

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ ПРИ СЪЕМЕ ТОНКИХ СЛОЕВ СТРОГАНИЕМ И ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

А.Ю. Шевченко¹

А.Ю. Попов²

И.Н. Дроздов¹

Д.А. Блохин²

А.Г. Кисель²

Е.В. Некрылов³

alexshf9@rambler.ru

popov_a_u@list.ru

ceh2@progress-omsk.ru

blohin.da@mail.ru

kisel1988@mail.ru

evgenekrylov@gmail.com

¹ АО «ФНПЦ «Прогресс», г. Омск, Российская Федерация

² ОмГТУ, г. Омск, Российская Федерация

³ АО «Высокие Технологии», г. Омск, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена проблема обработки элементов конструкций со съемом слоев металла толщиной менее 0,01 мм твердосплавным инструментом, когда условный радиус округления лезвия меньше или равен толщине срезаемого слоя. Эти условия резания можно считать стесненными, что требует исследований силы резания и формы стружки. Решена проблема регистрации и измерения малых сил резания, возникающих при лезвийной обработке малых канавок, служащих для отвода газов при производстве резинотехнических изделий. Для измерения сил применен рычаг, закрепленный в универсальном динамометре, который имеет поддерживающую опору с малым трением. Значения момента сил, измеренные с помощью динамометра, могут быть применены для оптимизации режимов резания, выбора геометрии инструмента при обработке мелких элементов рельефа. Проведены исследования зависимости сил резания и смещений рычажной системы от применения смазочно-охлаждающих жидкостей, величин передних углов при строгании и фрезеровании мелкоразмерным инструментом. При резании с малыми величинами подачи и применением смазочно-охлаждающих жидкостей для твердосплавных инструментов экспериментально определены расхождения между результатами теоретических расчетов сил резания по классическим и современным справочным данным и фиксируемыми данными

Ключевые слова

Силы резания, универсальный динамометр, строгание, фрезерование, малые сечения стружки, смазочно-охлаждающая жидкость

Поступила 06.04.2021

Принята 28.04.2021

© Автор(ы), 2021

Введение. Исследования микрогеометрии лезвия режущего инструмента с положительными передними и задними углами из однокарбидных твердых сплавов показывают, что при традиционной технологии заточки алмазным кругом (на окружных скоростях 20...35 м/с) на лезвии образуется сплошная зона сколов, которая выглядит, как неаккуратная фаска размером ~ 0,01 мм [1] (рис. 1).

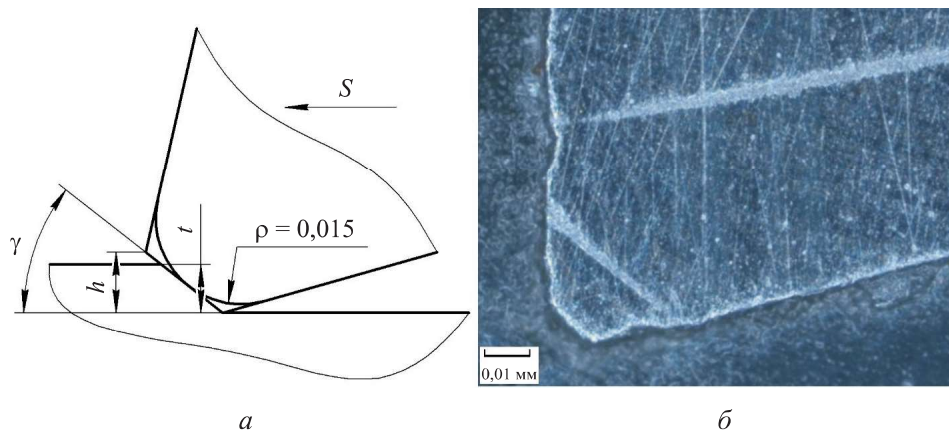


Рис. 1. Схема срезания тонких слоев при строгании (а); форма лезвия инструмента (б):

h — размер фаски; t — глубина резания; S — направление перемещения инструмента; γ — передний угол; ρ — условный радиус округления

Под параметром остроты лезвия (или остротой лезвия) твердосплавного инструмента авторы понимают условный радиус округления (ρ) лезвия инструмента с учетом сколов [2].

Многочисленные исследования показывают, что такая форма лезвия характерна для твердосплавного инструмента в результате традиционной заточки, применяемой в заводской практике, а размеры зоны сколов составляют 0,01...0,02 мм в зависимости от зернистости круга [3]. К сожалению, обеспечить более острое лезвие технологически сложно и дорого. Если значение глубины резания t будет меньше размера фаски h , то фаска становится передней поверхностью с большим отрицательным значением переднего угла. При таких условиях работы нормальное стружкообразование невозможно. Это те условия, в которых работают мелкогабаритные фрезы, резьбообразующие и канавочные инструменты. Радикально нормализовать условия резания можно только повысив остроту лезвия.

