

ПОВЫШЕНИЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Е.Ю. Горин, А.Ю. Кряжев, Е.Ю. Татаркин, Ю.А. Кряжев

В статье рассмотрен экспериментальный метод определения виброустойчивости колебательной системы – «деталь-инструмент», в котором диагностическим параметром виброустойчивости может быть использован параметр сигнала акустической эмиссии – скорость счета. Представлена специально спроектированная торцовая фреза с демпфирующими элементами, изготовленными из различных материалов. Данная конструкция торцовой фрезы с регулируемой жесткостью повышает виброустойчивость процесса торцового фрезерования за счет снижения вибрационных нагрузок на режущий инструмент.

Ключевые слова: процесс торцового фрезерования, акустический сигнал, шероховатость обработанной поверхности, демпфирующие элементы, виброустойчивость.

Процесс торцового фрезерования является одним из распространенных в машиностроении. Торцовое фрезерование может использоваться не только при обработке плоских, но и, в ряде случаев, фасонных поверхностей и особенно при изготовлении деталей сложной формы, обеспечивая высокую производительность. Важным моментом при обработке деталей сложной формы является наличие тонкостенных консольных элементов с малой жесткостью. В этом случае динамические характеристики технологических систем изменяются незначительно, но это приводит к появлению повышенных вибраций, что сопровождается снижением стойкости режущего инструмента и качества обработанной поверхности [1]. Торцовые фрезы также широко используются для обработки кромок листового проката под последующую сварку, торцов валов на фрезерно-центровальных станках и др. При этом торцовое фрезерование сопровождается нестабильностью срезания металла, которая связана с кинематикой и динамикой этого процесса обработки. В связи с этим, при торцовом фрезеровании возникают как вынужденные колебания, так и автоколебания, связанные с проявлением регенеративного эффекта. Динамика процесса торцового фрезерования усложняется в результате действия случайных факторов, таких как: радиальное и осевое биение шпинделя станка, переменная жесткость технологической системы по длине обработки, случайные колебания физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов и т.д. Все это говорит о том, что необходимо изучение и разработка способов прогнозирования, диаг-

ностирования колебательных процессов при торцовом фрезеровании и повышение виброустойчивости технологической системы.

Степень устойчивости технологической системы определяет её способность рассеивать энергию и может быть оценена по скорости затухания отклонений в переходных процессах [2]. Чем больше степень устойчивости в данной частной составляющей динамической системы, тем быстрее затухает переходный процесс врезания режущих зубьев, тем меньше отклонения в установившемся процессе фрезерования. На сегодняшний день динамические процессы, происходящие в упругих замкнутых технологических системах, остаются недостаточно изученными. Управление этими процессами является одним из резервов повышения производительности и качества обработки.

Выбор динамических характеристик технологической системы и в первую очередь сопротивления системы имеет большое значение для устранения вибраций, а следовательно, для устойчивого процесса резания. Повышение сопротивления системы путем применения специальных средств увеличивает рассеивание энергии и в результате этого снижает интенсивность вибраций [2]. Вибрации технологической системы, возникающие при фрезеровании, оказывают большое влияние на точность обработки и стойкость режущего инструмента. При появлении колебаний режущего инструмента относительно обработанной поверхности его стойкость снижается пропорционально квадрату амплитуды и на заготовке возникают погрешности поперечного сечения, образуется волнистость и увеличивается шероховатость обработанной поверхности. В результате анализа

многочисленных исследований установлено, что при механической обработке не всегда удаётся обеспечить достаточную жёсткость и виброустойчивость обрабатываемой заготовки и режущего инструмента. Наиболее действенным средством борьбы с вибрациями и повышения виброустойчивости технологической системы является регулирование жёсткости (демпфирующей способности) всех элементов динамической системы. Важнейшим звеном этой системы является - «деталь-инструмент». Для решения указанных задач были проведёны статические и динамические исследования специально спроектированной торцевой фрезы с регулируемой жёсткостью.

В исследуемой конструкции торцевой фрезы (см. рисунок 1) используются резиновые вставки (демпфирующие элементы), количество которых может изменяться в зависимости от требуемых условий резания и значений собственной частоты режущего инструмента. Главным преимуществом предлагаемого способа демпфирования является его широкая универсальность и, как следствие, возможность его применения не только для фрез, но и для других видов режущего инструмента. Демпфирующие элементы можно подобрать по материалу и конструкции с учетом динамических характеристик технологической системы, что увеличивает эффективность его использования.

