a point contact the tool on shovel height. The given method has shown efficiency indemnification errors at processing and has allowed to carry out milling with in advance certain size of correction.

Key words: monowheel, blade, the mashin with CNC, normal vector, deviation, rigidity, elastic deformation, roughness, accuracy of processing.

Мозговой Владимир Фёдорович – канд. техн. наук, главный технолог АО “Мотор Сич”, Запорожье, Украина, e-mail: ugt@motorsich.com.

Балушок Константин Брониславович – канд. техн. наук, зам. главного технолога АО “Мотор Сич”, Запорожье, Украина, e-mail: ugt@motorsich.com.

Панасенко Валерий Александрович – начальник отдела УГТ АО “Мотор Сич”, Запорожье, Украина, e-mail: ugt@motorsich.com.

Котов Игорь Иванович – ведущий инженер-программист отдела программных станков УГТ АО “Мотор Сич”, Запорожье, Украина, e-mail: ugt@motorsich.com.

Бірук Михаил Карпович – инж.-программист УГТ АО “Мотор Сич”, Запорожье, Украина, e-mail: bvc.ugt@motorsich.com.