DOI: 10.17117/ns.2014.02.041

Поступило в редакцию: 15.12.2014

<http://ucom.ru/doc/ns.2014.02.041.pdf>

mailbox@stu.lipetsk.ru

Амбросимов С.К. **Исследование новых методов** **фрезерования со скольжением режущей кромки** **относительно поверхности резания**

Ambrosimov S.K.
Research of new milling methods with
sliding cutting edge relatively cutting zone

В статье представлены новые прогрессивные методы фрезерования со скольжением режущей кромки относительно зоны резания, представлены исследования износостойкости режущей кромки и температуры в зоне резания для обработки сложных фасонных поверхностей с качающимся движением фрезы

Ключевые слова: методы фрезерования, скольжение режущей кромки

New progressive milling methods with sliding cutting edge in relation to the cutting zone y are represented in the article. Also edges wear and temperatures researches in cutting zone for the machine, complex surface treatment swinging with milling motion are given

Key words: milling methods, sliding cutting edge

Амбросимов Сергей Константинович

*Доктор технических наук, профессор
Липецкий государственный технический университет*

г. Липецк, ул. Московская, 30 Б

Ambrosimov Sergey Konstantinovich

*Doctor of Engineering Sciences, Professor
Lipetsk State Technical University
Lipetsk, Moscow st., 30 B*

Проблемы фрезерования сложных фасонных поверхностей связаны с недостаточно высокой стойкостью дисковых фасонных, концевых радиусных и торцовых фрез, что связано с прерывистостью процесса резания, а точнее периодичностью входа и выхода зуба из заготовки и большими объемами удаляемых слоев металла, особенно при изготовлении сложных фасонных поверхностей, что в совокупности с высокой стоимостью фрез делает процессы фрезерования высокочрезвычайно затратными.

Основным и наиболее распространенным методом фрезерования внутренних поверхностей в виде выемок, карманов, а также наружных фасонных поверхностей типа пуансонов, кулачков и лопаток турбин является обработка концевыми фрезами со сферическим концом, изготовленными из быстрорежущей стали или монокристаллическими твердосплавными, а также сборными с двумя пластинами лепестковой формы или одной с двухсторонней режущей кромкой типа CoroMill. Последние при обработке поворачивают под углом 10° – 15° к вертикальной оси для увеличения скорости резания. Траектория движения инструмента относи-

тельно заготовки при этом должна быть эквидистантна профилю обрабатываемой поверхности, что значительно облегчает разработку управляющих программ. При разработке технологии вначале выбирается диаметр фрезы d_f , который по данным Sandvik Coromant должен быть не более 1,5 – 1,0 от радиуса скругления профиля кармана R_n , при ширине фрезерования $0,2d_f$, обеспечивающей угол охвата, наиболее оптимальный диапазон которого, с точки зрения минимизации вибраций в углах, составляет $100^\circ - 80^\circ$. Однако, это приводит к увеличению толщины срезаемого слоя из-за увеличения подачи, неизбежной при фрезеровании по запрограммированному радиусу. Для обеспечения аутентичности условий при обработке прямолинейных и радиусных участков карманов подачу при движении по запрограммированному радиусу снижают, добиваясь равностойкости инструмента при обработке этих участков. Уменьшение диаметра фрезы менее R_n неоправданно снижает производительность обработки. Фрезерование карманов начинают от технологического отверстия в центре кармана, таким образом, чтобы глубина фрезерования не превышала двух диаметров фрезы, при этом обработку ведут по спирали от центра к периферии с обводкой радиусных участков по запрограммированному радиусу $r_i = R_i - 0,5 \cdot d_o$ с уменьшением подачи.

В последние годы появилось много новых способов фрезерования, например высокопроизводительный метод обработки карманов плунжерным фрезерованием, с одним осевым движением подачи (рис. 1) [1] который противоречит определению фрез и процессов фрезерования: «фреза – лезвийный инструмент для обработки с вращательным главным движением резания инструмента без возможности изменения радиуса этого движения и хотя бы с одним движением подачи, направление которого не совпадает с осью вращения» [2] стр.80 ГОСТ 25721-83

При обработке торцовыми фрезами плоских поверхностей целесообразно назначать криволинейное врезание [1] (рис. 2), обеспечивающее минимальную толщину срезаемого слоя при выходе зуба из зоны обработки. Это, во-первых, уменьшает длину траектории движения инструмента, а, во-вторых, значительно повышает стойкость твердосплавных режущих зубьев. Снижение толщины срезаемого слоя приводит к уменьшению величины разгрузочного удара, который возникает на выходе режущей кромки из зоны обработки, за счет резкого снижения опоры у стружки в конечной точке резания. Это, приводит к отгибанию стружки, т.е. изменению схемы сил действующих на переднюю поверхность, что, в конечном счете, изменяет напряженное состояние на передней поверхности зуба от сжатия к растяжению. При прямолинейном врезании толщина срезаемого слоя в точках выхода зуба из зоны резания остается большой до момента погружения фрезы в заготовку на $0,5d_f$.