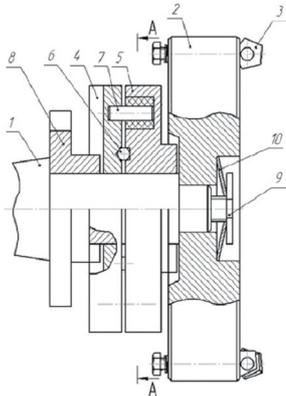


Рисунок 1 – Сборная торцевая фреза с демпфирующими элементами: 1 – оправка; 2 – фреза торцевая; 3 – режущие пластины; 4 – верхнее кольцо узла демпфирования;

5 – нижнее кольцо узла демпфирования; 6 – стальные шарики; 7 – штифт с резиновой вставкой (демпфирующий элемент); 8 – подводок; 9 – винт; 10 – пружинная шайба

Анализ работ [1, 2, и др.], посвященных исследованиям рассеяния энергии при колебаниях динамических систем показал, что для технологической системы механической обработки деталей следует производить расчет диссипативных свойств с учетом сил вязкого сопротивления. В этих условиях обобщенный коэффициент демпфирования в продольном направлении может быть определен согласно следующей зависимости (1):

$$h = \frac{2m}{T_k} \delta, \quad (1)$$

где δ – логарифмический декремент колебаний;

T_k – длительность одного колебательного цикла, с.

Логарифмический декремент колебаний определяется по формуле [2]:

$$\delta = nT_k = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}}, \quad (2)$$

где A – амплитуда колебаний, дБ; n – коэффициент, характеризующий вязкость системы.

Логарифмический декремент колебаний определялся экспериментально по методике, изложенной в работе [2]. Для этого в статическом состоянии по инструменту наносился удар. Одновременно регистрировались свободные колебания фрезы с помощью пьезокерамического датчика, установленного на поверхности инструмента. Коэффициент внутреннего трения определялся по формуле (2).

В результате эксперимента удалось рассчитать декремент колебаний для двух вариантов демпфирующих элементов специальной торцевой фрезы, изготовленных из резины и стали 45. Декремент колебаний у фрезы с резиновыми демпфирующими элементами почти вдвое больше чем (0,762), у фрезы со стальными вставками (0,405). При этом максимальная зафиксированная амплитуда для фрезы с резиновыми вставками в 1.5 раза меньше, чем для фрезы со стальными вставками (см. рисунок 2). Таким образом, данное направление повышения виброустойчивости технологической системы за счёт снижения вибрационных нагрузок на режущий инструмент, может быть использовано при его эксплуатации.

ПОВЫШЕНИЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

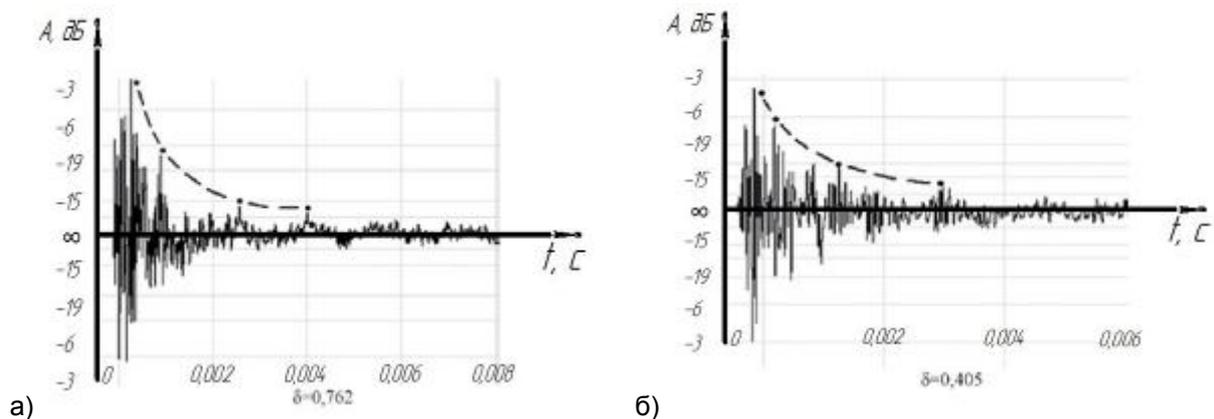


Рисунок 2 – Осциллограммы затухающих колебаний фрезы с резиновыми вставками (а) и стальными вставками (б)

