

УДК 621.91.01/621.914.22

**Н. Н. ПОПОК**, д-р техн. наук, проф.

**В. С. АНИСИМОВ**

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой  
(Новополоцк, Беларусь)

## **СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ НА СТАНКАХ С ЧПУ**

### **Аннотация**

Рассмотрено повышение производительности обработки сложнопрофильных поверхностей деталей и эффективности мощности приводов станка с ЧПУ путем использования концевых фрез с крутонаклонными режущими кромками. Приведены зависимости изменения сил резания от времени и режимов обработки фрезами различных фирм-производителей.

### **Ключевые слова:**

сложнопрофильная поверхность, плоская поверхность, деталь, концевая фреза, сила резания, мощность привода, производительность, станок с ЧПУ.

**Введение.** В современной технике широко применяются детали, форма которых включает сочетание различных поверхностей – цилиндрических, конических, сферических, винтовых, плоских и криволинейных, например, шаровые пальцы рычагов автомобилей, оси тяги ремизы, тройники запорной арматуры, корпуса с полостями, матрицы и пуансоны штампов, кулачки и эксцентрики механизмов автоматов и т. п. При механической обработке таких поверхностей деталей на станках с ЧПУ реализуются сложные кинематические схемы и траектории резания, переменные величины скоростей и подач заготовки и режущего инструмента. Стремление в этом случае повысить производительность обработки за счет увеличения значений скорости и подачи приводит к снижению потребляемой мощности приводов станка и неэффективной их загрузке. То есть требуется решение задачи по увеличению производительности обработки сложнопрофильных поверхностей деталей при обеспечении максимально возможных значений потребляемой мощности приводов станков с ЧПУ и сохранении требуемой стойкости режущих инструментов.

**Основная часть.** Одним из путей решения этой задачи является использование вращающихся инструментов – концевых фрез, ротационных резцов и т. п., обеспечивающих касательное движение крутонаклонных режущих кромок [1]. Тенденция по все более широкому применению таких типов инструментов прослеживается в ряде ведущих зарубежных фирм, таких, например, как «SandvikCoromant» (Швеция), «Seco» (Япония), «Hertel» (Германия), «Guhring» (Германия), «Iscar» (Израиль), «TaeguTec» (Корея) и др. [2]. При этом не обосновывается, за счет каких кинематических, физических и технологических особенностей обеспечиваются преимущества касательного движения резания и

режущих инструментов с крутонаклонными кромками. Вместе с тем, в ряде ранее проведенных исследований явлений, сопровождающих сложные виды обработки резанием, например, Г. И. Грановским [3], В. Ф. Бобровым [4], Е. Г. Коноваловым [5], П. И. Ящерицыным [6] и др., эти преимущества доказаны, но в основном для традиционно используемых в то время величин скоростей и мощностей приводов станков, возможностей реализации трех- и пятиосевой обработки на станках с ЧПУ, применения прогрессивных режущих инструментов, в т. ч. с износостойким покрытием и т. п. В настоящее время актуальным является исследование кинематических и физических характеристик скоростных видов обработки сложнопрофильных поверхностей деталей на одном рабочем месте – станке с ЧПУ, вращающимися режущими инструментами с касательным движением крутонаклонной режущей кромки [7, 8]. В работе рассматриваются результаты исследований силы резания концевыми фрезами с различными углами наклона режущей кромки.

Экспериментальные исследования сил резания производятся на вертикальном обрабатывающем центре FANUC Robodrill серии a-D21LiB. Технические возможности станка: частота вращения шпинделя –  $10000 \text{ мин}^{-1}$ , программируемая рабочая подача –  $30000 \text{ мм/мин}$ , мощность главного двигателя –  $7,5 \text{ кВт}$ , размеры рабочей зоны –  $700 \times 400 \times 330 \text{ мм}$ . Форма заготовки – цилиндрическая, материал заготовки – сплав алюминия марки Д16Т. В качестве режущего инструмента используются концевые фрезы различных фирм.

Измерение сил резания производится с использованием специального сконструированного и изготовленного в условиях научно-исследовательской лаборатории программно-измерительного комплекса (ПИК), включающего: установочное приспособление фирмы System3R (Швеция); усилители сигналов акселерометров фирмы Briel Kjaer (Дания); функциональные модули сбора данных, с помощью которых осуществляется первичное преобразование и оцифровка данных с акселерометра, и тензометрический преобразователь фирмы National Instruments (США); шасси сбора данных, с помощью которого осуществляется передача оцифрованных данных на систему обработки и регистрация данных фирмы National Instruments (США); первичный тензометрический преобразователь. ПИК позволяет фиксировать силы резания в направлении осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  координатной системы станка.