Применение мелкогабаритного инструмента необходимо для обработки газоотводящих канавок пресс-форм для резинотехнических изделий. Газоотводящие канавки обеспечивают отвод образующихся газов

в процессе вулканизации и, как следствие, получается качественное изделие [4]. В зависимости от конструкции изделий наиболее распространены две формы газоотводящих канавок [5] — треугольная и сферическая.

Обработку газоотводящих канавок сферической формы целесообразно выполнять мелкоразмерными сферическими фрезами, а треугольной формы — гравированием и строганием. Стругание является более производительным способом, но вызывает ряд проблем при обработке фасонных поверхностей. Эта проблема и моделировалась для измерения реальных сил резания и определения факторов, оказывающих наибольшее влияние на силы и наростообразование в процессе обработки. Особенностью обработки мелкоразмерных канавок является случайный характер поломок фрез и выкрашивание вершины лезвия строгальных резцов. Фрезы и резцы невозможно оперативно заметить из-за малых размеров и применения СОЖ.

Измерение сил при лезвийной обработке — это задача в основном решенная для сил более 100 Н. Наиболее известна серия приборов универсальных динамометров (УДМ) производства ВНИИинструмент [6–9]. Практически во всех технических вузах страны эти приборы использовались для учебных и научных целей. Они оснащались усилителями и регистрационной аппаратурой. С течением времени эти комплексы массово выходят из строя, а замены на современные зарубежные приборы не происходит в связи с их высокой стоимостью. Определенный прогресс достигнут по регистрационной аппаратуре. Разработанные в МГТУ им. Н.Э. Баумана блок усиления и связи прибора УДМ с компьютером и программное обеспечение позволяют использовать оставшиеся приборы УДМ [10, 11]. В лаборатории резания ОмГТУ собрали и проверили эту разработку. Удалось снять и зафиксировать адекватную, повторяемую и подтвержденную на старом комплекте приборов информацию по силам и вибрациям при резании.

Другая проблема — это измерение сил резания от 0,1 до 100 Н. Попытка усиления сигнала от серийного УДМ для повышения чувствительности прибора за пределами рекомендуемых величин приводит к нарастанию шума и получению результата, который не определяется, а трактуются.

Регистрация столь малых сил резания требуется для исследования процесса обработки мелкоразмерным инструментом. В последние десятилетия появился и начал массово использоваться твердосплавный инструмент, а именно фрезы и сверла диаметром от 0,1 мм. Подача на зуб этих инструментов находится в пределах 0,003...0,03 мм. Это меньше, чем условный радиус округления лезвия твердосплавного инструмента. Частично эта проблема решена при проектировании протяжек. Но условия резания

быстрорежущего и твердосплавного инструментов существенно отличаются. Задача определения оптимальной остроты и качества лезвия мелкогабаритного инструмента и влияние их на режимы резания и точность обработки становится весьма актуальной. Проблема образования наростов, колебаний и реальная прочность инструмента в процессе работы — это задачи, которые можно решить только измерением сил [12, 13]. Принципиальной проблемой, которая не позволяет воспользоваться зависимостями из многочисленных каталогов и справочников для более крупногабаритного инструмента, — это соотношение параметра остроты лезвия, глубины и подачи. По зависимостям, установленным для протяжек, уменьшение подачи на зуб до сотых долей миллиметра приводит к кратному увеличению удельных сил резания. Для введения поправочных коэффициентов необходимо знать точные параметры условного радиуса округления лезвия, который меняется в процессе работы инструмента. Поэтому исследование сил резания при работе мелкогабаритного инструмента в пограничных условиях — это ключ к решению задачи повышения эффективности процесса обработки мелкогабаритным инструментом [14].

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Исследования проводились на станке КФП-250 с системой ЧПУ «Маяк-611». Принципиально, решение заключается в использовании рычага l в качестве усилителя момента (рис. 2) из стали марки 45 с твердостью 180...220 НВ. Для гашения возникающих в процессе резания возможных упругих колебаний рычага, закрепленного в динамометре, на рычаге за нижней опорой за-