В результате эксперимента удалось рассчитать декремент колебаний для двух вариантов демпфирующих элементов специальной торцовой фрезы, изготовленных из резины и стали 45. Декремент колебаний у фрезы с резиновыми демпфирующими элементами почти вдвое больше чем (0,762), у фрезы со стальными вставками (0,405). При этом максимальная зафиксированная амплитуда для фрезы с резиновыми вставками в 1.5 раза меньше, чем для фрезы со стальными вставками (см. рисунок 2). Таким образом, данное направление повышения виброустойчивости технологической системы за счёт снижения вибрационных нагрузок на режущий инструмент, может быть использовано при его эксплуатации.

Эксперимент при фрезеровании исследуемой конструкции торцовой сборной фрезы с регулируемой жёсткостью проводился на фрезерном станке ГФ-2171 с УЧПУ FMS 3000 при различных режимах фрезерования заготовки из лигированной стали 18Х12НЮТ. Одновременно с процессом резания проводилась запись сигналов акустической эмиссии. Запись осуществлялась с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) L-card L780M с частотой дискретизации до 400 кГц. По окончании эксперимента проводилось измерение шероховатости обработанной поверхности заготовки на профилографе-профилометре «HOMMEL TESTER W55». Анализ сигналов акустической эмиссии позволил установить зависимости параметра шероховатости R_a от средней амплитуды – A_c и скорости счета сигналов акустической эмиссии (САЭ) – \dot{N} (ГОСТ 55045-2012) (см. рисунок 3). Для установления зависимости

параметра шероховатости R_a от параметров режима торцового фрезерования (V , S , t) был проведён плановый эксперимент типа ПФЭ 3^2 . Уровни и интервалы варьируемых факторов были определены по предварительным исследованиям и литературным данным. Анализ результатов опытов позволил получить зависимости вида $R_a = f(V, S, t)$ для торцового фрезерования торцовой фрезой с регулируемой жёсткостью (с резиновыми и стальными вставками), диаметр фрезы -120 мм, число зубьев -8, материал режущей части пластинки твёрдого сплава – Т15К6. Для наглядного представления сложных зависимостей между шероховатостью R_a и параметрами режимов резания V , S , t при торцовом фрезеровании на рисунке 4 представлены графы связей. Числа над рёбрами означают величину коэффициентов парной корреляции. Анализируя полученные графы связей шероховатости R_a и средней амплитуды A_c от параметров режима резания V , S , t можно заметить, что шероховатости R_a наиболее тесно связана с глубиной фрезерования – t и подачей – S , при этом и средняя амплитуда сигнала акустической эмиссии – A_c также наиболее сильно зависит от S и t , то есть подтверждаются результаты работы, выполненные по прогнозированию шероховатости методом акустической эмиссии по параметру амплитуды САЭ. [4].

