

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСНАСТКИ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Петраков Ю.В., Пасечник В.А., (НТУУ „КПИ”, Киев, Украина)

Offered new automatic preparation system for the fabrication of calibers profiles on special machine-tools grinding with CNC. System is kept modules of geometric analysis source information, automatic forming paths for controls, generations of control file in G-codes and checking the conditions of interaction of instrument and detail in the process of grinding.

Актуальность. Развитие производства возможно как за счет внедрения нового технологического оборудования, так и за счет модернизации уже действующего. Сегодня в Украине мы наблюдаем тенденцию активной модернизации как универсального, так и специального технологического оборудования, оснащения его системами числового программного управления (ЧПУ) нового поколения. Существенное снижение стоимости систем ЧПУ и существенное расширение технологических возможностей модернизированного оборудования, сокращение сроков технологической подготовки производства, повышение производительности и качества обработки делают эффективными вложение средств в модернизацию и узкоспециализированного технологического оборудования. В то же время, существенным фактором, определяющим эффективность модернизации, является комплексность подхода, при котором интегрируется процесс проектирования изделия, процесс технологической подготовки производства, в том числе подготовка управляющих программ для станков с ЧПУ, и процесс изготовления. Разработка принципов и создание компьютерно-интегрированных технологий проектирования и производства специальных изделий является сложной задачей, требующей учета всех составляющих процесса, их взаимосвязи и представляет актуальную научно-техническую проблему.

Анализ современного состояния. Сегодня в отечественной трубной промышленности для изготовления труб активно используется метод холодной прокатки (пильгерование), при котором труба образуется за счет взаимодействия двух калибров и стержня специальной формы. Основным инструментом процесса пильгерования является калибр (рис. 1) с фасонной формообразующей поверхностью.

Изготовление калибров проводится на специализированном оборудовании, в частности, на шлифовальном станке ЛЗ-250 с управлением от кулачков. В то же время зарубежные фирмы для обработки калибров предлагают оборудование с ЧПУ. Так фирма *Mannesmann* создала 5-координатный специальный шлифовальный станок с ЧПУ.

Предварительный анализ подтвердил принципиальную возможность модернизации станка ЛЗ-250, однако имеющиеся теоретические зависимости [1] и системы подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ [2] не позволяют применять их для данного оборудования и технологического процесса.

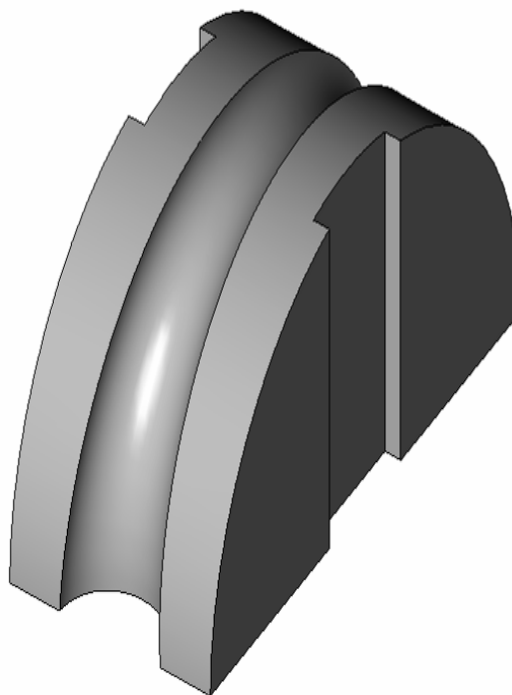


Рис. 1. Калибр для пильгерования труб

Для автоматизации проектирования управляющих программ станков с ЧПУ широко используются CAD/CAM-системы (Computer Aided Design, Computer Aided Manufacturing). В то же время, подобные системы для автоматизации подготовки производства калибров на станках с ЧПУ отсутствуют. Использование же существующих систем для решения проблемы не приводит к успеху, поскольку, всегда при проектировании файла формообразующих движений они привязаны к конкретной кинематической схеме формообразования, по которой функционирует станок. В этом заключается довольно существенная проблема, которая в сочетании с набором и спецификой ввода исходных данных, исключает возможность использования существующих САМ-систем для автоматизации подготовки программ обработки шлифованием формы валков-калибров станов холодной прокатки труб.

