

УНИВЕРСАЛИЗАЦИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК, канд. техн. наук, доц. Р.С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ,
В.С. АНИСИМОВ, Д.А. БАШЛАЧЁВ*
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Цель исследований – повышение производительности обработки поверхностей деталей путем универсализации фрез. Для достижения цели решаются задачи разработки конструкций торцевой и дисковой фрез со взаимозаменяемыми резцовыми блоками и зажимными модулями и анализируется их работоспособность. Используются аналитический и экспериментальный методы исследований, позволившие установить геометрические параметры срезаемого слоя при торцевом и периферийном фрезеровании, зависимости коэффициентов усадки стружки, мощности резания и шероховатости обработанной поверхности при изменении подачи, глубины и скорости резания. Результаты исследований могут быть использованы при обработке плоских и криволинейных поверхностей деталей на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: универсальная фреза, фрезерование, мощность и сила резания, коэффициент усадки стружки, шероховатость поверхности.

Введение. В связи с тенденцией производства изделий широкой номенклатуры и в небольшом количестве все большее распространение получает изготовление деталей с использованием многоцелевых станков [1–3]. Например, на одном рабочем месте с использованием «гибридных» станков производится наплавка заготовок (аддитивные технологии) и их механическая обработка (субтрактивные технологии) или реализуются различные виды обработки: токарные, фрезерные и т.д. на станках с инструментальными магазинами, в которых размещаются различные типы режущих инструментов. При этом основное внимание уделяется универсализации конструкций применяемых режущих инструментов с целью сокращения их типов и емкости инструментальных магазинов.

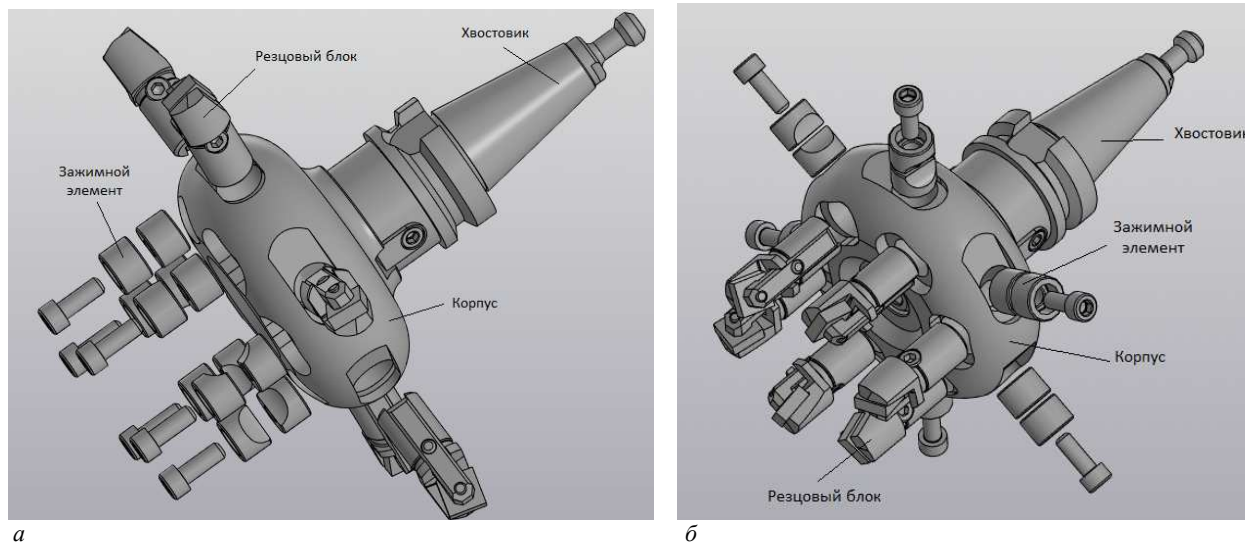
В развитии универсализации режущих инструментов прослеживается несколько направлений [4]:

- создание модульных сборных конструкций, включающих резцовые вставки, картриджи и т.п. При этом в разных типах режущих инструментов используются различные конструкции картриджей;
- применение комбинированных инструментов типа «два в одном», «три в одном», например, сверло–зенкер–развертка. Использовании комбинированных инструментов на станках с ЧПУ зачастую предусматривает уравнивание стойкости каждого типа инструмента за счет ступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя;
- использование одних и тех же типов инструментов для различных видов обработки за счет изменения движения резания, например, концевая фреза при отсутствии ее вращения применяется как проходной резец;
- оформление режущей части инструмента (выбор главной и вспомогательной режущих кромок, углов в плане) таким образом, чтобы инструмент мог работать, например, при токарных, осевых, фрезерных и других видах обработки: комбинирование сверла и резбовой фрезы, совершающих вращательные движения вокруг собственной оси при сверлении отверстия и планетарное движение вокруг оси отверстия при фрезеровании резьбы; плунжерное фрезерование с осевой подачей фрезы; трохoidalное фрезерование с поступательным и вращательным движениями подачи фрезы и др.;
- дополнительное перемещение режущих лезвий за счет встроенных зубчатых механизмов в корпусе режущих инструментов, например, план-суппорты при одновременном поступательном движении режущей кромки перпендикулярным ее вращательному движению;
- использование унифицированного резцового блока, соответствующее расположение которого в разных модулях корпусных и сообщении движения резания характерного для данного вида обработки, обеспечивает реализацию обтачивания, нарезания резьбы, растачивания, зенкования, периферийного, торцевого и охватывающего фрезерования и других видов на одном рабочем месте.

