

## **РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНОГО ФУНКЦИОНАЛА КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ**

Современное машиностроение характеризуется повышением требований к геометрическим параметрам качества изготовления поверхностей деталей. При этом необходимо обеспечить не только заданные требования качества поверхности, но и их стабильность, которая определяется стохастическими характеристиками параметров геометрии поверхности детали, задаваемыми законом их распределения. На сегодняшний день перед производителями остро стоит вопрос о соотношении качества и себестоимости продукции. Решение этой задачи можно получить путём применения высокоскоростной лезвийной обработки. Однако для достижения высокого качества поверхностей сложной конфигурации при высокоскоростной обработке необходимо глубокое понимание и изучение процессов и явлений, протекающих при резании и формировании микроструктуры.

При рассмотрении параметров влияющих на качество обрабатываемой поверхности, дополнена сводная структурная схема факторов, представленная в 2003 году исследователями Бернадосом и Восняксом [1] следующими параметрами: стойкость инструмента, удельный съём материала, скорость деформации, а при рассмотрении кинематики процесса внимание уделено трохоидальной траектории движения инструмента (рис. 1).

В связи с тем, что концевые сферические фрезы (КСФ) являются основным инструментом, применяемым при высокоскоростной обработке сложных поверхностей, становятся актуальными исследования, направленные на решение проблемы технологического обеспечения геометрических параметров качества деталей сложной конфигурации и разработки функционала характеризующего качество таких поверхностей. Анализ работ отечественных и зарубежных учёных, позволил получить краткую характеристику факторов, влияющих на качество обработанной поверхности при ВСФ:

1. С увеличением скорости резания качество поверхности улучшается т.к. в процессе обработки происходит снижение коэффициента трения между материалом и заготовкой; уменьшение сил резания; удаление практически всего тепла с зоны резания со стружкой. Однако процесс сопровождается значительным увеличением диффузии в процессе износа, что требует защиты режущего инструмента (РИ) специальным покрытием [2].



Рис. 1. Факторы, влияющие на геометрические параметры качества поверхности

Учитывая тот факт, что любая точка криволинейной поверхности может быть представлена как точка на прямой направленной к оси X под углом  $\theta$  (рис. 2) [3], минимальная и максимальная эффективная скорость резания ( $V_{рез}$ ) (скорости граничных точек рабочей режущей кромки) может быть определена по ниже представленным формулам [4]:

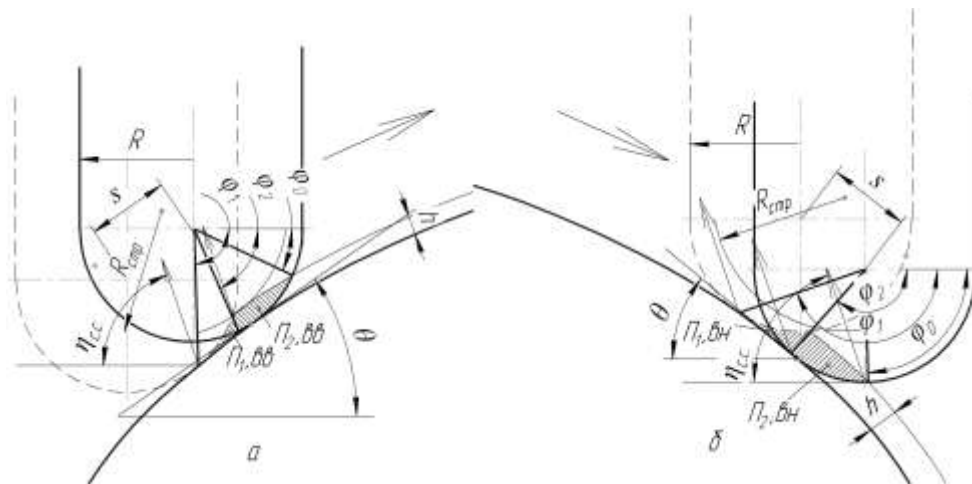


Рис. 2. Определение положения точки на криволинейной поверхности: а) при движении концевой сферической фрезы по левой эвольвентной поверхности; б) при движении концевой сферической фрезы по правой эвольвентной поверхности

$$V_{eff.max} = \frac{2 \pi \cdot N \cdot R \cdot \sin\left(\theta + \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right)\right)}{1000}, \quad (1)$$

$$V_{eff.min} = \frac{2 \pi \cdot N \cdot R \cdot \sin\left(\theta - \arcsin\left(\frac{f_z}{R}\right)\right)}{1000}, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус сферической части фрезы,  $\theta$  – угол наклона обрабатываемой поверхности относительно горизонтальной плоскости (рис. 4),  $h$  – глубина резания (величина припуска),  $f_z$  – подача на зуб,  $N$  – скорость вращения шпинделя.