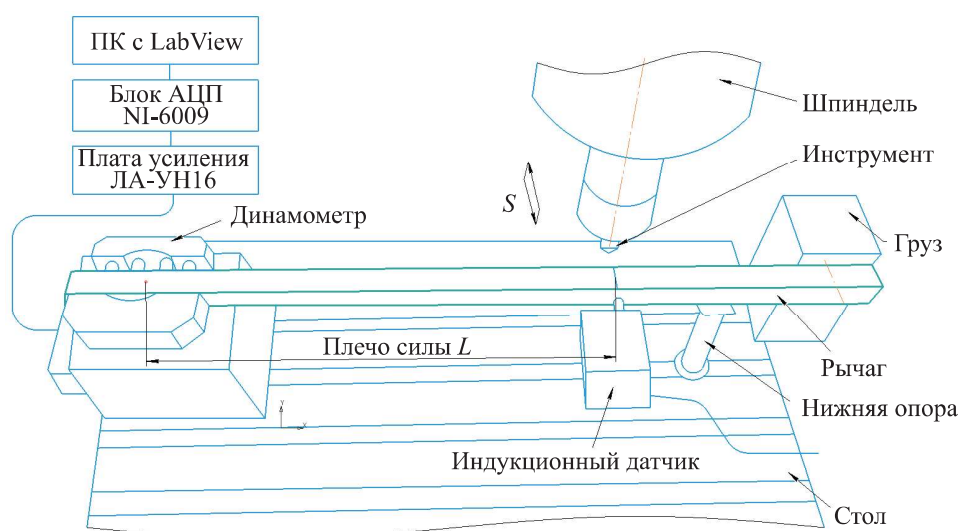


Рис. 2. Схема измерения сил в процессе строгания с помощью рычага

крепился груз. Это позволило снизить амплитуды колебаний при недостаточной динамической жесткости измерительного рычага, что обеспечивает достаточно полное соответствие модели реальным условиям.

Прибор УДМ-600 (специальный) предназначен для измерения сил резания при фрезеровании и сверлении. Он имеет канал для измерения момента. В регистрационной аппаратуре для решения требуемой задачи достаточно использовать и тарировать только один канал, измеряющий крутящий момент прибором УДМ-600, тарирование происходит с применением пересчета силы в момент через плечо по формуле

$$M = FL, \quad (1)$$

где M — крутящий момент; F — измеряемая горизонтальная составляющая силы; L — плечо силы.

Подбор плеча позволяет подобрать величину момента, который четко фиксируется динамометром, в то время как равная по модулю сила не определяется тем же динамометром. Значения силы в любой момент могут быть пересчитаны при известном значении плеча силы, в том числе в программной среде LabView. Плечо в процессе обработки одной канавки не изменяется. Этот прием позволяет измерять только одну составляющую силы при фрезеровании или строгании, направленную вдоль траектории подачи. Возможны другие варианты рычажной системы и кинематики обработки.

Нижняя опора необходима для предотвращения смещения рычага в вертикальной плоскости, что приведет к изменению глубины резания. Между рычагом и нижней опорой устанавливалась пластинка из полимерного материала, имеющего коэффициент трения менее 0,03. Сила противодействия смещению рычага в горизонтальной плоскости тарировалась динамометром при приложении различных сил. Строился график тарировки, позволяющий вносить поправку в измерение момента от действия силы. При измерении сил менее 1 Н можно поставить блок с подшипником качения и свести практически к нулю силу противодействия в опоре.

Схемы строгания и фрезерования мелкоразмерных канавок, формирование профиля канавки за несколько проходов, а также направление измеряемых сил F , которое совпадает с направлением рабочей подачи S , приведены на рис. 3.

Канавки треугольной формы имеют глубину 0,3...0,6 мм и ширину 0,3...0,8 мм, а канавки сферической формы — радиус 0,5...0,8 мм и глубину 0,5...1,5 мм. Режимы резания приведены в таблице.

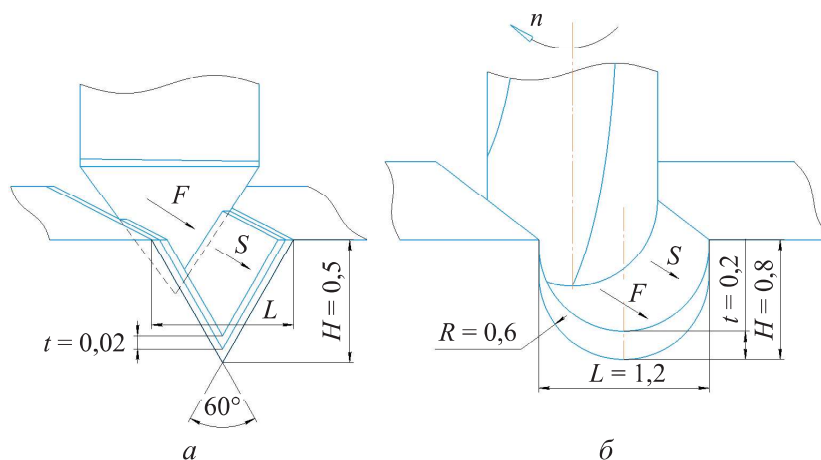


Рис. 3. Схемы обработки мелкоразмерных канавок:
 а — операция строгания; б — операция фрезерования