Рассмотрим одно из направлений развития универсализации режущих инструментов на примере торцово-дисковой фрезы.

Основная часть. Конструктивной особенностью универсальной торцово-дисковой фрезы является выполнение отверстий на периферийной и торцевой частях корпуса одинакового размера, что позволяет устанавливать в них как унифицированный резцовый блок, так и зажимающие его элементы. Так, например, на рисунке 1, а представлена конструкция, в которой резцовые блоки устанавливаются со стороны периферийной поверхности корпуса, а зажимные элементы – со стороны торцевой поверхности. На рисунке 1, б, наоборот,

резцовые блоки размещаются со стороны торцевой поверхности корпуса, а зажимные элементы – со стороны периферийной поверхности.



а – дисковая; *б* – торцевая

Рисунок 1. – 3D-модели универсальной фрезы

Резцовый блок включает державку, зажимные элементы в виде клиноприхвата и винта и пластину режущую¹. Поверхности державки для установки в корпусе выполняются цилиндрическими, а для установки пластины режущей и клиноприхвата – плоскими «на проход». Конструкция зажимного модуля включает два клиновидных сухаря, устанавливаемых в отверстия корпуса фрезы, охватывающих цилиндрическую часть державки блока резцового и стягиваемых винтом, вворачиваемым в резьбовое отверстие одного из сухарей. Корпус фрезы выполняется обтекаемым в виде сочетания двух торцовых поверхностей. В связи с ограничениями конструктивных габаритов корпуса фрезы при переустановке резцовых блоков и зажимных элементов с торцевого типа на дисковый тип фрезы предусматривается реверс направления вращения фрезы. Для установки инструмента в гнездо инструментального магазина используется хвостовик типа ВТ30.

Изготовлены экспериментальные образцы комбинированных фрез как из металлических материалов (сталь 40Х), так и «гибридной» конструкции, включающей корпус из пластикового материала марки АВС, отпечатанный на 3D-принтере, и блок резцовый с зажимными элементами из стали марки 40Х. Хвостовик изготавливается из стали 40Х (рисунок 2).

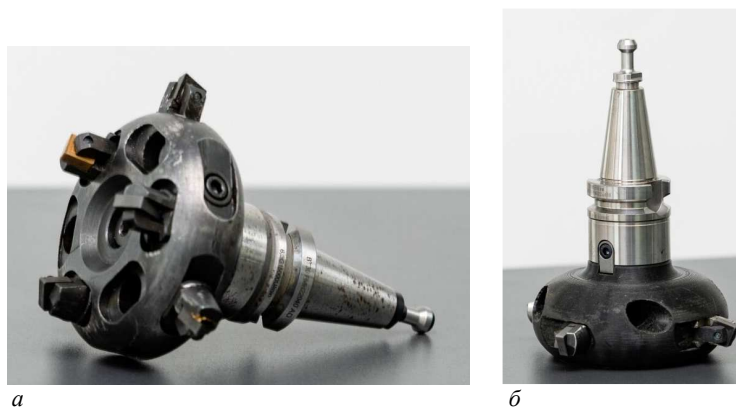


Рисунок 2. – Внешний вид универсальной фрезы из металлических (а) и «гибридных» (б) материалов

¹ Способ установки сменной режущей пластины в режущем инструменте: пат. ВУ 19260 / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, Р.С. Хмельницкий, А.В. Сидикович, И.Я. Сопиков – Выд. 12.12.2014.

В резцовые блоки устанавливаются пластины твердосплавные типа CNMG 05125-120404. Могут использоваться и другие типоразмеры и материалы пластины режущей в зависимости от обрабатываемого материала, размеров обрабатываемых конструктивных элементов и поверхностей детали, режима резания, применения смазочно-охлаждающей технологической среды и т.д.

Для проверки работоспособности фрез был проведен классический эксперимент, в котором диапазоны изменения скорости v , подачи на зуб S_z и глубины резания t выбирались по справочнику [5]. Диапазоны изменения элементов режима резания следующие: $v = 230\text{--}305$ м/мин, $S_z = 0,06\text{--}0,1$ мм/зуб, $t = 0,5\text{--}1,5$ мм. Последовательность проведения опытов и значения элементов режима резания в каждом опыте представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1. – Диапазоны изменения элементов режима резания при торцевом фрезеровании