Поэтому целью данной работы является создание системы автоматизированного проектирования траекторий формообразующих движений станков с ЧПУ для шлифования профилей калибров.

Постановка задачи. Для решения задач автоматизации технологической подготовки производства калибров для холодного пильгерования труб необходимо получить аналитические зависимости, описывающие изделие (калибр), инструмент (шлифовальный круг) и их взаимодействие в процессе обработки, а также разработать специализированное программное обеспечение для автоматического генерирования управляющих программ.

Основная часть. Геометрическая информация, описывающая форму калибра, может быть представлена как совокупность таких исходных параметров (рис. 2):

- ✓ глубина $H_p = f_1(\varphi)$ профиля;
- ✓ ширина $B = f_2(\varphi)$ профиля.

Кроме того, дополнительно задаются следующие геометрические параметры:

- ✓ радиус детали R_0 ,

- ✓ радиус шлифовального круга R_k и радиус r_k округления его периферии,
- ✓ начальные параметры φ_0 и S расположения профиля калибра.

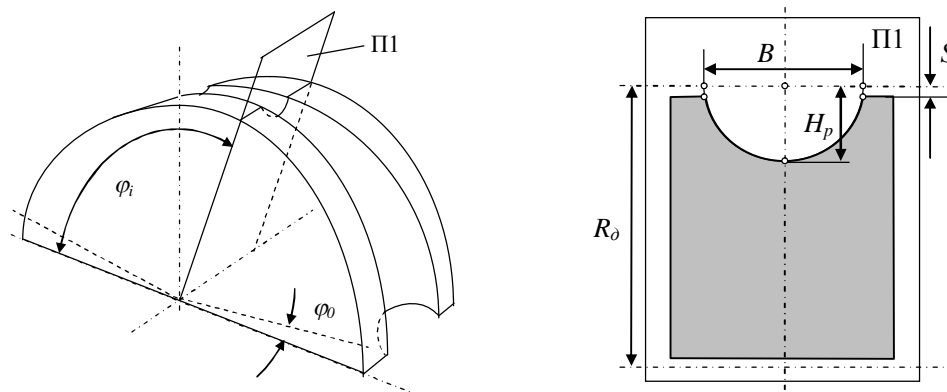


Рис. 2. Геометрические параметры профиля калибра

Накопленный производственный опыт изготовления калибров показывает, что эффективная и качественная обработка возможна только с применением специальных видов обработки, в основном шлифованием кругом, имеющим форму тора, станков специальной кинематики. Причем, учитывая сложную форму рабочей поверхности калибров и их достаточно широкую номенклатуру, для выполнения операции формообразования профиля используются станки с ЧПУ, имеющие от 4-х до 5-ти управляемых координат (рис. 3).

Исходя из условий взаимодействия шлифовального круга и детали в процессе формообразования, детали сообщают вращение (полярная координата φ), перемещения x и z по соответствующим осям, а шлифовальному кругу – поворот на угол β вокруг оси Z . Такая схема шлифования принята на специальном станке модели ЛЗ-250. Для дополнительной коррекции на станке фирмы *Mannesmann* используется дополнительная, пятая координата – перемещение детали по координате y перпендикулярно оси Z .