2. С увеличением скорости подачи ( $S$ ) шероховатость поверхности увеличивается из-за роста силы резания, вибраций в технологической системе СПИД, образования нароста и, как результата, износа инструмента [5]. Определить скорость подачи можно по формуле:

$$S(f_z, z, N) = N \cdot z \cdot f_z, \quad (3)$$

где  $z$  – число зубьев РИ.

3. Известно, что увеличение глубины резания ( $a_p$ ) вызывает рост силы резания и амплитуды вибраций. Как результат, возрастает температура в области резания и, следовательно, ухудшается качество обрабатываемой поверхности. При обработке концевыми сферическими фрезами  $a_p$  рекомендуется определять следующим образом [6]:

$$a_p(R) = \begin{cases} 0,10 \cdot 2R \Leftarrow HRC(30 \leq 40), \\ 0,05 \cdot 2R \Leftarrow HRC(40 \leq 50), \\ 0,04 \cdot 2R \Leftarrow HRC(50 \leq 60). \end{cases} \quad (5)$$

4. Геометрия режущего инструмента (ГРИ) имеет непосредственное влияние на формирование микрогеометрии обрабатываемого материала, так как зазубрины лезвия копируются непосредственно на гребешках обработанной поверхности, увеличивая их высоту. Кроме того, шероховатость режущей кромки (РК) может копироваться на обработанной поверхности. Доказано, что при увеличении радиуса закругления вершины РИ шероховатость поверхности уменьшается, износостойкость повышается в пределах оптимальной шероховатости, усталостная прочность увеличивается. Однако, следует отметить, что увеличение радиуса закругления РК, а также затупление РИ, влекущее за собой появление на задней поверхности площадки износа, увеличение трения в зоне резания и нагрев поверхностного слоя усиливают тепловые напряжения растяжения и ослабляют напряжения сжатия [7]. Рассматривая влияние ГРИ отметим, что изменение величины переднего угла в небольшой степени влияет на шероховатость обработанной поверхности, так как величина его на переходной РК изменяется мало, а вот задний угол оказывает более значительное влияние на шероховатость, так как по мере износа РИ усиливается трение задней поверхности инструмента по об-

работанной поверхности; с уменьшением главного угла в плане шероховатость обработанной поверхности уменьшается. Шероховатость РК обычно больше средней шероховатости на передней и задней поверхностях. Отметим, что увеличение шероховатости РК и значительное затупление РИ также приводят к увеличению наклепа.

5. Влияние обрабатываемости материала на качество поверхности определяется следующими его характеристиками: химическим составом и твёрдостью, определяемую состоянием структуры материала, пределом прочности и относительным удлинения, коэффициентом трения в паре с инструментальным материалом, свойством изнашивать лезвия инструмента, теплопроводностью и т.д.

Чем выше твердость обрабатываемой стали, тем меньше высота микронеровностей; по мере увеличения скорости резания влияние твердости на шероховатость обработанной поверхности снижается [8].

6. Материал РИ, как и качество поверхностного покрытия, точность и особенности геометрии влияют на его стойкость. В условиях высокоскоростного резания обработка производится с высокой частотой ударов режущей кромки о металл, а воздействие вибрации и температурных колебаний на высоких скоростях еще более усугубляют общую картину. Поэтому для обеспечения требуемого качества обрабатываемой поверхности необходимо особое внимание уделять твёрдости инструмента, его покрытию и значению сопротивления изгибу [9].

7. От величины «stepover» ( $a_e$ ) ( шага перемещения между двумя последовательными проходами) зависит величина оставляемых гребешков  $h$  на обработанной поверхности, а следовательно и качество изделия. Величина «stepover» является входной величиной для расчёта высоты оставляемых гребешков [6]:

$$a_e(R) = 2 \cdot \sqrt{R^2 - (R - h)^2}. \quad (6)$$

Для оценки шероховатости можно использовать следующее соотношение:  $R_a \approx 25\%h$ .

8. Удельный съём материала ( $MRR$ ) влияет на качество обрабатываемой поверхности посредством симбиоза параметров глубины резания и подачи. Однако необходимо отметить, что при ВСО комбинируя параметры высокой скорости резания и малых радиальных глубин резания, в зависимости от стратегии обработки, достижимы высокие показатели удельного съёма металла и низкие значения шероховатости обработанной поверхности [10]. Определение удельного съёма материала при обработке концевыми сферическими фрезами при соблюдении условия  $h < a_p < R$ , представлено в работе [11] следующим уравнением:

$$MRR(a_e, R, a_p, S) = S \cdot [a_e \cdot a_p] - \left[ a_e \cdot R - \frac{a_e}{2} \cdot \sqrt{R^2 - \left(\frac{a_e}{2}\right)^2} \right] \times R^2 \times \sin^{-1} \left[ \frac{a_e}{2R} \right]. \quad (7)$$