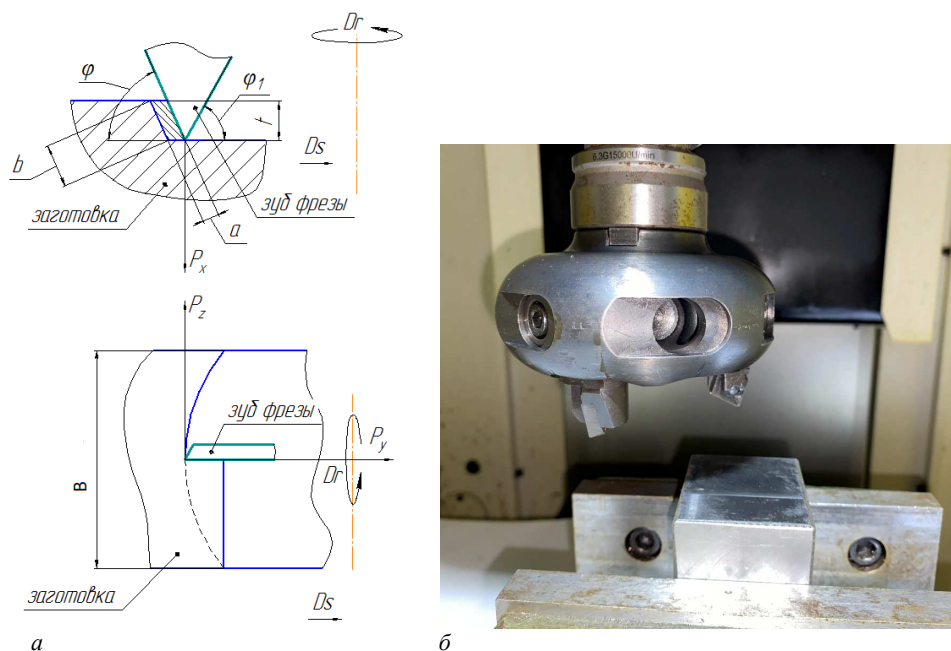
Номер опыта	t , мм	S_z , мм/зуб	v , м/мин
1	0,5	0,06	230
2	1	0,06	230
3	1,5	0,06	230
4	1	0,06	230
5	1	0,08	230
6	1	0,1	230
7	1	0,06	230
8	1	0,06	285
9	1	0,06	305

Таблица 2. – Диапазоны изменения элементов режима резания при дисковом фрезеровании

Номер опыта	t , мм	S_z , мм/зуб	v , м/мин
1	0,5	0,06	230
2	0,5	0,08	230
3	0,5	0,1	230
4	0,5	0,06	230
5	0,5	0,06	285
6	0,5	0,06	305

Обрабатывались заготовки в форме параллелепипеда с размерами $45 \times 58 \times 58$ мм из стали 45 по ГОСТ 1050 на вертикальном обрабатывающем центре модели Robodrilл серии $a\text{-D21LiB}$ фирмы Fanuc.

На рисунке 3 представлены схема и вид торцевого фрезерования.

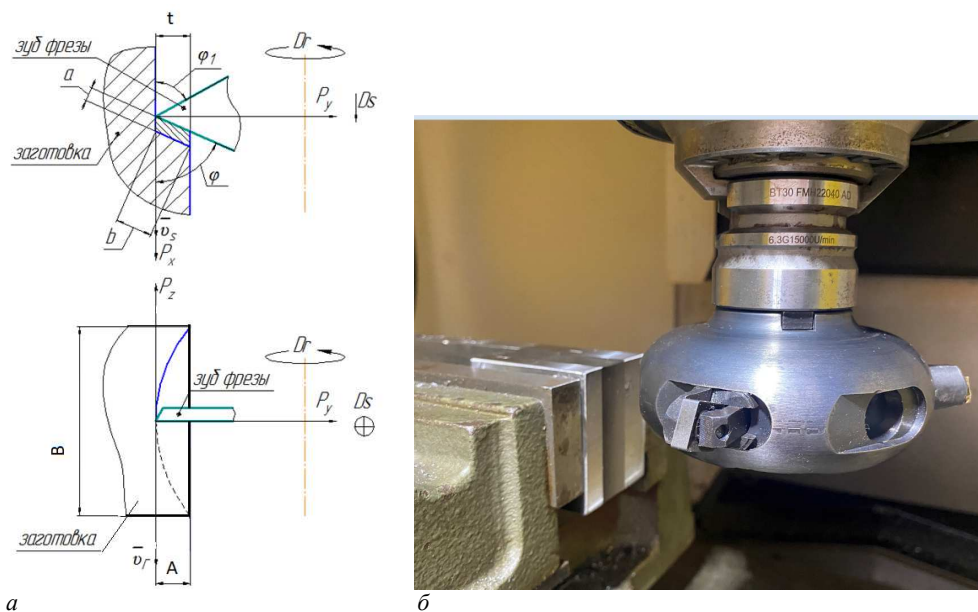


a и b – толщина и ширина сечения срезаемого слоя; t – глубина резания; ϕ и ϕ_1 – главный и вспомогательный углы в плане; P_x , P_y и P_z – осевая, радиальная и тангенциальная составляющие силы резания; D_r и D_s – главное движение и движение подачи; B – ширина фрезерования

Рисунок 3. – Схема (а) и вид (б) торцевого фрезерования

Движение подачи D_s направлено перпендикулярно оси главного вращательного движения D_r . Глубина резания t – размер снимаемого слоя в движении подачи по нормали к рабочей плоскости, которая проходит через векторы скоростей главного движения и движения подачи. Размеры сечения срезаемого слоя определяются его толщиной a , шириной b и углом в плане ϕ . Глубина врезания A фрезы в заготовку равна ширине фрезерования B (в данном случае $B = 58$ мм). Составляющие силы резания направлены: тангенциальная P_z – по касательной к поверхности резания противоположно вектору скорости главного движения, радиальная P_y – по радиусу фрезы, осевая P_x – вдоль оси главного вращательного движения фрезы.