**Диапазоны режимов резания, применяемые
 при обработке мелкоразмерных канавок**

Строгание			Фрезерование		
Глубина резания t , мм	Скорость рабочей подачи, мм/мин	Угол при вершине, град	Частота вращения, об./мин	Глубина резания, мм	Скорость подачи, мм/зуб
0,005–0,05	500–1200	21–90	1500–3200	0,1–0,3	0,005–0,015

Результаты. При визуальном наблюдении в процессе строгания очевидно периодическое изменение отклонений рычага. Возникновение прерывистого движения резца приводит к скачкообразному изменению сил резания, что фиксируется динамометром и датчиком перемещений. Внутренние напряжения в деформируемом объеме металла периодически увеличиваются и достигают значений, при которых очередной сформировавшийся элемент стружки сдвигается и сила резко уменьшается, после чего формирование очередных элементов стружки циклически повторяется. Возникает это явление при достижении глубины канавки более 0,2 мм. Для фиксации этого явления проведена серия экспериментов по обработке канавок резцами без СОЖ и с применением минерального масла И-20а. Сравнительные графики сил и отклонений приведены на рис. 4. Причиной прерывистого движения считается периодическое загромождение канавки стружкой, сходящей с двух сторон профиля резца и, возможно, возникновение нароста. Процесс имеет сходство с работой метчика в отверстии. При фрезеровании канавки движение фрезы плавное.

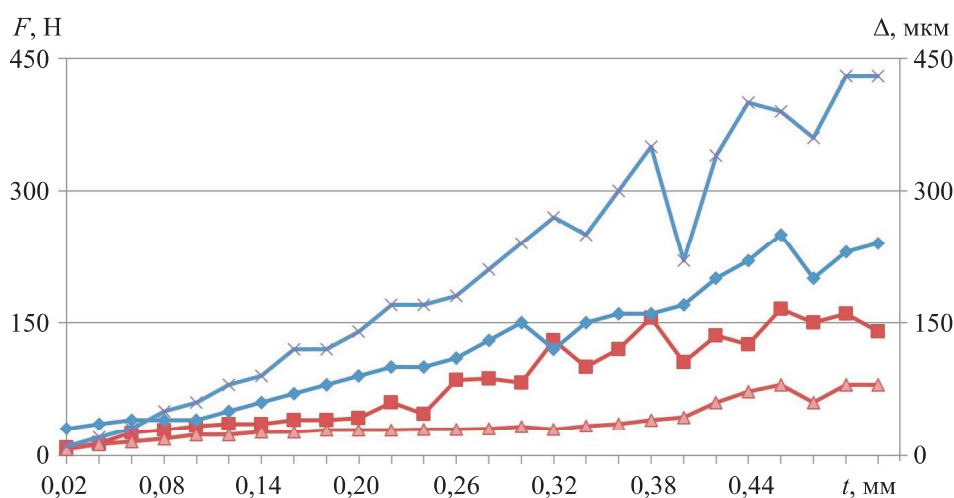


Рис. 4. График зависимости силы резания (синие кривые) и отклонения (красные) от глубины простроганной канавки с применением (▲, ♦) СОЖ и без (■, ×)

Очевидно, что применение СОЖ стабилизирует процесс резания и приводит к уменьшению сил резания. Это был ожидаемый результат, но эффект от применения СОЖ в $\sim 2,13$ раза больше, чем при работе крупноразмерного инструмента.

Аналогичные результаты получены ранее при токарной обработке стали марки 45 резцом с твердосплавной пластиной при следующих режимах: скорость резания 57 м/мин, подача 0,1 мм/об., глубина резания 1 мм для пластины ромбической формы с углом при вершине в плане 80° и радиусом при вершине 0,4 мм [15]. Применение при данных режимах СОЖ марки Addinol WN430 привело к снижению в 1,89 раза равнодействующей силы резания. Однако данный эффект наблюдается только при определенных режимах обработки и тщательно подобранной СОЖ.

Точность результатов проверялась расчетом (при расчете протяжек), по каталогам производителей мелкоразмерного инструмента, а также по классическим формулам. Измеренные значения силы резания отличались от расчетных значений примерно на $\pm 3\%$ для расчетов сил по площади сечения среза и расчетов по протягиванию.