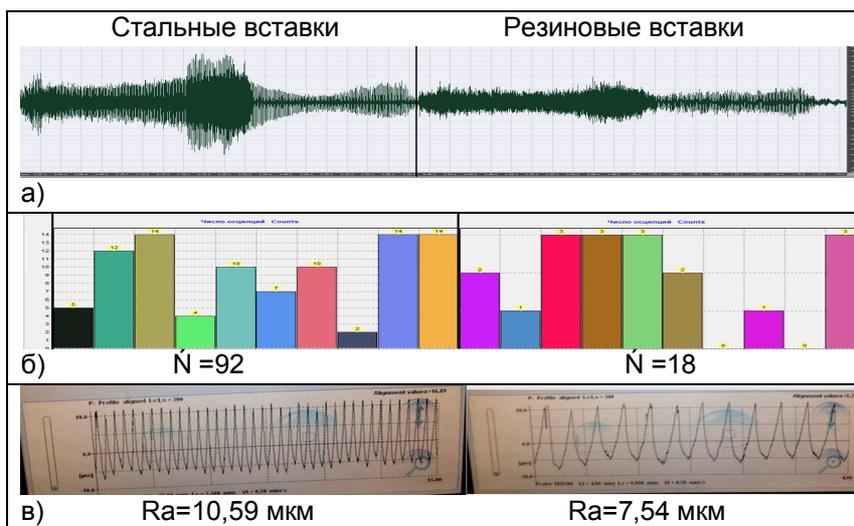


Рисунок 3. – Результаты анализа сигналов акустической эмиссии на режимах резания $t=1\text{мм}$, $S_m=400\text{ мм/мин}$, $n=500\text{ об/мин}$: а) – осциллограммы сигналов акустической эмиссии для образцов со стальными и резиновыми демпфирующими вставками; б) – результаты анализа сигналов акустической эмиссии (\dot{N} – скорости счёта сигналов акустической эмиссии (САЭ) или число осцилляций, превышающих порог ограничения по амплитуде -38 дБ ; A_c – средняя амплитуда сигнала акустической эмиссии (САЭ), дБ); в) – результаты измерения шероховатости на профилографе-профилометре «HOMMEL TESTER W55»

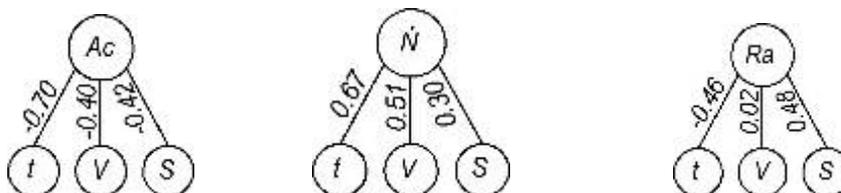


Рисунок 4. – Графы связей шероховатости R_a и средней амплитуды A_c , скорости счёта \dot{N} от параметрами режимов резания V , S , t при торцовом фрезеровании

Анализ записи сигналов амплитудно-частотной характеристики процесса торцового фрезерования исследуемой конструкции фрезы с регулируемой жёсткостью показал, что характер кривой САЭ в момент врезания зуба фрезы с резиновыми и стальными вставками различен (см. рисунок 5 а и б). Для фрезы с резиновыми вставками виброграмма (пунктирная линия спектральных максимумов на рисунке 5, а) возрастает более плавно на участке врезания зуба фрезы, а для фрезы со стальными вставками характер виброграммы на этом же участке отличается – кривая (пунктирная линия спектральных максимумов) достигает своего экстремума за меньшее время САЭ. Таким образом, подтверждается предыдущий эксперимент о том,

что резиновые вставки гасят ударные нагрузки и рост амплитуды в процессе врезания фрезы в заготовку происходит более плавно (см. рисунок 5), а это приводит к более плавному возрастанию максимальных ударных нагрузок на её зубья.

Для амплитудного анализа САЭ использовалась программа «AdobeAudition», а для построения гистограмм скорости счёта – \dot{N} , превышающих порог ограничения по амплитуде за время фрезерования (экспозиции) равное 10 секундам, использовалась программа «Статистика акустического сигнала» [3], при этом выбор порога ограничения по амплитуде -30дБ (уровень дискриминации) производился с учетом опыта предыдущих исследований [3].