При дисковом (периферийном) фрезеровании (рисунок 4) в отличие от торцевого фрезерования движение подачи D_s направлено вдоль оси главного вращательного движения D_r , глубина врезания фрезы A определяется шириной фрезерования B ($B = 19$ мм), не равной размеру (ширине) заготовки ($B = 58$ мм).



a и b – толщина и ширина сечения срезаемого слоя; t – глубина резания; ϕ и ϕ_1 – главный и вспомогательный углы в плане; P_x , P_y и P_z – осевая, радиальная и тангенциальная составляющая силы резания; D_r и D_s – главное движение и движение подачи; B – ширина фрезерования; A – глубина врезания фрезы; $\vec{v}_r$ и $\vec{v}_s$ – векторы линейных скоростей главного движения и движения подачи

Рисунок 4. – Схема (а) и вид (б) обработки дисковой (периферийной) фрезой

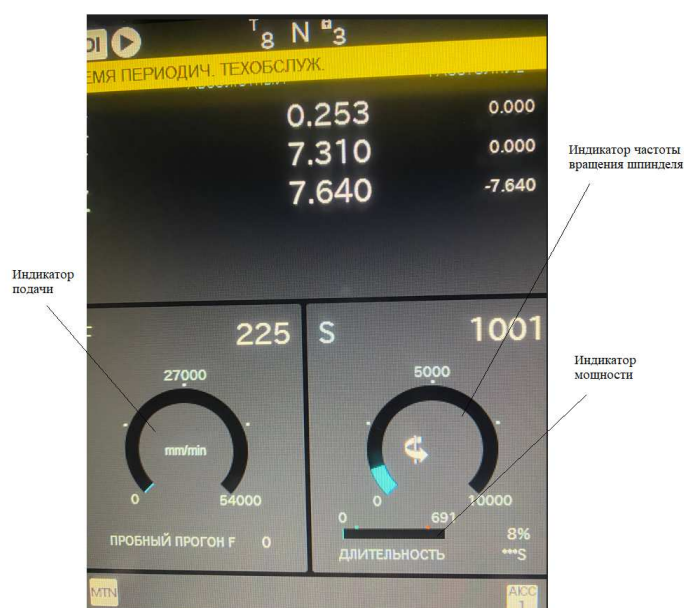


Рисунок 5. – Фрагмент дисплея стойки станка

Были проведены экспериментальные исследования работоспособности фрез, в которых фиксировались на дисплее стойки станка минимальные $N_{\min}$ и максимальные $N_{\max}$ значения потребляемой мощности (рисунок 5), определялась методом непосредственных измерений величина усадки стружки (коэффициенты утолщения k_a , уширения k_b и укорочения стружки k_l) и измерялась шероховатость обработанной поверхности (параметр Ra) на профилографе-профилометре модели «Abris-7P».

Также с использованием справочника [5] рассчитывались сила и мощность резания. Результаты расчетов и опытов представлены в таблицах 3, 4.

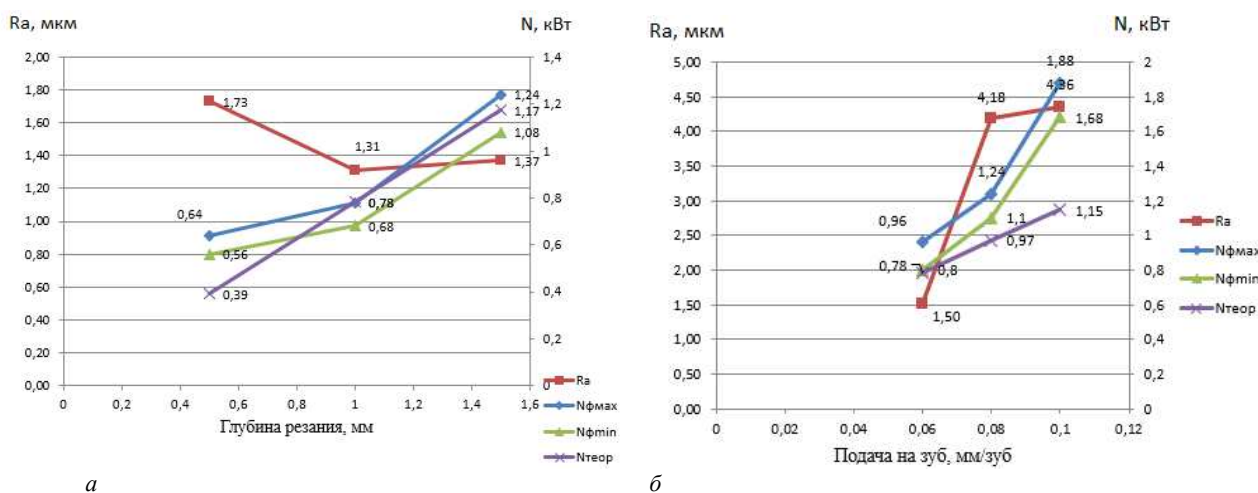
Таблица 3. – Результаты расчетов и экспериментальных исследований при обработке торцевой фрезой