По данным экспериментальных исследования проведенных в Sandvik Coromant при криволинейном врезании и обводе углов стойкость режущих твердосплавных пластин при обработке стальных заготовок повышается до 2-х – 16-ти раз.

Рис. 1. Схема плунжерного фрезерования карманов

Рис. 2. Схема торцового фрезерования с криволинейным врезанием и обводкой углов

Таким образом, в последние годы появилось много новых методов обработки, особенностью которых является новая кинематическая схема формообразования, со сложносогласованными движениями формообразования с изменяющимися по направлениям и величинам подачами, направленными на повышение стойкости и производительности обработки.

Сложносогласованные качательные движения в направлении подачи повышают стойкость фрез за счет уменьшения размеров проточки, сложносогласованное криволинейное врезание при входе торцовой фрезы в заготовку снижает негативное влияние разгрузочного удара на разрушение режущей кромки, поэтапное снижение подачи при увеличении угла охвата фрезы в местах обвода углов карманов уменьшает вибрации при обработке.

Одними из перспективных и новых направлений исследований являются методы, обеспечивающие постоянное смещение режущей кромки относительно поверхности резания. Смещение режущей кромки, обеспечивающее нелинейный обкат обработанной поверхности режущей кромкой, а также обкат с проскальзыванием позволяет постоянно вводить в работу новые участки режущей кромки незадействованные ранее, снижать теплонапряженность у вершины режущей

кромки, за счет скоростного скольжения, увеличивать активную и общую длину режущих кромок, равномерно распределять износ по режущим кромкам, за счет равномерного их смещения.

Одним из универсальных методов с нелинейным обкатом обработанной поверхности является способ обработки сложных криволинейных поверхностей [3], осуществляемый инструментом с двумя коническими и тороидальной поверхностями (рис. 3), поскольку позволяет обрабатывать профили, пересекающиеся под любым углом.

Прямолинейные образующие инструмента выполняются под углом α , величина которого равна или меньше минимального угла $\beta_{\min}$ между касательными к противоположным сторонам профиля обрабатываемой поверхности в точках их сопряжения с вогнутыми участками профиля.

Обработка каждой выпуклой стороны профиля производится прямолинейной одноименной стороной профиля инструмента, а вогнутого сопрягаемого участка профиля детали – его радиусной тороидальной поверхностью. Обработку осуществляют с тремя одновременными не линейно согласованными формообразующими движениями, лежащими в одной плоскости профилирования. Одно из них, вращательное ω_{x1} осуществляется таким образом, чтобы прямолинейная образующая инструмента была последовательно касательной к каждой точке обрабатываемого профиля, а два других S_z и S_y согласуются с вращательным ω_{x1} , таким образом, чтобы при обработке участков профилей прямолинейные образующие перекатывались по обрабатываемой поверхности. Разработанный метод обработки сложных поверхностей позволяет повысить точность за счет обката профилей детали прямолинейными образующими инструмента, кроме того, он универсален и высокопроизводителен.

Рис. 3. Схема обката сложного профиля детали инструментом с комбинированным профилем

Для обработки фасонных вогнутых поверхностей с изменяющимся профилем типа ручьёв разработан способ [4, 5], который осуществляется инструментом в виде тела вращения с тороидальной производящей поверхностью (рис. 4.). В процессе обработки инструменту (заготовке) задают вращательное движение подачи ω_{OY} и два поступательных S_y , S_z которые совершаются одновременно и лежат в плоскости, перпендикулярной плоскости вращательного движения. Поступательные движения совершаются нормально (S_y) и параллельно (S_z) к базисной плоскости и не линейно согласуются с вращательным движением ω_y . Вращательное движение подачи осуществляется до периодического и одновременного касания инструментом обработанной поверхности в двух точках М и М₁ (М' и М₁') на противоположных сторонах профиля. В моменты касания вращательное движение подачи реверсируют. Разработанный метод позволяет значительно повысить стойкость режущих пластин и равномерность износа пластины за счет смещения вершины резания за каждый оборот фрезы один раз по режущей кромке с правой на левую ее сторону, при вращении заготовки вокруг оси OY по часовой стрелке, и наоборот, с левой на правую, при вращении против часовой, а так же производительность и плавность работы за счет увеличения числа одновременно работающих зубьев.