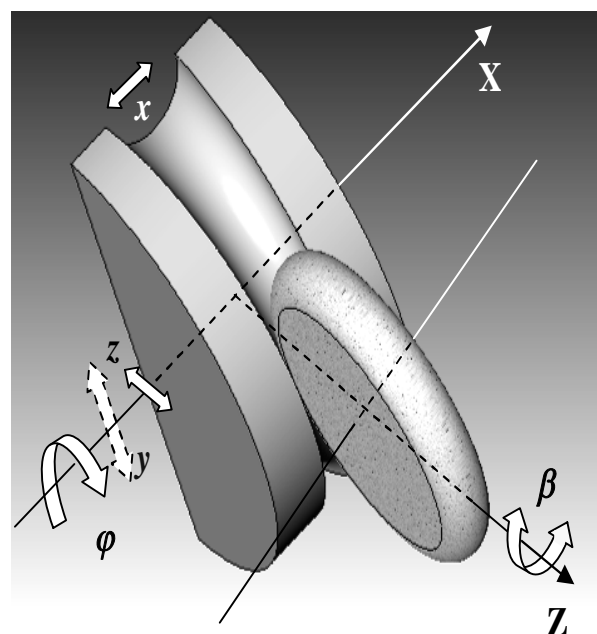


Рис. 3. Схема формообразования профиля калибра на станке с ЧПУ

Координата β управления углом поворота шлифовального круга обеспечивает расположение его параллельно профилю при обработке. Эта управляемая координата обязательна при формообразовании шлифовальным кругом с исходной инструментальной поверхностью в виде тора, так как в противном случае будет происходить искажение профиля калибра. Корректирующее перемещение y предназначено для компенсации ошибки формообразования калибров с большой редукцией профиля, которая определяет увеличенный угол подъема профиля и, в сочетании с кинематическими особенностями принятой схемы станка, также приводит к погрешностям обработки.

Созданная система интегрирует в себе CAD и CAM и имеет общий интерфейс (рис. 4).

В качестве CAD-системы используется T-FLEX CAD 3-D, а проектирование траекторий формообразующих движений выполняется в специальном программном обеспечении, выполняющем моделирование процесса по разработанной математической модели геометрического взаимодействия шлифовального круга и детали. Интерфейс содержит меню, соответствующее различным этапам

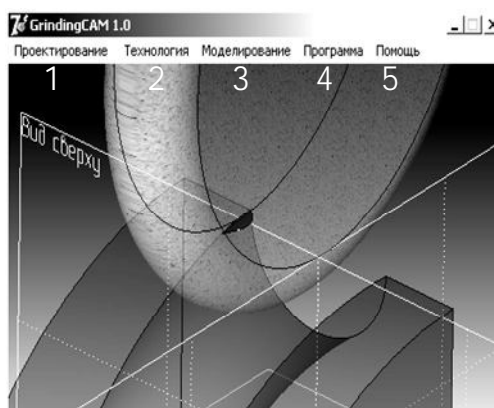


Рис. 4. Главный интерфейс системы автоматизированной подготовки изготовления профилей калибров

технологической подготовки производства.

Подготовка управляющей программы (этап «Проектирование») начинается с подготовки файла исходных данных профиля для моделирования и проектирование 3-D модели калибра в CAD-системе. Исходные данные, которые задают профиль калибра, представлены в виде таблицы, подготовленной в *Microsoft Excel* – файл формата *.xls.

Форма калибра определяется из условия равномерного распределения усилия при прокатке труб для реализации свободного процесса деформирования и образуется в поперечном сечении эллипсами с коррекцией профиля для самых распространенных процессов прокатки. Для проверки плавности профиля калибра и, в случае необходимости, его сглаживания, была разработана прикладная программа, которая активизируется при выборе **опции 1** меню главного интерфейса. Программа позволяет визуально оценить плавность исходных данных по графикам первых и вторых производных, которые рассчитываются по рекуррентным соотношениям как первые и вторые разделенные разности соответственно. Если исходные данные не отличаются плавностью, то в дальнейшем это обязательно приведет к различным коллизиям управляющей программы и реальных формообразующих движений станка с ЧПУ. Сглаживание выполняется по первым производным от исходных функций $H_p = f_1(\varphi)$ и $B = f_2(\varphi)$ в соответствии с разработанным алгоритмом:

$$\dot{a}l_{i+1} = (\dot{a}_i + 2\dot{a}_{i+1} + \dot{a}_{i+2})/4, \quad (1)$$

где $\dot{a}, \dot{a}l$ – первые производные: исходное значение и новое, расчетное значение соответственно, i – номер узла.

Далее выполняется восстановление функций $H_p = f_1(\varphi)$ и $B = f_2(\varphi)$ по рассчитанным значениям производных. Алгоритм повторяется по всему диапазону полярного угла φ согласно заданному количеству итераций.

В графическом окне представлены графики изменения ширины B (линия 2) и глубины H_p профиля (линия 1) в функции угла φ для детали № 1-B-02-02 Никопольского «Южного трубного завода» (рис. 5).