Характеристика № опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_z , Н	104,06	208,13	312,20	208,13	258,25	305,30	208,13	199,29	196,79
$N_{\text{теор}}$, кВт	0,39	0,78	1,17	0,78	0,97	1,14	0,78	0,92	0,98
$N_{\text{ф min}}$, кВт	0,56	0,68	1,08	0,8	1,1	1,68	0,84	0,86	1,22
$N_{\text{ф max}}$, кВт	0,64	0,78	1,24	0,96	1,24	1,88	0,98	0,96	1,34
Ra	1,729	1,313	1,368	1,504	4,181	4,359	1,808	1,655	1,44
k_a	2,5	2,85	2,64	2,71	2,26	2,0	3	2,64	1,92
k_b	1,4	0,89	0,7	0,86	1,08	1,19	0,98	1,0	0,84
k_l	3,5	2,5	1,84	2,33	2,44	2,38	2,94	2,64	1,61

Таблица 4. – Результаты расчетов и экспериментальных исследований при обработке дисковой фрезой

Характеристика № опыта	1	2	3	4	5	6
P_z , Н	22,38	28,17	33,68	22,38	21,90	21,76
$N_{\text{теор}}$, кВт	0,08	0,11	0,13	0,08	0,10	0,11
$N_{\text{ф min}}$, кВт	0,16	0,3	0,36	0,16	0,14	0,18
$N_{\text{ф max}}$, кВт	0,22	0,44	0,56	0,2	0,18	0,24
Ra	2,551	3,969	4,84	2,738	1,455	1,527
k_a	2,64	2,16	2,17	2,64	2,5	2,5
k_b	1,59	2,25	2,32	1,54	1,86	1,79
k_l	4,20	4,86	5,03	4,07	4,65	4,48

Полученные результаты измерений и расчетов характеристик мощности привода и шероховатости поверхности от режимов резания представлены в виде графиков на рисунках 6–9.



а – от глубины резания; **б** – от подачи на зуб; **в** – от скорости резания

Рисунок 6. – Зависимости мощности привода и шероховатости поверхности при обработке торцевой фрезой (начало)

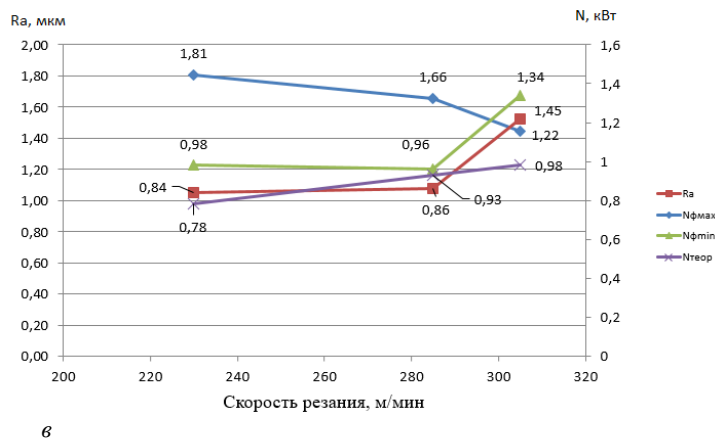
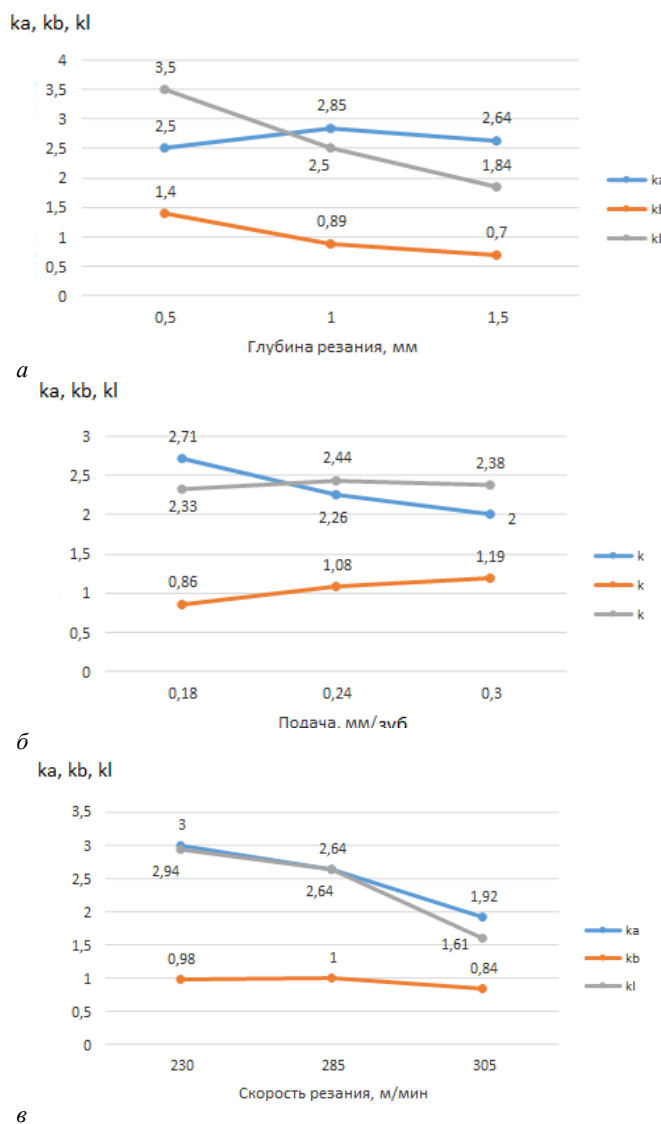
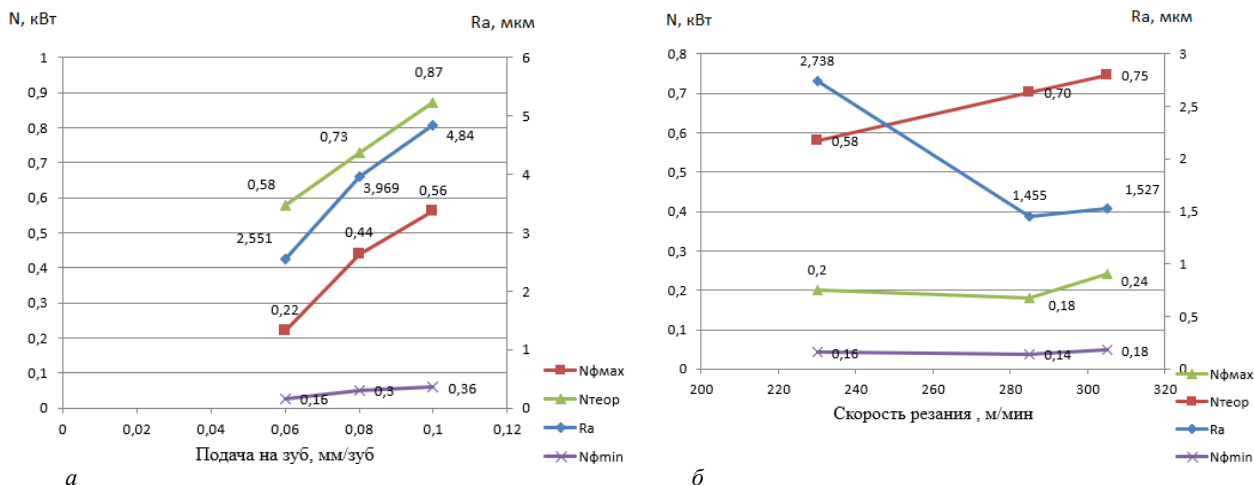