Рис. 4 Схема формообразования профиля канавки

Особый интерес представляет новый метод обработки поверхностей с качающимся движением фрезы [6], что обеспечивает постоянное смещение вершины режущей кромки относительно поверхности резания, снижение теплонапряженности режущей кромки, более равномерный ее износ и, как следствие, повышение стойкости инструментов.

Обработка осуществляется методом последовательного касания инструментом образующей обрабатываемой поверхности, так что тороидальная поверхность инструмента обкатывает выпуклые, плоские и вогнутые участки обрабатываемого профиля, при этом инструмент совершает постоянное возвратно-качательное движение подачи с нелинейным скольжением вершины режущей кромки относительно поверхности резания.

В процессе формообразования инструмент и заготовка совершают четыре движения подачи – главное движение Dr (рис. 5), подводят к заготовке, используя перемещения по оси X_1 и Y_1 таким образом, чтобы инструмент совершил радиальное врезание до касания тороидального профиля инструмента начальной точки A_1 профиля обработанной поверхности, т. е. в точке начала движения качения. Затем заготовке сообщают три одновременно согласованных движения подачи $Ds(\omega z_1)$; $Ds(x_1)$; $Ds(y_1)$ таким образом, чтобы инструмент последовательно касался обрабатываемого профиля в точках A_2 , A_3 , одновременно перекачиваясь вокруг центра профильного сечения O тороидальной поверхности инструмента против часовой стрелки на угол ψ , который определяется с одной стороны нормальными условиями резания, т.е. по возможности задействуется вся длина режущей кромки с учетом глубины резания t , а с другой стороны условиями неврезания инструментального блока в заготовку. В точке A_3 вращательное движение $Ds(\omega z_1)$ реверсируют, одновременно согласовывая движения подачи $Ds(x_1)$ и $Ds(y_1)$ по профилю, чтобы инструмент совершал последовательные касания в последующих точках обрабатываемого профиля с соблюдением вышеназванных условий. Таким образом, обработка осуществляется при относительном движении инструмента по профилю в точках A_4 , A_5 и т. д. и возвратно-качательными движениями подачи $Ds(\omega z_1)$, которые обеспечивают оба условия.

Рис. 5. Схема обработки сложной фасонной поверхности с возможными зарезаниями: 1 – точка касания; 2 – зона врезания

Способ фрезерования фасонных ручьев сложной формы с криволинейными участками профиля, (рис. 6, 7) осуществляется инструментом в виде тела вращения с цилиндрической и сферической производящей поверхностью, т.е. концевой радиусной фрезой. Обработку производят на фрезерном станке с ЧПУ с вертикальной осью вращения шпинделя, с поворотным глобусным столом, одновременным программным управлением по пяти координатам. Ин-

струменту сообщают главное движение D_r , подводят к заготовке, и используя перемещения D_{sy} , D_{sx} и вращательное движение D_{sw} по образующей конуса, которая является геометрическим местом последовательных положений оси фрезы с угловой амплитудой W_1 таким образом, чтобы инструмент совершил врезание до касания цилиндрической производящей поверхности противоположных сторон профиля номинальной поверхности (рис. 6). Далее инструменту продолжают сообщать движения D_{sy} , D_{sx} и D_{sw} , которые согласованы таким образом, чтобы инструмент постоянно касался боковых сторон профиля номинальной поверхности, осуществляя обкат и одновременное проскальзывание по криволинейному профилю, с изменением угловой амплитуды вращательного движения по образующей конуса до W_2 (рис. 7) и далее при обработке до дна профиля – W_3 .