В результате проведенных экспериментов установлено, что значение силы резания с применением минерального масла в качестве СОЖ уменьшается в среднем в 2 раза по сравнению с обработкой без СОЖ в отличие от коэффициентов, указанных в справочной литературе (уменьшаются в 1,25–1,35 раза). Заметно снижается частота загромождения канавки

стружкой на передней поверхности, что приводит к увеличению сил резания. Кроме того, применение СОЖ сглаживает пиковые значения сил, вызванных загромождением канавки стружкой либо образованием нароста на передней поверхности.

Эксперименты проводились для резцов с передними углами -15° , 0° , 15° , поскольку в таких пределах происходит изменение при прохождении резцом вогнутых поверхностей (рис. 5). Задние углы при строгании могут изменяться в пределах $2 \dots 32^\circ$.

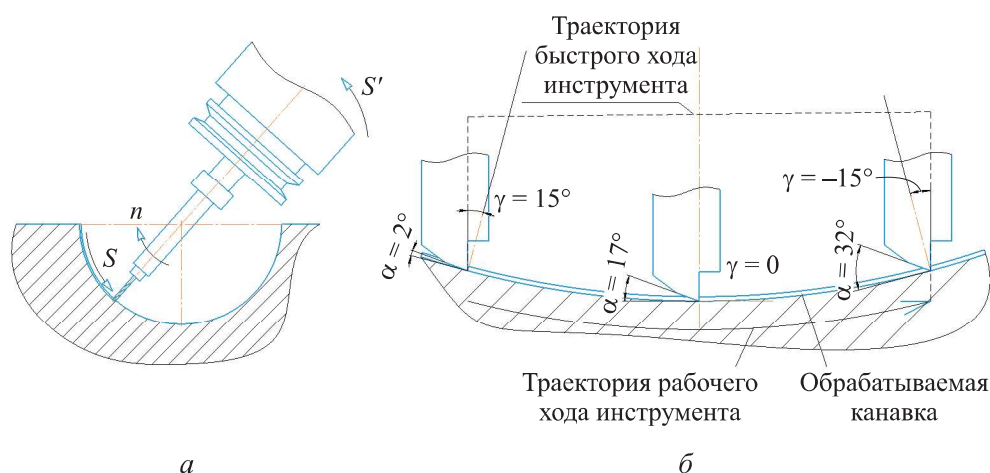


Рис. 5. Вид сбоку на фрезерование мелкоразмерного паза с удлинительной оправкой (а); контурное строгание резцом с различными значениями действительного переднего угла (б)

Графики зависимости силы резания и отклонений рычага вдоль линии резания от глубины простроганной канавки при равномерном вертикальном заглублении приведены на рис. 6.

Обсуждение полученных результатов. При анализе полученных данных выявлено, что с увеличением переднего угла силы и отклонения рычага уменьшаются на $30 \dots 60\%$ на разных глубинах канавки.

Согласно экспериментальным данным, в диапазоне передних углов от $-15 \dots 15^\circ$ применение «разбежки» (известного приема при работе резбовыми резцами) не дает статистически значимого уменьшения сил резания, но существенно снижает частоту загромождения канавки стружкой, а также значения возникающих вместе с этим переменных сил резания.

Для экспериментального измерения сил при фрезеровании канавки шириной $1,2$ мм выбрана твердосплавная двузубая фреза диаметром $1,2$ мм с передним и задним углами соответственно 5 и 7° . Значения сил

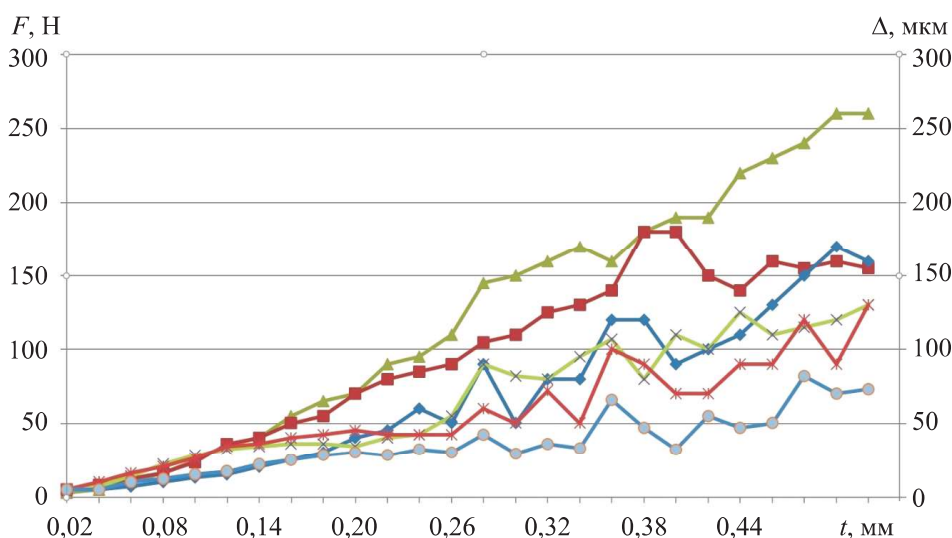


Рис. 6. График зависимости силы резания F (x, *, —) и отклонений Δ (—, —, —) от глубины протроганной канавки при различных значениях переднего угла -15° (зеленые кривые), 0 (красные), 15° (синие)

при обработке фрезой сферической канавки шириной 1,2 мм на различных режимах приведены на плоскостной диаграмме (рис. 7).