Заготовка диаметром  $D$  размещается в установочном приспособлении ПИК и имеет возможность вместе с платформой последовательно перемещаться вдоль осей  $X$  или  $Y$  в движении подачи  $D_S$ . Фреза устанавливается в шпинделе станка по оси  $Z$  на глубину врезания  $A$  и глубину резания  $t$  (ширину фрезерования  $b$ ) с возможностью главного вращательного движения  $D_r$ . В ходе эксперимента производится последовательная обработка плоской поверхности сегмента заготовки длиной  $l$ . На каждый последующий проход фрезы в движении подачи  $D_S$  заготовка поворачивается на очередной обрабатываемый сегмент длиной  $l$  лыски. При этом учитываются увеличивающиеся длины контакта подвода фрезы  $l_l$  и глубины резания  $a_e$  от  $0,2$  до  $1,0 \text{ мм}$ . В ПИК предусмотрено дополнительное вращательное движение заготовки вокруг собственной оси. Таким об-

разом, технические возможности станка и ПИК позволяют реализовать обработку плоских, цилиндрических и криволинейных поверхностей детали вращающейся фрезой с врезанием по касательной к обрабатываемой поверхности заготовки.

При обработке заготовок выбираются рекомендуемые [9, 10] элементы режима резания  $v$ ,  $S$ ,  $t$  и согласовываются с техническими характеристиками станка.

Последовательность изменения элементов режима резания в опытах составляется таким образом, чтобы учесть особенности как одно-, так и трехфакторного экспериментов.

На рис. 1 показаны фрагменты осциллограмм с дисплея ПИК амплитудных изменений составляющих силы резания в течение времени подвода фрезы и обработки лыски (сегмента) не вращающихся и вращающихся заготовок, при глубине врезания  $a_e = 1,0$  мм, ширине резания  $a_p = 1,0$  мм, минутной подаче  $f_m = 1300$  мм/мин, частоте вращения шпинделя  $n = 6400$  мин<sup>-1</sup>.

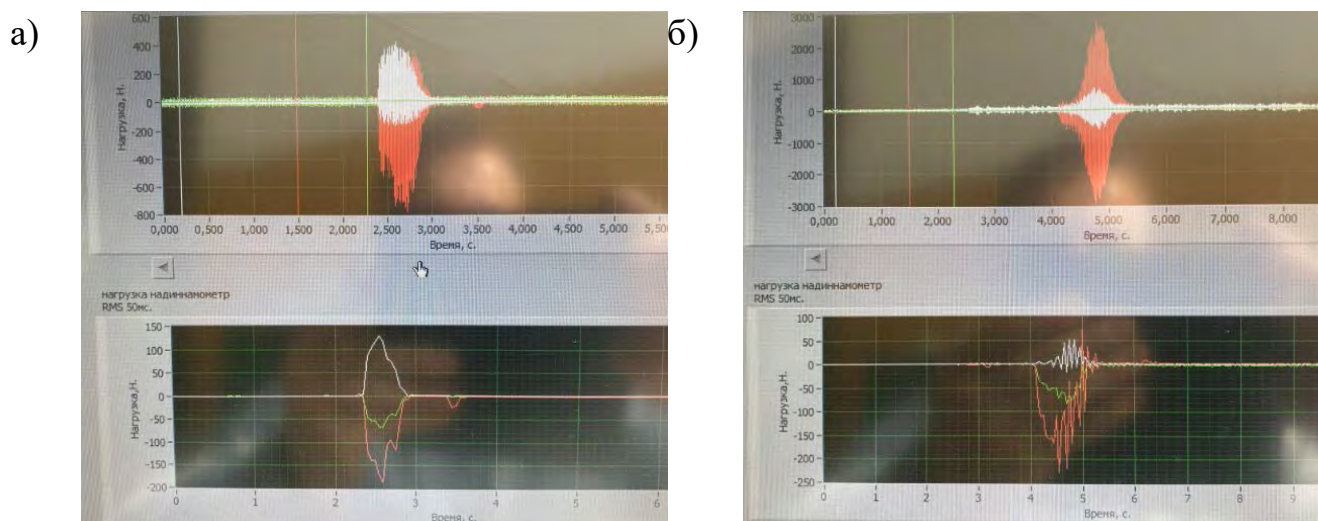


Рис. 1. Фрагменты осциллограмм амплитудных изменений составляющих силы резания при обработке не вращающейся заготовки (а) и вращающейся заготовки при встречном фрезеровании (б)

