

УДК 621.923:621.90.17

Н.И. Покинтелица, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053
tm@sevntu.com.ua

В.А. Сидоров, доцент, канд. техн. наук

Донецкий национальный технический университет
ул. Артема, 58, г. Донецк, Украина, 83001
sidorov_va@ukr.net

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ПРИ ТЕРМОФРИКЦИОННОМ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

В статье представлены результаты исследований температурно-деформационных процессов в зоне контакта инструмента и заготовки при термофрикционной обработке сталей режущими дисками. Показано, что процесс термофрикционной обработки является периодическим, при котором частота вращения инструмента модулируется низкочастотным процессом резания.

Ключевые слова: термофрикционная обработка, режущий диск, инструмент, температура, деформация, вибрация, заготовка, стружка, спектр, шпиндель.

Среди процессов механической обработки сталей способ термофрикционного резания (ТФР) занимает особое место благодаря изначально решенным вопросам обеспечения высокой производительности и стойкости инструмента. Инструмент, применяемый для выполнения данной операции, выполнен в форме режущего диска (РД), которому в процессе обработки задается вращение с окружной скоростью 50...80 м/с. При соприкосновении РД с обрабатываемой поверхностью выделяется значительное количество теплоты, в результате чего происходит разогрев металла в зоне его контакта с инструментом. Продольное перемещение заготовки приводит к возникновению и развитию процесса пластического деформирования металла срезаемого припуска, сопровождающегося образованием сливной стружки. В тоже время недостаточная изученность данного процесса не позволяет рекомендовать термофрикционную обработку (ТФО) для широкого промышленного внедрения.

В работах, посвященных разработке теоретических основ и практической реализации ТФО [1, 2], основное внимание уделялось вопросам исследования закономерностей процесса стружкообразования при ТФО плоских поверхностей, рассматривались также кинематика резания, состояние поверхности, тепловые явления и оптимизация режимов резания.

Целью настоящей статьи является определение особенностей температурно-деформационных процессов в зоне контакта РД и заготовки на основе комплексного исследования вибрационных параметров заготовки и определения физических основ процесса ТФО.

Обобщение проведенных исследований режимов ТФО позволило определить основные характеристики процесса и сформировать направления дальнейших исследований, что и представлено в данной работе.

Традиционным методом при изучении напряженного состояния является тензометрирование, позволяющее оценить напряжения, действующие в деталях при нагружении. В то же время периодические изменения сил при реализации процессов обработки приводят к возникновению механических колебаний узлов металлорежущих станков и обрабатываемой заготовки. Возможность использования вибрационных параметров для исследования процессов обработки деталей рассмотрена в работах [3, 4]. В настоящее время отсутствуют единые подходы к рассмотрению вибрационных процессов действующего оборудования. Одним из первых вопросов является выбор приборного оборудования, определение режимов измерения и контрольных точек измерения вибрации. Ответы на данные вопросы получены после проведения серии предварительных экспериментов на установке, выполненной на базе вертикально-фрезерного станка модели 6М13ПБ.

В качестве рабочей гипотезы принято предположение о минимальных энергетических затратах для обработки при минимальных значениях параметров вибрации. Измерения параметров вибрации проводились при работе оборудования в режиме холостого хода для оценки технического состояния станка и в режиме рабочего хода для определения характеристик технологического процесса ТФО. В качестве измерительного прибора использовался спектроанализатор вибрации 795М и программное обеспечение КонСпект. Крепление пьезоэлектрического датчика осуществлялось при помощи шпильки, а в дальнейшем при помощи магнита для повышения оперативности проводимых измерений.

Измерения проводились на корпусе подшипникового узла шпинделя вертикально-фрезерного станка в радиальном направлении и на заготовке в вертикальном и горизонтальном направлениях. Обозначение точек контроля приведено на рисунках 1, 2. Точки 1, 2 – корпус шпинделя вертикально-фрезерного станка, радиальное направление (рисунок 1). Точки 3, 4, 5 – обрабатываемая заготовка (рисунок 2).