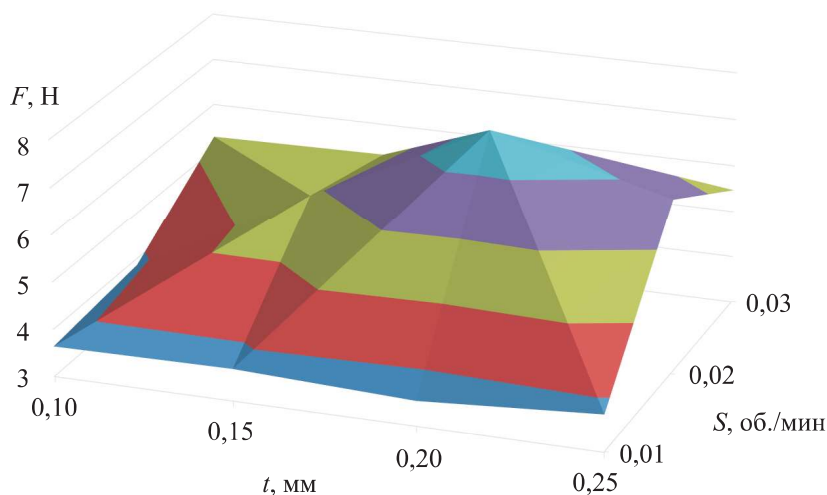


Рис. 7. График зависимости сил резания от глубины резания

Применяемый диапазон глубин резания от 0,1 до 0,3 мм, значения подачи от 0,005 до 0,015 мм/зуб. Деформации рычажной системы при фрезеровании имеют слабовыраженную зависимость от режимов резания.

Заключение (выводы и рекомендации). Приведенная методика измерения малых сил резания, возникающих при лезвийной обработке ма-

лых канавок, с помощью УДМ и рычажной системы показала работоспособность и позволила получить адекватные, повторяемые результаты.

При микрорезании влияние СОЖ на силы резания существенно выше (до 50 %), чем в традиционных условиях.

При строгании канавок:

– применение разбежки при значениях подач до 0,03 мм не дает существенного результата по уменьшению сил резания, но заметно снижает частоту загромождения канавки;

– изменение значения переднего угла приводит к изменению сил и отклонений аналогично зависимостям, работающим при больших глубинах.

При фрезеровании канавок изменение режимов, характерных для твердосплавных фрез диаметром 1...2 мм, приводит к нелинейному изменению значения силы резания и существенно отличается от закономерности для крупноразмерных фрез.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Реченко Д.С., Попов А.Ю., Бабаев А.С. и др. Сверхскоростное затачивание твердосплавного инструмента. *СТИН*, 2018, № 4, с. 12–15.
- [2] Балова Д.Г., Реченко Д.С., Бабаев А.С. Сверхскоростное затачивание мелкоразмерного концевое твердосплавного инструмента. *Вестник МГТУ «СТАНКИН»*, 2020, № 4, с. 109–113. DOI: https://doi.org/10.47617/2072-3172_2020_4_109
- [3] Реченко Д.С., Балова Д.Г., Попов А.Ю. Исследование адгезионных свойств поверхностей твердосплавной пластины, обработанных сверхскоростным шлифованием. *Вестник МГТУ «СТАНКИН»*, 2020, № 4, с. 114–117. DOI: https://doi.org/10.47617/2072-3172_2020_4_114
- [4] Дроздов И.Н., Попов А.Ю. Повышение эффективности фрезерования мелкоразмерных канавок фасонной формы в труднодоступных местах пресс-форм для резинотехнических изделий. *Омский научный вестник*, 2020, № 2, с. 15–18. DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2020-170-15-18>
- [5] Шевченко А.Ю., Попов А.Ю. Методы обработки газоотводящих канавок угловой формы в матрицах для резинотехнических изделий (РТИ). *Омский научный вестник*, 2020, № 2, с. 19–22. DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2020-170-19-22>
- [6] Руководство к универсальному динамометру УДМ-600 конструкции ВНИИ. М., ВНИИ, 1983.
- [7] Безъязычный В.Ф., Кордюков А.В., Тимофеев М.В. и др. Разработка динамометрической системы для измерения силы резания при точении. *Известия МГТУ МАМИ*, 2014, т. 2, № 1, с. 171–176.