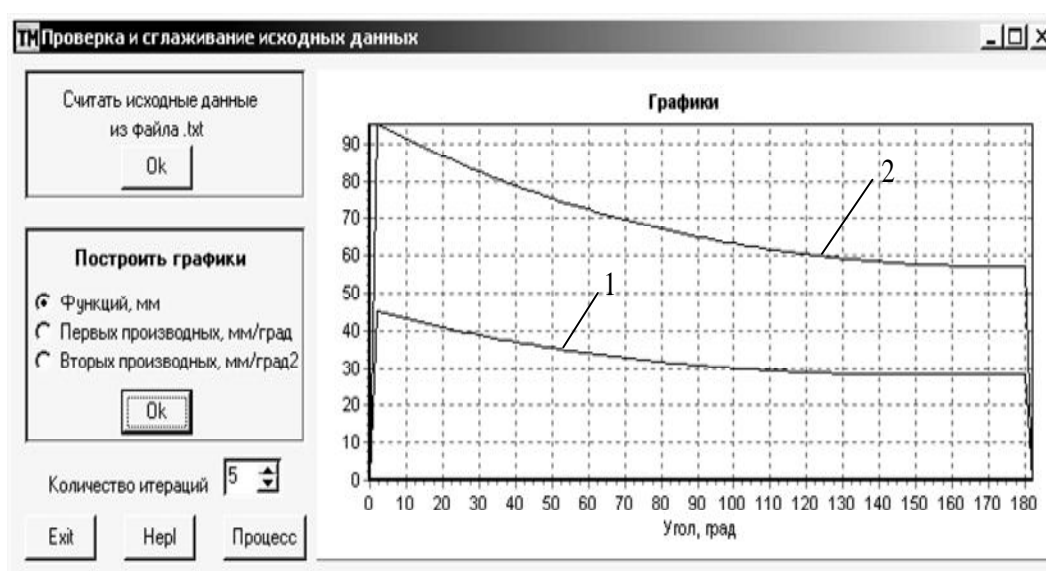


Рис. 5. Интерфейс прикладной программы сглаживания

По виду кривых функций невозможно оценить их гладкость, тогда как графики первых и вторых производных, которые рассчитаны по рекуррентным соотношениям, свидетельствуют о недопустимом характере изменений: графики первых производных имеют изломы, а графики вторых производных кроме изломов также изменяют знак (рис. 6). Результаты автоматического сглаживания (после пяти итераций) можно наблюдать в том же графическом окне программы также в виде графиков.

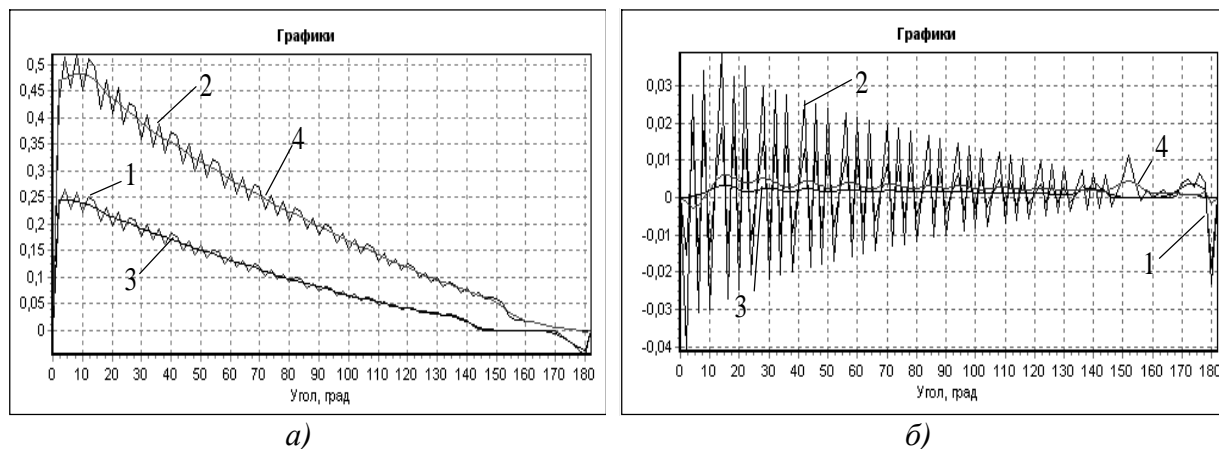


Рис. 6. Исходные (линии 1 и 2) и сглаженные (линии 3 и 4) функции:
а) – первых производных, б) – вторых производных