ПОВЫШЕНИЕ ВЫБРОУСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

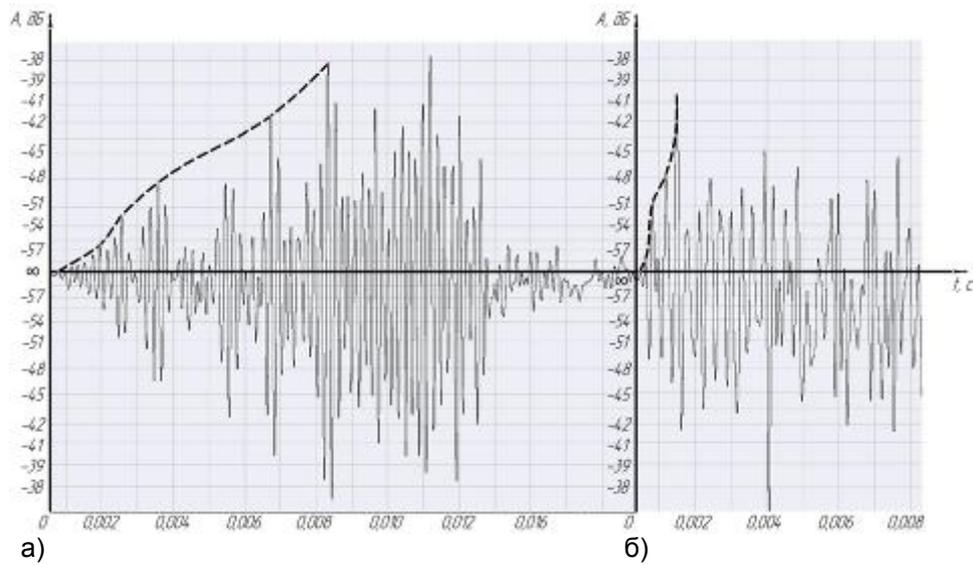


Рисунок 5 – Осциллограммы врезания одним зубом фрезы с резиновыми вставками (а) и стальными вставками (б) для режима фрезерования: $t=1\text{мм}$, $S_m=400\text{ мм/мин}$, $n=1000\text{ об/мин}$

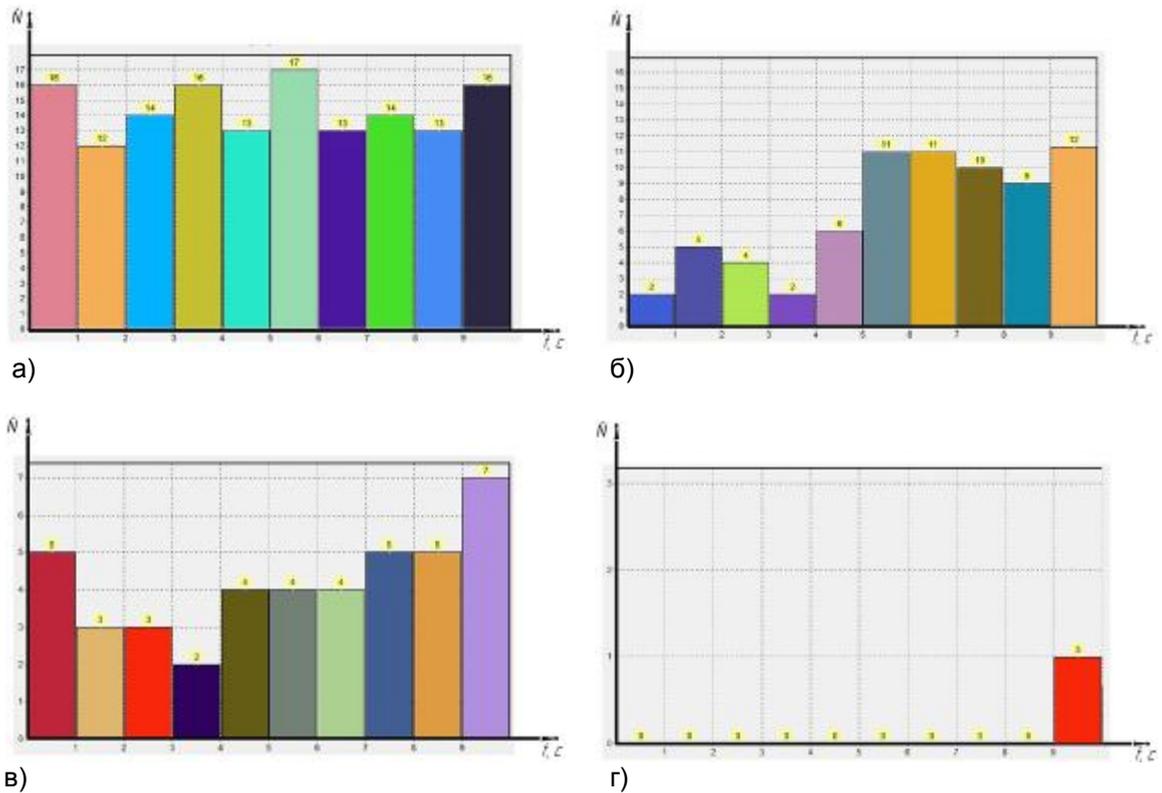


Рисунок 6 – Гистограммы скорости счета сигнала акустической эмиссии – \dot{N} за время экспозиции - 10сек: со стальными вставками (а) и резиновыми вставками (б) на режиме фрезерования - $t=1\text{мм}$, $S_m=400\text{ мм/мин}$, $n=1000\text{ об/мин}$; со стальными вставками (в) и резиновыми вставками (г) на режиме фрезерования - $t=1\text{мм}$, $S_m=1280\text{ мм/мин}$, $n=500\text{ об/мин}$