Рис. 6. Схема последовательных этапов обработки при формообразовании канавки

При моделировании траектории относительного движения инструмента необходимо рассчитывать максимально-возможные угловые амплитуды поворота оси инструмента W_1 , W_2 , W_3 по образующей конуса, вершина которого находится в центре радиусного участка инструмента, соблюдая при этом условия касания инструментом противоположных сторон профиля т.к. это обеспечивает максимально возможное перемещение вершин режущих кромок относительно поверхности резания в процессе движения инструмента по профилю, т.е. более эффективное охлаждение режущих кромок и повышение стойкости инструмента. Кроме того, при обычном построчном фрезеровании на горизонтальных участках обрабатываемого профиля работают режущие кромки, расположенные в непосредственной близости от оси фрезы, т. е. со скоростями резания близкими к нулю, что ведет к снижению качества обработки и ускоренному износу инструмента. Приведенная траектория движения концевой радиусной фрезы обеспечивает возможность работы участками режущих кромок находящимися на максимально возможном расстоянии от оси фрезы, т.е. с оптимальной скоростью резания.

Рис. 7. Обобщенная схема изменения угла вращательного движения по образующей конуса, обеспечивающего максимальное смещение вершины режущей кромки в направлении срезаемого слоя относительно поверхности резания

Таким образом, смещение вершины режущей кромки относительно поверхности резания ведет к постоянному обновлению участков режущей кромки, участвующих в процессе резания, т.е. тепло, выделяемое в процессе резания распределяется на большем участке передней поверхности и, как следствие, снижению теплонапряженности на передней и задней поверхностях зуба, что в свою очередь повышает стойкость инструмента и производительность обработки.

На рис. 8, 9, 10, 11, 12, 13 представлены результаты комплекса теоретических исследований температуры на передней поверхности инструмента для метода с качательным движением фрезы (рис. 4, 5) и построчным фрезерованием при изменении одного из варьируемых параметров при постоянстве других.

Рис. 8. Распределение температуры резания на передней поверхности зуба при изменении скорости резания V м/мин; $S_z=0,12$ мм/зуб; $V_{BK}=0,16$ м/мин; Сталь 45: а – $V=100$ м/мин; б – $V=150$ м/мин; в – $V=200$ м/мин

Рис. 9. Распределение температуры резания на передней поверхности зуба при изменении подачи на зуб S_z ; $V=150$ м/мин; $V_{BK}=0,16$ м/мин; Сталь 45: а – $S_z=0,08$ мм/зуб; б – $S_z=0,12$ мм/зуб; в – $S_z=0,16$ мм/зуб.

Рис. 10. Распределение температуры резания на передней поверхности зуба при изменении скорости ВК движения V_{BK} ; $V=150$ м/мин; $S_z=0,12$ мм/мин; Сталь 45: а – $V_{BK}=0,16$ м/мин; б – $V_{BK}=1,6$ м/мин; в – $V_{BK}=3,2$ м/мин; Сталь 9ХС: г – $V_{BK}=0,16$ м/мин; д – $V_{BK}=1,6$ м/мин; е – $V_{BK}=3,2$ м/мин

Рис. 11. Распределение температуры резания на передней поверхности зуба при построчном фрезеровании при изменении скорости резания V ; $S_z=0,12$ мм/зуб; Сталь 45: а – $V=100$ м/мин; б – $V=150$ м/мин; в – $V=200$ м/мин; Сталь 9ХС: г – $V=100$ м/мин; д – $V=150$ м/мин; е – $V=200$ м/мин

Рис. 12. Развертка температурных полей (сталь 45) при: а – фрезеровании с возвратно-качательным движением подачи; б – построчном фрезеровании

Рис. 13. Изменение температуры на передней поверхности зуба: а – при изменении скорости резания V , Сталь 45: 1 – фрезерование с возвратно-качательным движением подачи, 2 – построчное фрезерование; Сталь 9XC: 3– фрезерование с возвратно-качательным движением подачи, 4 – построчное фрезерование; б – при изменении скорости возвратно-качательного движения подачи V_{BK}

Экспериментальные исследования износостойкости режущих пластин (рис. 14, 15,) и температур в зоне резания (рис. 16) подтверждают характер изменения температур теоретической модели процесса.