Сглаживание проводилось по специальной методике, начиная от середины калибровочного участка профиля ($\varnothing 28,2$ мм) так, чтобы уменьшение длины калибровочного участка было минимальным. Именно из этих соображений выбрано количество итераций, равное 5, хотя графики вторых производных все еще не отличаются идеальной плавностью. Увеличение количества итераций приводит к абсолютной плавности, однако существенно сужает длину калибровочного участка. Поэтому рекомендуется использовать разработанную программу на этапе проектирования профиля калибра с учетом его гладкости.

Аналогичные результаты и подтверждение эффективности алгоритмов программы получены при проектировании калибра в CAD-системе (рис. 7), где построены 3-D эпюры кривизны двух сечений калибра: по периферии и по дну ручья профиля.

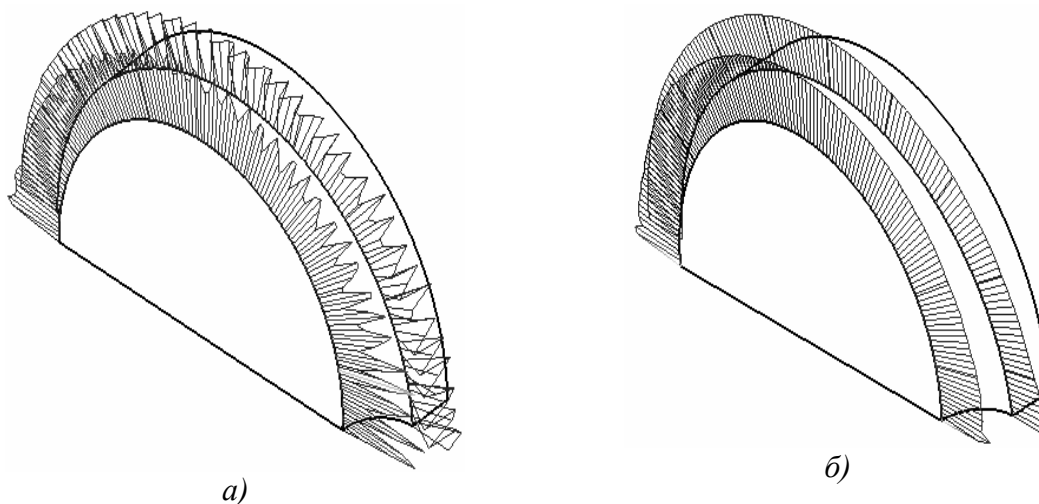


Рис. 7. 3-D сечения калибра № 1-B-02-02 с эпюрами кривизны:
а) – до сглаживания, б) – после сглаживания

Для проектирования управляющей программы важное значение имеет количество проходов, необходимое для обработки всего профиля калибра. В соответствии со схемой шлифования профиля калибра обработка осуществляется при вращении детали вокруг своей оси и перемещении шлифовального круга от прохода к проходу. Для обеспечения

равных расстояний между строчками проходов по профилю калибра удобно выбрать в качестве задающей координаты полярный угол α , который определяет положение центра округления шлифовального круга относительно центра эллипса каждого сечения профиля (рис. 8).

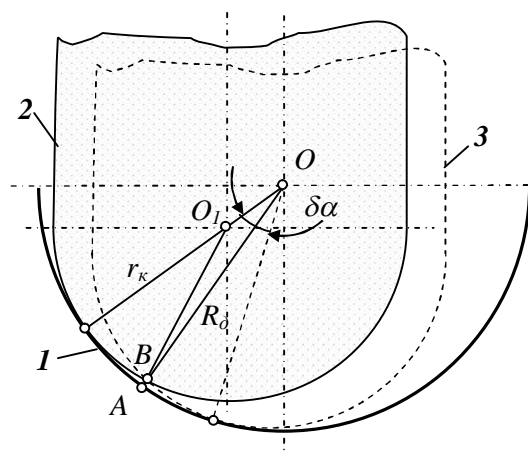


Рис. 8. К выбору количества проходов

Таким образом, на высоту гребешков микронеровностей обработанного профиля влияют как радиус r_k округления периферии шлифовального круга, так и шаг $\delta\alpha$ изменения полярного угла профиля (при заданном радиусе детали). Для оценки такого влияния и правильного выбора необходимого количества проходов разработана прикладная программа, интерфейс которой появляется при выборе **опции 2** меню главного интерфейса (см. рис. 4).