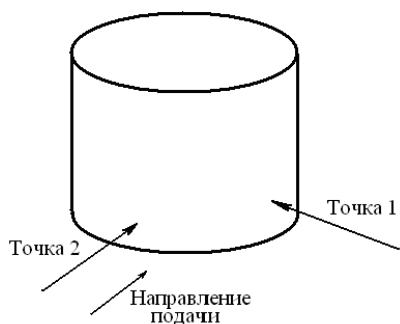


Рисунок 1 – Расположение контрольных точек измерения вибрации на шпинделе вертикально-фрезерного станка

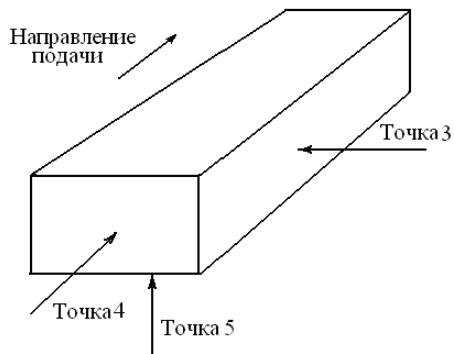


Рисунок 2 – Расположение контрольных точек измерения вибрации на заготовке

Проводились измерения общих параметров вибрации, частотной и временной форм вибрационного сигнала при частоте вращения РД: 2000 мин^{-1} , 2500 мин^{-1} . Контролируемый частотный диапазон: $10 \dots 1000 \text{ Гц}$, $10 \dots 4000 \text{ Гц}$, $18 \dots 10000 \text{ Гц}$. Рабочий режим реализован при скорости подачи 125 мм/мин , 160 мм/мин и глубине резания $t = 0,5 \dots 1,5 \text{ мм}$.

Спектроанализатор вибрации 795М позволяет: провести измерения среднеквадратичных значений виброперемещения, виброскорости, виброускорения и пиковых значений виброускорения; осуществить временную запись данных вибрационных сигналов в реальном временном масштабе.

Проведенной анализ общего уровня вибрации позволил установить информативный частотный диапазон при техническом диагностировании и изучении технологического процесса.

Выполненный спектральный анализ вибрационного сигнала позволил уточнить характер процесса и выявить резонансные частоты (рисунок 3). Процесс обработки на заготовке проявляется в виде полигармонического сигнала, являющегося результатом металлического контакта между обрабатываемой заготовкой и вращающимся диском. Основная частота модуляции – оборотная частота вращения диска. Значимые составляющие присутствуют до частоты 4000 Гц . Процесс имеет случайный характер, что приводит к изменению спектра вибрационного сигнала (рисунок 4).