Рисунок 6. – Зависимости мощности привода и шероховатости поверхности при обработке торцевой фрезой (окончание, начало на с. 24)



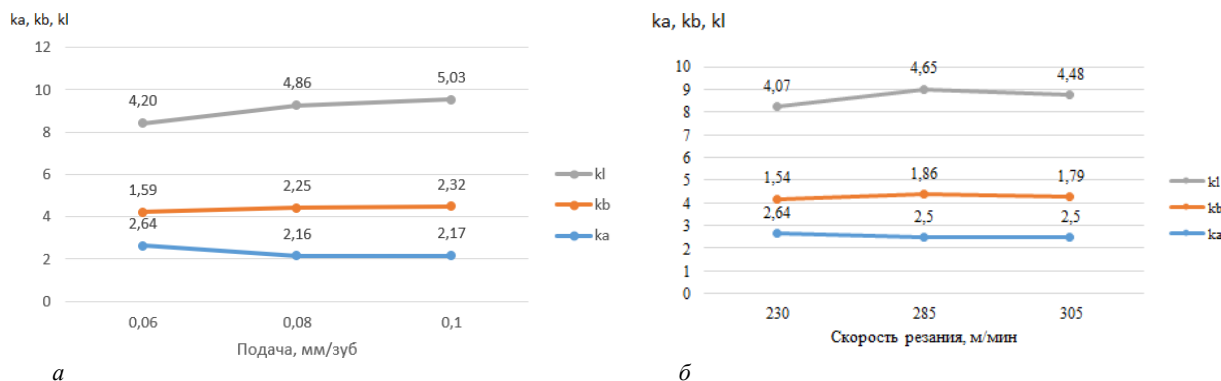
а – от глубины резания; б – от подачи на зуб; в – от скорости резания

Рисунок 7. – Зависимости коэффициентов усадки стружки ka , kb , kl при обработке торцевой фрезой



а – от подачи на зуб; б – от скорости резания

Рисунок 8. – Зависимости мощности привода и шероховатости поверхности при обработке дисковой фрезой



а – от подачи на зуб; б – от скорости резания

Рисунок 9. – Зависимости коэффициентов усадки стружки ka , kb , kl при обработке дисковой фрезой

Как видно из графиков, изменения деформационных и динамических характеристик обработки и параметра шероховатости поверхности Ra соответствуют классическим представлениям теории резания. При торцевом фрезеровании с увеличением глубины резания t минимальные $N_{\text{мин}}$ и максимальные $N_{\text{макс}}$ значения фактической мощности резания увеличиваются и близки к теоретическим значениям $N_{\text{теор}}$; показатели деформации ka , kb , kl и параметр шероховатости Ra поверхности уменьшаются незначительно. С увеличением подачи S_z значения мощности $N_{\text{мин}}$, $N_{\text{макс}}$, $N_{\text{теор}}$ и параметра шероховатости Ra возрастают, а значения ka , kb , kl – практически не изменяются. Рост скорости v приводит к увеличению мощности резания $N_{\text{мин}}$, $N_{\text{макс}}$, снижению коэффициентов усадки стружки ka , kb , kl и параметра шероховатости поверхности Ra .