В соответствующие окна интерфейса следует вводить максимальный радиус профиля калибра на всей длине его ручья и радиус округления шлифовального круга не превышающий минимальный радиус профиля калибра. Данные, представленные в окнах интерфейса рис. 9, соответствуют условиям шлифования детали № 1-B-02-02.

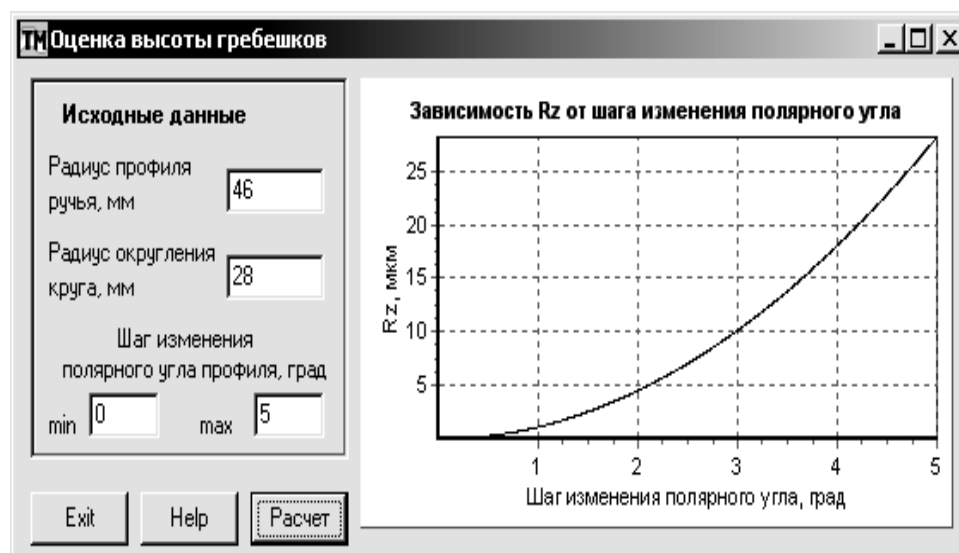


Рис. 9. Интерфейс прикладной программы выбора количества проходов

Анализ полученных результатов показывает, что максимальная высота гребешков существенно зависит от шага изменения полярного угла α . Уменьшение

где угол α_1 определяется из уравнения касательной к эллипсу профиля калибра в точке обработки:

$$\alpha_1 = \arctan \left(\frac{H_P^2}{x_A z_A} - \frac{z_A}{x_A} \right), \quad (6)$$

Поскольку профиль калибра в поперечном сечении (сечение PP на рис. 10,а) имеет подъем, определяющий редуцирование при прокатке, то шлифовальный круг 1, перемещающийся по эквидистанте 2 взаимодействует с сечением 3 детали по схеме рис. 10,б. Для учета таких особенностей предлагается ввести поправку в координату φ угла поворота детали:

$$\delta\varphi = \arcsin \left(\frac{R_K}{R_9} \sin \gamma \right). \quad (7)$$

Радиус R_K сечения шлифовального круга определяется по формуле:

$$R_K = R_{K0} - r_K (1 - \cos \alpha), \quad (8)$$

где R_{K0} – максимальный радиус периферии шлифовального круга.

Радиус эквидистанты определяется из геометрических соотношений схемы взаимодействия по рис. 10,б:

$$R_9 = \sqrt{R_M^2 + R_K^2 + 2R_MR_K \cos \gamma}, \quad (9)$$

где угол γ давления в кинематической паре шлифовальный круг – деталь определяется по зависимости:

$$\gamma = \arctan \frac{dR_M / d\varphi}{R_M}, \quad (10)$$

где R_M – радиус-вектор материального профиля детали.

Для обеспечения разворота шлифовального круга по управляемой координате β (см. схему формообразования на рис. 3) необходимо при моделировании создать массив соответствующих данных.