9. Как известно, стойкость РИ (износ) ( $T$ ) вызывает такие динамические явления процесса резания, как вибрации, что предопределяет ухудшение качества обрабатываемой поверхности. В частности, инструмент стирается в процессе стружкообразования и в случае использования инструмента с ленточкой износа (на задней поверхности РИ); однако, справедливости ради отметим, что в некоторых условиях ленточка (фаска) износа может полировать (шлифовать) обрабатываемую деталь, и генерировать хороший конечный результат. Исследованиям стойкости РИ посвящены работы Тейлора (8) [12] и др. учёных, в частности в работе [13] приведены исследования и эмпирическая формула (9) определения срока службы РИ при ВСФ титанового сплава:

$$V_{рез} T^n = C, \quad (8)$$

где  $C, n = const$ .

$$T(a_p, S, V_{рез}) = 6,8528 \cdot 10^{-5} \cdot a_p^{-2,93442} \cdot S^{-3,201843} \cdot V_{рез}^{0,49855}. \quad (9)$$

10. Применение смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) благоприятно воздействует на процесс резания металлов: значительно уменьшается износ РИ, повышается качество обработанной поверхности и снижаются затраты энергии на резание. Однако при ВСФ рекомендуется применение масляного тумана, воздушного обдува или обильной непрерывной подачи СОЖ, так как при прерывистом охлаждении на РИ могут образоваться трещины, и он выйдет из строя, а качество обработанной поверхности будет иметь неудовлетворительный результат.

11. В процессе обработки силы резания непостоянны ввиду переменного сечения снимаемой стружки и неравномерной твердости материала обрабатываемой детали. Они увеличиваются также по мере затупления РК инструмента, что ведёт к ухудшению качества обработанной поверхности. Отметим, что значение силы резания не может быть установлено априорно, оно зависит от большого количества факторов [14, 15]. Величина силы резания не является входным фактором для определения шероховатости поверхности и используется в качестве индикатора динамических характеристик системы заготовка-инструмент-станок, поэтому в рамках поставленной задачи не рассматривается.

12. Возникновение отклонений (отжимов), которые получаются вследствие недостаточной жёсткости отдельных составляющих системы СПИД, вызывает неудовлетворительные результаты обработки, отклонение формы детали и увеличение шероховатости обработанной поверхности. Многочисленными опытами установлено, что жесткость станка зависит не столько от жесткости его деталей, сколько от тщательно-

сти сборки и регулировки его узлов [16], следовательно, при рассмотрении жесткости как составляющей интегрального функционала качества её величиной можно пренебречь.

13. Скорость деформации обрабатываемого материала ( $V_{деф}$ ) при высокоскоростной многолезвийной обработке (один из важнейших показателей с точки зрения физики процесса) приводит к неоднородности напряжений и деформации материала по длине рабочей части РК КСФ из-за различных  $V_{рез}$  в каждой рабочей точке, что предопределяет повышенное упрочнение, а значит и более высокую плотность дефектов кристаллической решетки по сравнению с аналогичной деформацией при меньшей скорости. Следовательно, структура, сформировавшаяся в процессе деформации, зависит от скорости деформации и температуры, что в свою очередь влечет увеличение пластичности обрабатываемого материала и снижение его механических свойств [17, 18].

В работе Дальского А.М. отмечено, что высокая точность и малая шероховатость обработанной поверхности обеспечиваются применением высоких скоростей резания, малых подач и глубин резания [19], однако приняв во внимание влияния и зависимости всех вышеперечисленных факторов с геометрической точки зрения мы определили, что шероховатость поверхности при фрезеровании КСФ в большой мере зависит как от упомянутых факторов, так и от радиуса закругления сферической части фрезы, так как все эти параметры являются определяющими для остальных. А скорость деформации при ВСФ концевым сферическим многолезвийным инструментом имеет значительное влияние на формирование структуры и качества поверхностного слоя, и может способствовать образованию структур, характерных для высокосортной деформации кручения, в том числе наноструктур.

В ходе решения поставленной задачи на основании анализа факторов, влияющих на формирование качественной поверхности при ВСФ КСФ, и представленных теоретических и экспериментальных исследований отечественных и зарубежных учёных впервые представлен и обоснован суммарный интегральный функционал качества:

$$R_g^\Sigma = \int (R, a_p, S, V_{рез}, V_{деф}) dt \rightarrow min, \quad (10)$$

где  $R$  – радиус сферической части концевой фрезы (мм),  $a_p$  – глубина резания (мм),  $S$  – подача (мм/мин),  $V_{рез}$  – скорость резания (м/мин),  $V_{деф}$  – скорость деформации ( $c^{-1}$ ).

Минимизацию данного функционала можно осуществить известными методами многопараметрической оптимизации в зависимости от реальных условий обработки, что позволит ранжировать параметры и контролировать качество обрабатываемой поверхности путём корректировки входных параметров.