Рис. 14. График зависимости износа инструмента по задней поверхности от: а – скорости резания V , Сталь 45: 1 – фрезерование с возвратно-качательным движением подачи, 2 – построчное фрезерование; Сталь 9XC: 3– фрезерование с возвратно-качательным движением подачи, 4 – построчное фрезерование; б – скорости возвратно-качательного движения подачи

а)

б)

в)

Рис. 15. Износ инструмента по задней поверхности: а, б – при фрезеровании с возвратно-качательным движением подачи; в – при построчном фрезеровании

а)

б)

Рис. 16. График зависимости температуры на передней поверхности от: а – скорости резания V, Сталь 45: 1 – фрезерование с возвратно-качательным движением подачи, 2 – построчное фрезерование; Сталь 9XC: 3 – фрезерование с возвратно-качательным движением подачи, 4 – построчное фрезерование; в – скорости возвратно-качательного движения подачи

Выводы

Разработана и представлена гамма методов фрезерования сложных фасонных поверхностей, позволяющая различными способами в процессе обработки обеспечить скольжение режущей кромки относительно поверхности резания, что способствует повышению эффективности обработки.

Разработанная с использованием программного комплекса Abaqus 6.12 теоретическая модель распределения тепловых потоков в режущем клине для двух способов фрезерования позволила установить снижение температуры РК до 330,2...395,5°C, т.е. на 80,6...181,6° С для стали 9XC и до 193,8...285°C, т.е. 56,6...120,2°C для стали 45 по сравнению с построчным фрезерованием. Установлено, что активная длина контакта режущих кромок увеличивается в 2,4 раза, при этом экстремальные значения температуры локализуются как и при построчном фрезеровании в средней части.

Экспериментально установлено, снижение износа инструмента при скоростях резания $V=100-200$ м/мин, подачах на зуб $S_z=0,08-0,16$ мм/зуб, скоро-

стях возвратно-качательного движения $V_{BK}=0,16-3,2$ м/мин в среднем в 1,7 раза при обработке стали 45 и в 1,34 раза при обработке стали 9ХС по сравнению с построчным фрезерованием.

Список литературы:

1. Sandvikens A.B. Руководство по металлообработке. Sweden, 2008. 564 с.
2. Сахаров Г.Н., Арбузов О.Б., Боровой Ю.Л. Металлорежущие инструменты. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
3. Патент № 2167746. Способ обработки криволинейных поверхностей / Амбросимов С.К., Петрухин А.А. Липецк техн. Ун-т.; Опубл. 27.05.2001. Бюл. № 15.
4. Патент № 22008502. Способ обработки фасонных вогнутых поверхностей / Амбросимов С.К., Стежкин М.Р. Липецкий техн. ун-т.; Опубл. 20.07.2003. Бюл. № 20.
5. Патент № 2344023 Способ винтового чернового фрезерования фасонных поверхностей / Амбросимов С. К. Липецкий техн. ун-т.; Опубл. 20.01.2009. Бюл. № 2.
6. Патент № 2497636 Способ обработки сложных криволинейных поверхностей / Амбросимов С.К., Косенков М.А., Амбросимов К.С. Липецкий техн. ун-т.; Опубл. 10.11.2013. Бюл. № 31.
7. Патент № 2514256 Способ обработки сложных криволинейных поверхностей / Амбросимов С.К., Бугаков А.И. Липецкий техн. ун-т.; Опубл. 24.04.2014. Бюл. №12.

References:

1. Sandvikens A.B. Metallworking technical guide. Sweden, 2008. 564 p.
2. Saharov G.N., Arbuzyov O.B., Borovoy U.L. Machine tools. M.: Machinebuilding, 1989. 328 p.
3. Patent №2167746 (RU). Machine method for treatment of complex surfaces / Ambrosimov S.K., Petruhin A.A. Lipetsk tech. University; Printed. 27.05.2001. Bul. № 15.
4. Patent № 22008502 (RU). Machine method for treatment of curved concave surfaces / Ambrosimov S.K., Styezshkin M.R. Lipetsk tech. University; Printed. 20.07.2003. Bul. № 20.
5. Patent № 2344023 (RU). Machine method for helical rough milling curved surfaces / Ambrosimov S.K. Lipetsk tech. University; Printed. 20.01.2009. Bul. № 2.
6. Patent № 2497636 (RU). Machine method for treatment of complex curved surfaces / Ambrosimov S.K., Kostnrjv M.A., Ambrosimov K.S. Lipetsk tech. University; Printed. 10.11.2013. Bul. № 31.
7. Patent № 2514256 (RU). Machine method for treatment of complex curved surfaces / Ambrosimov S. K., Bugakov A. E. Lipetsk tech. University; Printed. 24.04.2014. Bul. №12.

© 2014, Амбросимов С.К.

Исследование новых методов фрезерования со скольжением режущей кромки относительно поверхности резания

© 2014, Ambrosimov S.K.

Research of new milling methods with sliding cutting edge relatively cutting zone