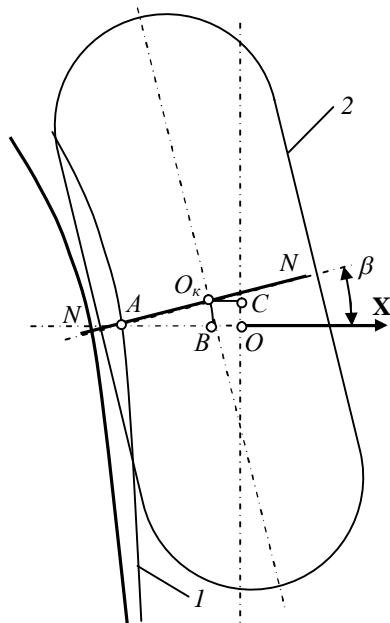


Рис. 11. Вид В по рис.10,а

Схема взаимодействия при повороте шлифовального круга 2 по нормали NN к контуру профиля показана на рис. 11. Шлифовальный круг 2 обрабатывает профиль калибра по траектории 1. Угол β наклона нормали к оси X в произвольной точке обрабатываемой траектории можно рассчитать по зависимости:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{dx/d\varphi}{\delta D}\right) \quad (11)$$

где δD – увеличение дуги траектории за шаг изменения полярного угла φ .

Поворот шлифовального круга по нормали к траектории обработки провоцирует изменение фактической координаты x и полярного угла координаты R_φ .

Для учета и коррекции такого изменения из геометрических соотношений рис. 11 можно получить поправки для координаты x и полярной координаты φ :

$$x_k = x_A - r_k \cos \alpha_1 \cdot \cos \beta, \quad (12)$$

$$\delta \varphi_1 = \frac{r_k \cos \alpha_1 \cdot \sin \beta}{R_\varphi}$$

Для выполнения моделирования разработана прикладная программа, интерфейс которой показан на рис. 12.