При периферийном фрезеровании с увеличением подачи S_z значения мощности резания $N_{\text{мин}}$, $N_{\text{макс}}$ и параметра Ra шероховатости поверхности возрастают, показатели деформации изменяются незначительно. С увеличением скорости резания v значения мощности резания $N_{\text{мин}}$, $N_{\text{макс}}$ возрастают, а значения параметра Ra снижаются, значения ka , kb , kl практически не изменяются. С увеличением подачи S_z мощность резания возрастает, т.к. увеличивается толщина сечения срезаемого слоя. При этом ее значение меньше, чем при фрезеровании торцевой фрезой (рисунок 10), т.к. меньше ширина фрезерования B (примерно в 3 раза).

При увеличении линейной скорости вращения фрезы мощность резания практически не изменяется, т.к. величины снижения силы резания и увеличения скорости резания сопоставимы и их влияние на изменение мощности резания не существенно.

При периферийном фрезеровании за счет направления движения подачи вдоль оси вращения фрезы D_s снижается радиальное отжатие фрезы по сравнению с торцевым фрезерованием, когда движение подачи D_s направлено перпендикулярно оси главного вращательного движения D_r .

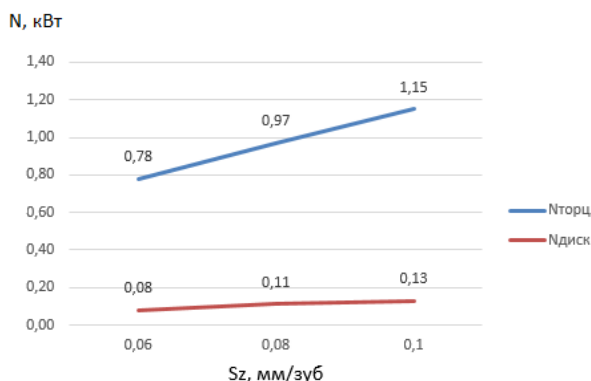


Рисунок 10. – Зависимости мощности торцевого и периферийного фрезерования от подачи на зуб

Шероховатость поверхности оценивалась следующими параметрами: Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; Rz – высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм; R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля, мкм; Sm – средний шаг неровностей, мкм. Результаты измерения параметров шероховатости Ra , Rz , R_{max} , Sm при торцевом фрезеровании представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Результаты измерения параметров шероховатости при торцевом фрезеровании

Серия опытов с изменением глубины резания t , мм		
Опыт №1 $t = 0,5$ мм	Опыт № 2 $t = 1$ мм	Опыт № 3 $t = 1,5$ мм
$Ra = 1,729$ мкм, $Rz = 6,697$ мкм, $R_{max} = 7,573$ мкм, $Sm = 82,71$ мкм	$Ra = 1,313$ мкм, $Rz = 5,154$ мкм, $R_{max} = 5,909$ мкм, $Sm = 86,83$ мкм	$Ra = 1,368$ мкм, $Rz = 5,595$ мкм, $R_{max} = 6,320$ мкм, $Sm = 84,80$ мкм
Серия опытов с изменением подачи S , мм/зуб		
Опыт № 4 $S = 0,06$ мм/зуб	Опыт № 5 $S = 0,08$ мм/зуб	Опыт № 6 $S = 0,1$ мм/зуб
$Ra = 1,504$ мкм, $Rz = 7,023$ мкм, $R_{max} = 8,113$ мкм, $Sm = 80,78$ мкм	$Ra = 4,181$ мкм, $Rz = 12,808$ мкм, $R_{max} = 15,973$ мкм, $Sm = 130,58$ мкм	$Ra = 4,359$ мкм, $Rz = 20,051$ мкм, $R_{max} = 16,600$ мкм, $Sm = 288,43$ мкм
Серия опытов с изменением скорости резания v , м/мин		
Опыт № 7 $v = 230$ м/мин	Опыт № 8 $v = 285$ м/мин	Опыт № 9 $v = 305$ м/мин
$Ra = 1,808$ мкм, $Rz = 8,304$ мкм, $R_{max} = 11,313$ мкм, $Sm = 82,64$ мкм	$Ra = 1,655$ мкм, $Rz = 8,170$ мкм, $R_{max} = 10,684$ мкм, $Sm = 56,55$ мкм	$Ra = 1,447$ мкм, $Rz = 7,416$ мкм, $R_{max} = 8,415$ мкм, $Sm = 47,85$ мкм

Значения параметра Ra шероховатости поверхности соответствует чистовой обработке. Некоторый рост характеристик шероховатости при торцевом фрезеровании в опытах 5 и 6 (см. таблицу 5) связан с увеличением глубины резания, подачи и износа режущей пластины.