- [8] Павлов И.О., Ушаков М.В., Воробьев И.А. Система для измерения сил резания. Компонировка, тарирование и оценка погрешности. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2013, № 10, с. 159–168.
- [9] Попов Н.А. Обзор методов теоретического определения силы резания зарубежных научных школ. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 1.
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-1-432>
- [10] Шуляк Я.И., Васильев С.Г. Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ-600. *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*, 2016, № 1. DOI: 107463/aplts.0116.0831168
- [11] Самойлов В.Б. Модернизация системы для измерения сил резания на базе динамометров серии УДМ. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 5, с. 91–103. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2019-5-91-103>
- [12] Шатуров Д.Г., Шатуров Г.Ф., Панков М.В. Состояние и пути повышения износостойкости лезвийного инструмента в широком диапазоне изменения скорости резания. *Вестник Белорусско-Российского университета*, 2017, № 1, с. 100–109.
- [13] Yuan Y., Jing X., Ehmann K.F., et al. Modeling of cutting forces in micro end-milling. *J. Manuf. Process.*, 2018, vol. 31, pp. 844–858.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.01.012>
- [14] Jin X., Altintas Y. Prediction of micro-milling forces with finite element method. *J. Mater. Process. Technol.*, 2012, vol. 212, no. 3, pp. 542–552.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.05.020>
- [15] Кисель А.Г., Титов Ю.В., Тодер Г.Б. и др. Метод прогнозирования снижения силы резания при токарной обработке заготовок из конструкционных сплавов с применением СОЖ. *Вестник машиностроения*, 2020, № 10, с. 50–54.
DOI: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-10-50-54>

Шевченко Александр Юрьевич — заведующий лабораторией № 252 отдела № 2 АО «ФНПЦ «Прогресс» (Российская Федерация, 644018, г. Омск, 5-я Кордная ул., д. 4).

Попов Андрей Юрьевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ОмГТУ (Российская Федерация, 644050, г. Омск, пр-т Мира, д. 11).

Дроздов Игорь Николаевич — начальник механосборочного цеха АО «ФНПЦ «Прогресс» (Российская Федерация, 644018, г. Омск, 5-я Кордная ул., д. 4).

Блохин Дмитрий Андреевич — ассистент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ОмГТУ (Российская Федерация, 644050, г. Омск, пр-т Мира, д. 11).

Кисель Антон Геннадьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ОмГТУ (Российская Федерация, 644050, г. Омск, пр-т Мира, д. 11).

Некрылов Евгений Владимирович — ведущий инженер-электроник АО «Высокие Технологии» (Российская Федерация, 644007, г. Омск, ул. Герцена, д. 48).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шевченко А.Ю., Попов А.Ю., Дроздов И.Н. и др. Исследование сил при съеме тонких слоев строганием и фрезерованием. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 4 (139), с. 66–79.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-4-66-79>

**INVESTIGATION OF CUTTING FORCES
FOR THIN LAYERS WHEN PLANING AND MILLING**

A.Yu. Shevchenko¹

A.Yu. Popov²

I.N. Drozdov¹

D.A. Blokhin²

A.G. Kisel²

E.V. Nekrylov³

alexshf9@rambler.ru

popov_a_u@list.ru

ceh2@progress-omsk.ru

blohin.da@mail.ru

kisel1988@mail.ru

evgenekrylov@gmail.com

¹ JSC “FSPC “Progress”, Omsk, Russian Federation

² OmSTU, Omsk, Russian Federation

³ JSC “High Technologies”, Omsk, Russian Federation

Abstract

The problem of machining structural elements with removal of metal layers with thickness less than 0.01 mm by carbide tools, when the conditional radius of the blade rounding is less than or equal to the thickness of the cut layer, is considered. These cutting conditions can be considered constricted which requires research into cutting forces and chip shape. The problem of recording and measuring small cutting forces arising during blade machining of small grooves that serve for gas drainage in the manufacture of rubber products is solved. To measure forces, a lever fixed in a universal dynamometer, which has a supporting support with small friction, is used. Value of force moment measured with dynamometer can be used for optimization of cutting conditions, selection of tool geometry when processing small relief elements. Dependences of lever system cutting forces and displacements on the use of lubricant-cooling liquids, values of front angles during planing and milling with small-size tools are investigated. Experimental discrepancies between theoretical calculations of cutting forces according to classical and modern reference data and fixed results with the use of cutting liquids during cutting with small values of feed for carbide tools are found

Keywords

Cutting forces, universal dynamometer, planing, milling, small chip sections, lubricating coolant