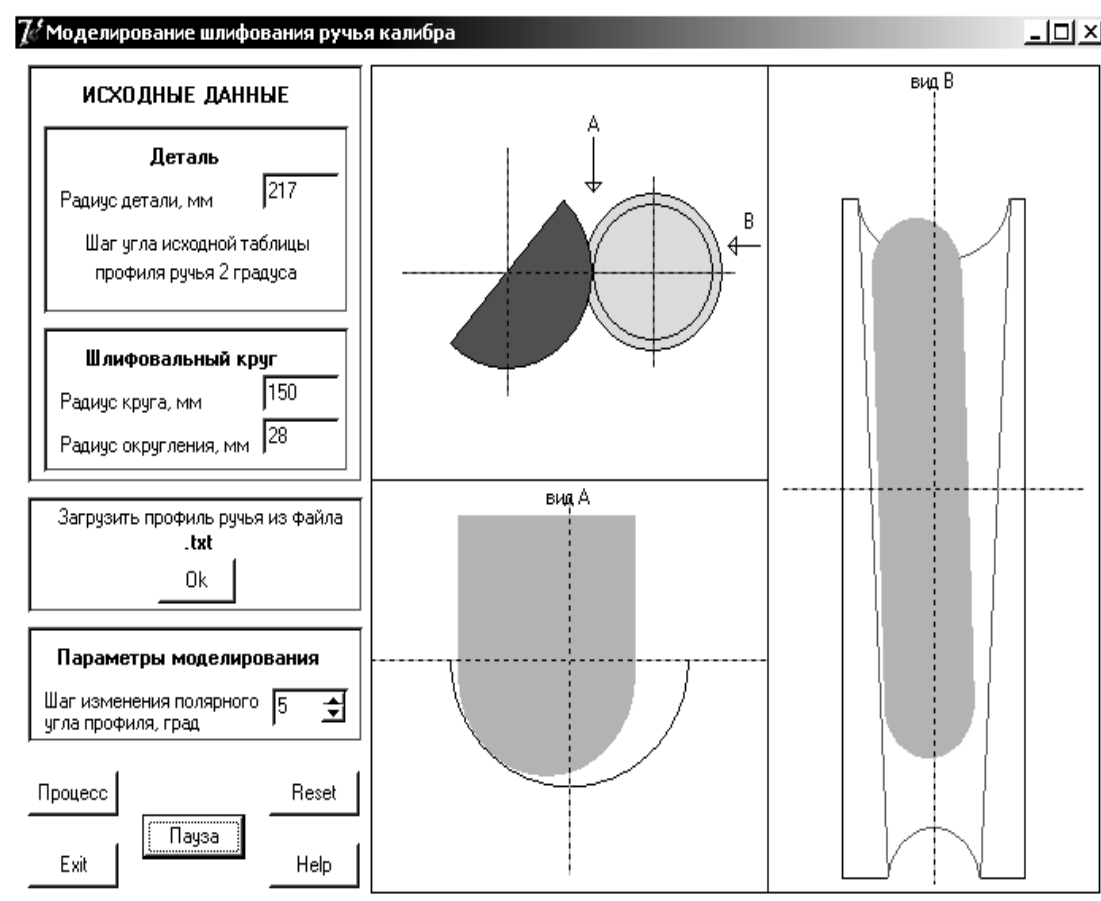


Рис. 12. Интерфейс программы моделирования

Программа автоматически выполняет моделирование одного цикла обработки профиля калибра по специально разработанному алгоритму, учитывающему все геометрические особенности процесса формообразования в соответствии с разработанной математической моделью (3-12). В процессе моделирования в графическом окне интерфейса происходит анимация движений взаимодействия шлифовального круга и детали в соответствии со схемой формообразования (см. рис.3).

При выборе радиуса округления шлифовального круга, среди других ограничений необходимо удовлетворять условию $r_k < R_{min}$, где R_{min} – минимальный радиус кривизны профиля ручья. Для проверки такого условия в программе предусмотрена процедура вычисления массива радиусов кривизны профиля калибра численным методом.

При обработке любого участка профиля, центр шлифовального круга должен находиться на эквидистанте к соответствующему сечению профиля. Исходя из этого обязательного условия воспроизведения профиля рассчитываются массивы координат интерполирующих осей Z и X в функции координаты φ . Далее, с учетом угла давления в кинематической паре шлифовальный круг – профиль калибра, выполняется соответствующая коррекция рассчитанных ранее координат. Затем выполняется

процедура определения массива нормалей к профилю и расчет управляемой координаты φ с последующей коррекцией всех управляемых координат, поскольку поворот шлифовального круга по нормали к траектории обработки провоцирует их изменение (см. формулы 12). После завершения моделирования цикла обработки, выполняется процедура интерполирования полученных результатов, которая обеспечивает создание файла массивов управляемых координат с равномерным шагом изменения ведущей координаты φ .

Таким образом, на этапе моделирования автоматически создается файл данных всех управляемых координат в соответствии с принятой схемой формообразования.

Опция 4 главного меню выполняют автоматическое генерирование управляющей программы, а опция 5 – показывает инструкции пользователя.

В соответствии с предложенным методом автоматически сгенерированный файл, который содержит массивы координат всех интерполирующих осей станка, должен пройти проверку в CAD-системе. Такая проверка может проводиться в любой CAD-системе, например T-FLEX CAD 3D, где построена параметрическая модель технологической среды взаимодействия шлифовального круга и профиля калибра. В этом случае CAD-система выполняет функции модуля графического контроля. В процессе моделирования имеется возможность проверить пересечение геометрических 3-D моделей шлифовального круга и профиля калибра для каждого сочетания управляемых координат, рассчитанных на предыдущем этапе и определить величину и положение пятна контакта шлифовального круга с калибром. Эта информация может быть использована при оптимизации режима резания, учитывающей усилия в упругой технологической обрабатывающей системе.

Выводы. Проверка разработанной системы автоматизированного проектирования программ для управления специальными станками с ЧПУ при изготовлении калибров станов холодной прокатки труб показала ее высокую эффективность, что позволяет рекомендовать ее к использованию на предприятиях имеющих подобные проблемы, как при проектировании кинематики формообразования, так и при технологической подготовке производства.

Список литературы: 1. Кулик В. К., Петраков Ю. В., Иотов В. В. Прогрессивные процессы обработки фасонных поверхностей.- К.: Техніка, 1987.- 187с. 2. Интеллектуальные возможности современных САМ-систем // CAD/CAM/CAE Observer. №4.- 2002. С.2-7

Сдано в редакцию 02.02.07