Как видно на рис. 1, осциллограммы позволяют установить изменения значений составляющих силы резания при входе и выходе фрезы в зоны резания и максимальные значения силы резания по длине обработки сегмента заготовки. Время фиксации силы резания сопоставляется со временем обработки лыски. При обработке каждого последующего сегмента возрастает время обработки  $\tau$  – от 0,2 до 1,5 с, длина лыски  $l$  – от 5 до 11 мм и глубина врезания  $a_e$  – от 0,2 до 1,0 мм.

Полученные осциллограммы обрабатываются соответствующим образом (пересчитываются) по максимальным и минимальным пикам изменения силы резания, затем строятся зависимости изменения составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  от глубины резания, подачи на зуб и скорости резания для различных фрез и значений угла наклона режущей кромки. Сопоставление значений, со-

ставляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  для различных фрез и при изменении элементов режима резания представлены на рис. 2.

Как видно из графиков, наибольшее влияние на составляющие  $P_x$  и  $P_z$  оказывает увеличение значений  $a_e$  и  $f_z$ , причем уменьшение длины режущей кромки (фрезы Guhring #19964 10WNR-HRF (20°) и Guhring #5504 12R-NRF (30°)) приводит к наименьшим значениям  $P_x$  и  $P_z$ . Увеличение скорости резания  $v$  до значений 225 м/мин практически не влияет на изменения составляющей силы резания  $P_y$ . При значении  $v$  более 225 м/мин, значение составляющей силы резания  $P_y$  резко возрастает. Также из графиков видно, что с увеличением значений скорости резания от 150 до 250 м/мин составляющие силы резания  $P_x$  и  $P_z$  изменяются незначительно, а значения  $P_y$  в диапазоне 225...250 м/мин резко возрастают, что объясняется, образованием напыва на передней поверхности лезвия в выбранном диапазоне скорости резания, который увеличивает отрицательные значения переднего угла и, следовательно, составляющие силы резания  $P_y$ .