Received 06.04.2021

Accepted 28.04.2021

© Author(s), 2021

REFERENCES

- [1] Rechenko D.S., Popov A.Yu., Babaev A.S., et al. Ultra-fast sharpening of carbide tools. *STIN*, 2018, no. 4, pp. 12–15 (in Russ.).
- [2] Balova D.G., Rechenko D.S., Babaev A.S. Ultra-fast sharpening of small-size carbide end tools. *Vestnik MGTU “STANKIN”* [Vestnik MSTU “STANKIN”], 2020, no. 4, pp. 109–113 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.47617/2072-3172_2020_4_109
- [3] Rechenko D.S., Balova D.G., Popov A.Yu. Investigation of the adhesion properties of the surfaces of the carbide plate processed by ultra high speed grinding. *Vestnik MGTU “STANKIN”* [Vestnik MSTU “STANKIN”], 2020, no. 4, pp. 114–117 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.47617/2072-3172_2020_4_114
- [4] Drozdov I.N., Popov A.Yu. The increase in efficiency of milling of small-sized grooves of shaped form in hard-to-reach places of molds for rubber-technical products. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2020, no. 2, pp. 15–18 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2020-170-15-18>
- [5] Shevchenko A.Yu., Popov A.Yu. Methods of processing of gas venting grooves of angular shape in matrices for rubber technical products. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2020, no. 2, pp. 19–22 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2020-170-19-22>
- [6] Rukovodstvo k universal'nomu dinamometru UDM-600 konstruksii VNII [User guide for UDM-600 universal dynamometer of VNII design]. Moscow, VNII Publ., 1983.
- [7] Bez'yazychnyy V.F., Kordyukov A.V., Timofeev M.V., et al. Development of dynamometer system for measuring cutting forces when turning. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 171–176 (in Russ.).
- [8] Pavlov I.O., Ushakov M.V., Vorob'yev I.A. System for measurement of cutting forces line-up, taring and evaluation of the accuracy. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2013, no. 10, pp. 159–168 (in Russ.).
- [9] Popov N.A. Review of methods for the theoretical determination of cutting power of the strength of foreign scientific school. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical Student Journal], 2019, no. 1 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-1-432>
- [10] Shulyak Ya.I., Vasilyev S.G. A modernized UDM-600 dynamometer-based setup for the cutting force measurement. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie razrabotka i ekspluatatsiya* [Machines and Plants: Design and Exploiting], 2016, no. 1 (in Russ.). DOI: 107463/aplts.0116.0831168
- [11] Samoylov V.B. Modernization of the system for measuring cutting forces on the basis of UDM dynamometer series. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 5, pp. 91–103 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2019-5-91-103>
- [12] Shaturov D.G., Shaturov G.F., Pankov M.V. Current status and ways of increasing wear resistance of edge tools over a wide range of cutting speeds. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2017, no. 1, pp. 100–109 (in Russ.).

[13] Yuan Y., Jing X., Ehmann K.F., et al. Modeling of cutting forces in micro end-milling. *J. Manuf. Process.*, 2018, vol. 31, pp. 844–858.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.01.012>

[14] Jin X., Altintas Y. Prediction of micro-milling forces with finite element method. *J. Mater. Process. Technol.*, 2012, vol. 212, no. 3, pp. 542–552.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.05.020>

[15] Kisel A.G., Titov Yu.V., Toder G.B., et al. A method for predicting a decrease in cutting force during turning of billets from structural alloys using coolant. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020, no. 10, pp. 50–54 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-10-50-54>

Shevchenko A.Yu. — Head of the Laboratory no. 252, Department no. 2, JSC “FSPC “Progress” (5-ya Kordnaya ul. 4, Omsk, 644018 Russian Federation).

Popov A.Yu. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Metal Cutting Machines and Tools, OmSTU (Mira prospekt 11, Omsk, 644050 Russian Federation).

Drozdov I.N. — Head of the Mechanical Assembly Shop, JSC “FSPC “Progress” (5-ya Kordnaya ul. 4, Omsk, 644018 Russian Federation).

Blokhin D.A. — Assoc. Professor, Department of Metal Cutting Machines and Tools, OmSTU (Mira prospekt 11, Omsk, 644050 Russian Federation).

Kisel A.G. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Metal Cutting Machines and Tools, OmSTU (Mira prospekt 11, Omsk, 644050 Russian Federation).

Nekrylov E.V. — Leading Electronic Engineer, JSC “High Technologies” (Gertsena ul. 48, Omsk, 644007 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Shevchenko A.Yu., Popov A.Yu., Drozdov I.N., et al. Investigation of cutting forces for thin layers when planing and milling. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2021, no. 4 (139), pp. 66–79 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-4-66-79>