Результаты измерения параметров шероховатости Ra , Rz , R_{max} , Sm при периферийном фрезеровании представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Результаты измерения параметров шероховатости при периферийном фрезеровании

Серия опытов с изменением подачи S , мм/зуб		
Опыт № 1 $S = 0,06$ мм/зуб	Опыт № 2 $S = 0,08$ мм/зуб	Опыт № 3 $S = 0,1$ мм/зуб
$Ra = 2,551$ мкм, $Rz = 10,154$ мкм, $R_{max} = 11,999$ мкм, $Sm = 124,19$ мкм	$Ra = 3,969$ мкм, $Rz = 23,417$ мкм, $R_{max} = 14,993$ мкм, $Sm = 215,54$ мкм	$Ra = 4,840$ мкм, $Rz = 28,556$ мкм, $R_{max} = 18,719$ мкм, $Sm = 159,49$ мкм
Серия опытов с изменением скорости резания v , м/мин		
Опыт № 4 $v = 230$ м/мин	Опыт № 5 $v = 285$ м/мин	Опыт № 6 $v = 305$ м/мин
$Ra = 2,738$ мкм, $Rz = 10,773$ мкм, $R_{max} = 12,654$ мкм, $Sm = 157,38$ мкм	$Ra = 1,455$ мкм, $Rz = 7,838$ мкм, $R_{max} = 8,929$ мкм, $Sm = 53,09$ мкм	$Ra = 1,572$ мкм, $Rz = 7,528$ мкм, $R_{max} = 9,939$ мкм, $Sm = 48,25$ мкм

Некоторое увеличение параметра Ra шероховатости обработанной поверхности при периферийном фрезеровании по сравнению с торцевым объясняется биением режущих кромок фрез: при периферийном фрезеровании – 0,2–0,4 мм, при торцевом фрезеровании – 0,1–0,2 мм.

Анализируя результаты данных таблиц 5 и 6, можно сделать вывод, что высота неровностей зависит в большей степени от величины подачи. При увеличении подачи до значений $S_z = 0,1$ мм/зуб параметры шероховатости возрастают до 2 раз. Влияние глубины резания на шероховатость поверхности незначительно. Увеличение скорости резания приводит к уменьшению высоты микронеровностей.

Заключение. Для повышения производительности обработки поверхностей деталей предложены конструкции универсальных торцово-дисковых фрез, включающие взаимозаменяемые блоки резцовые и зажимные модули, устанавливаемые со стороны периферийной и торцевой поверхностей корпуса и позволяющие производить как торцевое, так и дисковое фрезерование поверхностей деталей при переустановке блоков резцовых и зажимных модулей.

По результатам расчетов и экспериментов установлены зависимости мощности и силы резания, коэффициентов усадки стружки и шероховатости обработанной поверхности от режимов торцевого и дискового фрезерования, что обеспечивает выбор оптимального вида обработки для соблюдения требуемых значений физических и технологических характеристик процесса резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маклоренс Э. Многоцелевые станки // Мировая металлообработка. – 2006. – № 2. – С. 12–13.
2. Черпаков Б.И. Тенденции развития мирового станкостроения в начале XXI века / СТИН. – 2003. – № 9. – С. 3–7.
3. Черпаков Б.И. Тенденции развития мирового станкостроения в начале XXI века / СТИН. – 2003. – № 10. – С. 3–7.
4. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 316 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 2. – 944 с.

REFERENCES

1. Maklorens, E. (2006). *Mnogotsel'evye stanki. Mirovaya metalloobrabotka*, (2), 12–13. (In Russ.).
2. Cherpakov, B.I. (2003). *Tendentsii razvitiya mirovogo stankostroeniya v nachale XXI veka. STIN*, (9), (3–7). (In Russ.).
3. Cherpakov, B.I. (2003). *Tendentsii razvitiya mirovogo stankostroeniya v nachale XXI veka. STIN*, (10), (3–7). (In Russ.).
4. Rusetskii, A.M. (2014). *Konstruirovaniye i osnashcheniye tekhnologicheskikh kompleksov*. Minsk: Belpruskaya navuka. (In Russ.).
5. Dal'skii, A.M., Kosilova, A.G., Meshcheryakov, R.K. & Suslov, A.G. (Eds.). (2001). *Spravochnik tekhnologa mashinostroytelya*. V 2 t. T. 2. Moscow: Mashinostroyeniye. (In Russ.).

Поступила 12.03.2024

UNIVERSALIZATION OF ROTATING CUTTING TOOLS BASED ON UNIFIED CONSTRUCTION MODULES

N. POPOK, R. KHMELNITSKY, V. ANISIMOV, D. BASHLACHEV
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The purpose of the work is to increase the productivity of surface treatment of parts by universalizing cutters. To achieve the goal, the problems of developing designs of end and disk cutters with interchangeable cutting blocks and clamping modules and studying their performance are solved. Analytical and experimental research methods are used, which made it possible to establish the geometric parameters of the cut layer during end and peripheral milling, the dependence of the chip shrinkage coefficients, cutting power and roughness of the machined surface when changing the feed, depth and cutting speed. The research results can be used in machining flat and curved surfaces of parts on CNC machines.

Keywords: universal milling cutter, milling, cutting power and force, chip shrinkage coefficient, surface roughness.