Как видно из гистограмм анализа САЭ (см. рисунок 6), число превышений по амплитуде порога в -30дБ для фрезерования со стальными вставками – N количественно больше превышений с аналогичным порогом ограничения по амплитуде для фрезерования с резиновыми вставками. Следовательно, фреза с демпфирующими резиновыми вставками эффективнее гасит ударные нагрузки, возникающие в процессе фрезерования, а параметр САЭ – N может являться диагностическим признаком виброустойчивости звена технологической системы - «деталь-инструмент». Из анализа гистограмм, представленных на рисунке 6, можно сделать вывод о том, что при резании нет строгой периодичности сигнала АЭ. Известно, что процесс резания является нелинейной динамической системой [2,5], поэтому при проведении экспериментов с исследуемой конструкцией торцевой фрезы было установлено, что для стальных вставок при увеличении амплитуды колебаний их частота уменьшается, а для резиновых вставок (демпфирующих элементов) с уменьшением амплитуды колебаний их частота также уменьшается. Это свидетельствует о том, что при резании одновременно могут формироваться элементы стружки разного уровня, поддерживаемые несколькими формами колебаний [5]. При работе с высокочастотными формами колебаний материал обрабатываемой детали отделяется малыми порциями с высокой частотой, но малой амплитудой. Время присутствия отклонений от положения равновесия минимальное. При включении в работу низкочастотных форм колебаний происходит отделение больших элементов, но с меньшей частотой и большей амплитудой. Отклонение становится больше и присутствует дольше.

ВЫВОДЫ

1. рассмотренный экспериментальный метод может быть использован для определения виброустойчивости колебательной системы - «деталь-инструмент», в котором диагностическим параметром виброустойчивости может быть использован параметр САЭ – скорость счёта N (имп/с);
2. проведённые испытания показали, что применение разработанной конструкции торцевой фрезы с регулируемой жёсткостью по-

зволило снизить амплитуду колебаний в 1,3...1,5 раза по сравнению с стандартной торцевой фрезой тех же конструктивных параметров, что дало возможность повысить производительность обработки в 2,5 раза без потери качества обработанной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барзов А.А. Эмиссионная технологическая диагностика. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2005. 384с.: ил.
2. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом [Текст] / И.Г. Жарков. – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с. : ил.
3. Е.Ю. Татаркин, Ю.А. Кряжев, Е.С. Огневенко, А.Ю. Кряжев, Е.Ю. Горин Определение демпфирующих свойств фрезы новой конструкции [Текст] Вестник Алтайской науки, №2-1, 2003. С.33-35.
4. Кряжев Ю.А. Диагностика и управление качеством обработанной поверхности при иглофрезеровании методом акустической эмиссии [Электронный ресурс] / В.В. Ильиных, А.Ю. Кряжев, Е.Ю. Татаркин// Наука и молодежь – 2013: 10-я Всероссийская науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Барнаул, АлтГТУ, апрель 2013 г.). – Барнаул. – 2013. Режим доступа: <http://edu.secna.ru/media/f/otm.pdf>.
5. Кряжев Ю.А., Огневенко Е.С. Исследование колебательных процессов, возникающих при работе спирального сверла, с применением анализа акустического сигнала. «Технология машиностроения», - 2008. - №1 - С.28-29.

Кряжев Ю.А., к.т.н., доц., каф. «Технология машиностроения», ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», тел. 8(385)26-11-06, E-mail: kryazhev57@mail.ru;

Кряжев А.Ю., аспирант, каф. «Технология машиностроения», ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»;

Горин Е.Ю., аспирант, каф. «Технология машиностроения», ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», тел. 89628196890;

Татаркин Е.Ю., д.т.н., зав., каф. «Технология машиностроения», ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».