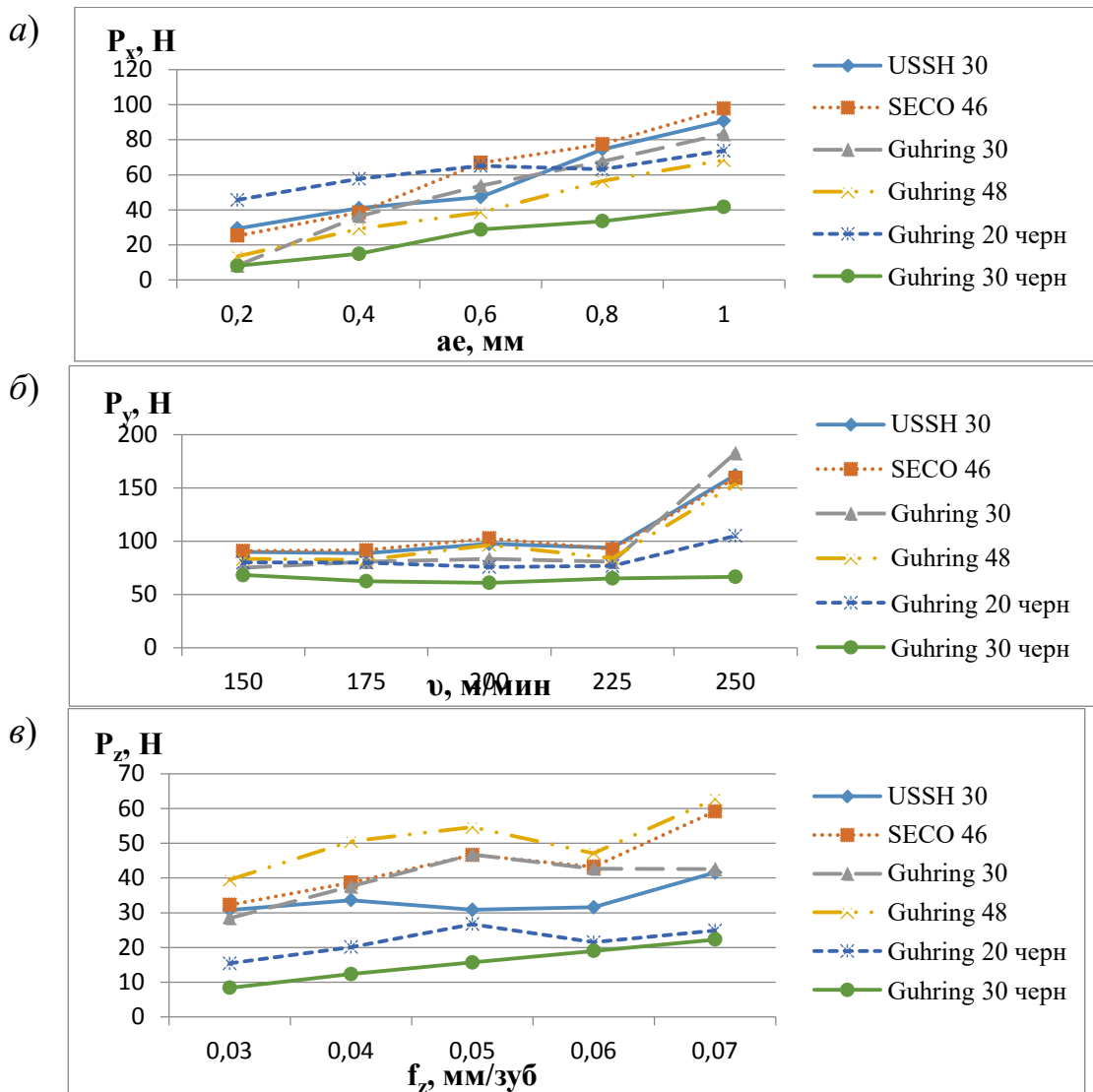


Рис. 2. Зависимости изменения составляющих  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  силы резания для различных фрез от: а – глубины резания  $a_e$ ; б – скорости резания  $v$ ; в – подачи на зуб  $f_z$

**Заключение.** По результатам проведенных исследований было выявлено, что при увеличении угла наклона главной режущей кромки лезвия фрезы  $\lambda^\circ$  с  $30^\circ$  до  $48^\circ$  происходит снижение составляющих силы резания  $P_x, P_y, P_z$  на 17 %...24 %, при обработке лыски неподвижной заготовки. При обработке вращающейся заготовки в попутном фрезеровании происходит снижение амплитудных значений составляющих силы резания  $P_x, P_y, P_z$  до 3 раз по сравнению с неподвижной заготовкой, а при встречном фрезеровании, наоборот, амплитудные значения увеличиваются с 400 до 3000 Н. При обработке неподвижной заготовки фрезой с прерывистой режущей кромкой происходит снижение составляющих силы резания  $P_x, P_y, P_z$  до 2 раз, а при увеличении угла наклона главной режущей кромки лезвия фрезы  $\lambda^\circ$  с  $20^\circ$  до  $30^\circ$  составляющие силы резания уменьшаются до 2,5–3 раз.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 25762.** Обработка резанием. – Москва: Изд-во стандартов, 1983. – 24 с.
2. SECO. Каталог + техническое руководство, 2020. – 435 с.
3. **Грановский, Г. И.** Кинематика резания / Г. И. Грановский. – Москва: Машгиз, 1948. – 199 с.
4. **Бобров, В. Ф.** Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машгиз, 1962. – 152 с.
5. **Коновалов, Е. Г.** Прогрессивные схемы ротационного резания металлов / Е. Г. Коновалов, В. А. Сидоренко, А. В. Соусь. – Минск: Наука и техника, 1972. – 272 с.
6. Ротационное резание материалов / П. И. Ящерицин [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1987. – 229 с.
7. **Попок, Н. Н.** Кинематика обработки поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом с касательным движением режущей кромки / Н. Н. Попок, В. С. Анисимов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2019. – № 11. – С. 31–38.
8. **Попок, Н. Н.** Деформация и стружкообразование при обработке плоских и криволинейных поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом на токарных и фрезерных станках с ЧПУ / Н. Н. Попок, В. С. Анисимов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2020. – № 3. – С. 28–34.
9. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение-1, 2001. – Т. 2. – 912 с.: ил.
10. Каталог инструментов GuhringSuperLine, 2016. – 150 с.

Контакты:

n.porok@psu.by (Попок Николай Николаевич);

v.anisimov@psu.by (Анисимов Виталий Сергеевич).