По мере увеличения  $V_{рез}$  вклад геометрических параметров в суммарный функционал уменьшается и возрастает роль деформационных процессов. Дальнейшая минимизация функционала и уменьшение шероховатости обрабатываемой поверхности возможна за счёт придания инструменту сложной траектории движения, например трохойдальной. В этом случае по своим параметрам фрезерованная поверхность стремится к поверхности характерной для шлифования, т.е. носит стохастический характер (приводит к усилению стохастического характера в пределе от геометрического к стохастическому описанию). Таким образом, фрезерованную поверхность можно рассматривать как реализацию случайного процесса с нормальным распределением амплитуд, в которой параметры шероховатости поверхности будут функционалами, заданными на множестве реализации случайной функции. Т.е. необходимо рассмотреть и минимизацию функционала среднего квадрата отклонений [20, 21]:

$$R_g^2 = \frac{1}{L} \int x^2(l) dl, \quad (11)$$

где  $L$  – интервал, на котором рассматривается процесс,  $x(l)$  – стохастический процесс.

#### *Список используемых источников*

1. Benardos P.O. Predicting surface roughness in machining: a review / P.O. Benardos, G.C. Vosniakos // International Journal of machine Tools and Manufacture. – 2003. – №43. – P. 833-844.
2. N. López de Lacalle. Machine Tools for High Performance Machining. [Text] / N. López de Lacalle, A. Lamikiz. – 2008. – 442 p.
3. Добротворский С.С. Геометрические параметры плоскости сдвига при высокоскоростной обработке эвольвентной поверхности концевой фрезой со сферическим концом [Текст] / С.С. Добротворский, Е.В. Басова // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. – №2(87). – ст. 95-100.
4. Daymi, A. Influence of workpiece inclination angle on the surface roughness in ball end milling of the titanium alloy Ti-6Al-4V [Text] / A. Daymi, M. Boujelbene, J.M. Linares, and etc. // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2009. – Vol. 35 (1). – pp. 79-86.
5. Корас, J. High precision machining on high speed machine / J.Корас // Journal of achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2007. – Vol. 24(1). – pp. 405-412.
6. Technical Handbook [Текст] : информ.-аналит. журн. / учредитель ООО «ОТС–Технологии». – Е. : ОТС–Технологии. – 2010. – 145 ст.

7. Аршинов В.А. Резание металлов и режущий инструмент, 1964, 544 с.
8. Проблемы развития технологии машиностроения. /Под ред. Сателя Э.А. М.: Машиностроение, 1968. - 592 с.
9. Режущий инструмент для HSM обработки [Электронный ресурс] // <http://www.e-consul.ru>
10. Никоноров, А. Стратегии и методы обработки, применяемые при фрезеровании. Опыт применения в производстве [Электронный ресурс] // <http://mtt.com.ua>
11. QUINTANA G. Surface Roughness Generation and Material Removal Rate in Ball End Milling Operations/ QUINTANA G.; DE CIURANA J.; RIBATALLADA J. // Materials and manufacturing processes A. 2010, vol. 25, n 4-6, pp. 386-398
12. N. López de Lacalle. Machine Tools for High Performance Machining.[Text]/ N. López de Lacalle, A. Lamikiz. – 2008. – 442 p.
13. Zhigang W. High-speed milling of titanium alloys: modeling and optimization/ W. Zhigang, B. Eng, M. Eng // A thesis submitted for the degree of doctor of philosophy. – National university of Singapore. – 2005. – 206 p.
14. Внуков, Ю. Н. Особенности расчета составляющих силы резания при торцевом фрезеровании сферическими фрезами [Текст] / Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Х. : НТУ «ХПІ», 2010. – 350 с.
15. Vecze, C. E. High-speed five-axis milling of hardened tool steel / C. E. Vecze, P. Clayton, L. Chen and ath. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2000. – Vol. 40 (6). – PP. 869-885.
16. Жесткость и вибрации при токарной обработке [Электронный ресурс] // <http://metalloobrabotk.ucoz.com>
17. Сулима А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов [Текст] / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
18. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией [Текст] / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000.–з 272 с.
19. Дальский А.М. Технология конструкционных материалов [Текст] / А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2003.– 511 с.
20. Добротворский С.С. Шероховатость поверхности и контроль ее качества./ С.С. Добротворский, А.С. Мазманишвили Л. Г. Добровольская // Технологии в машиностроении; под ред. Ю.В. Тимофеева. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2006 – №18.
21. Добротворский С.С. Теоретический анализ и контроль шероховатости шлифованных поверхностей. / С.С. Добротворский, А.С. Мазманишвили Л. Г. Добровольская // Технологии в машиностроении; под ред. Ю.В. Тимофеева. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2007. – №1. – с. 32-39.