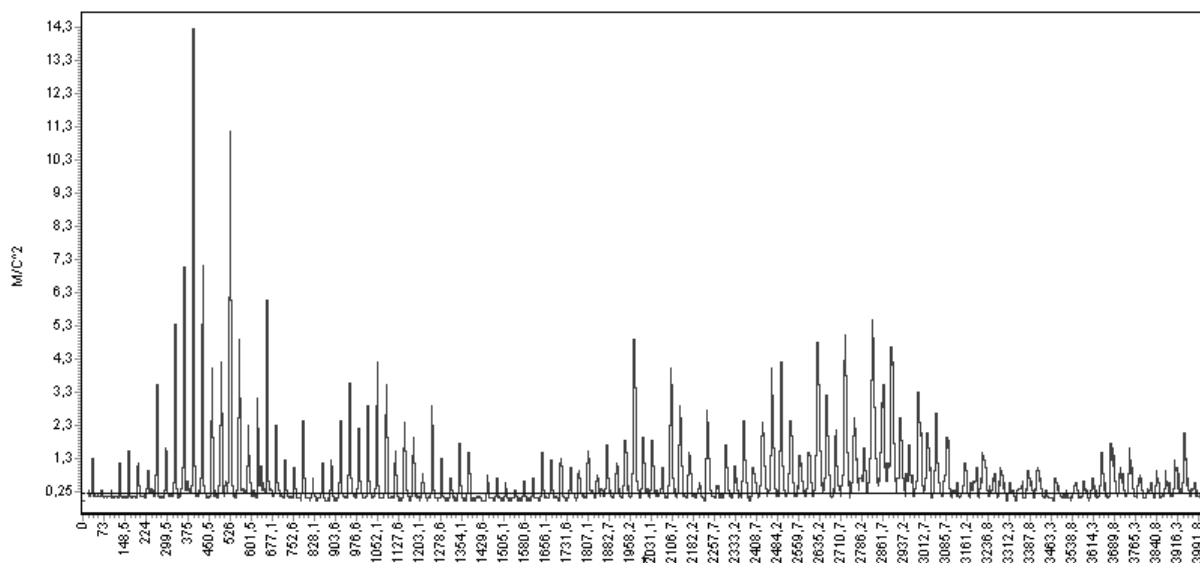


Рисунок 3 – Спектрограмма виброускорения в точке 4: (холостой ход, частота вращения РД 2000 мин^{-1})

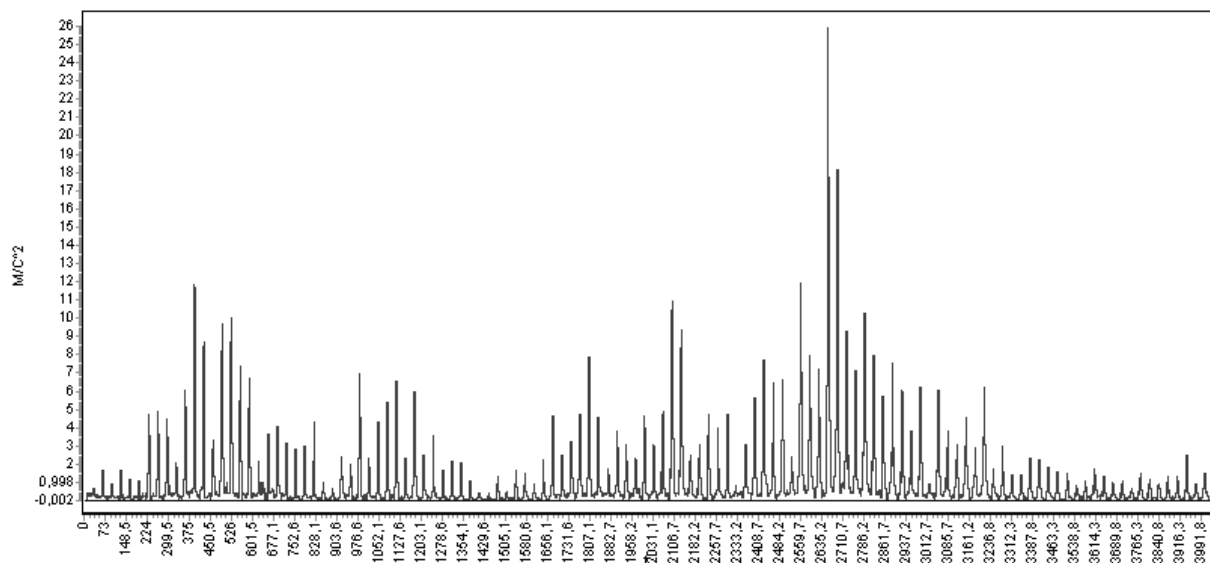


Рисунок 4 – Спектрограмма віброускорення в точці 4:
(робочий ход, частота вращения РД 2000 мин⁻¹)

Нестабильность вибрационных параметров и процесса обработки подтвердилась при изучении временной реализации сигнала виброускорення (рисунок 5). Детальное изучение временных форм позволило распознать основные частоты вибрационного процесса – оборотную частоту вращающегося диска, состояние подшипников шпинделя станка.

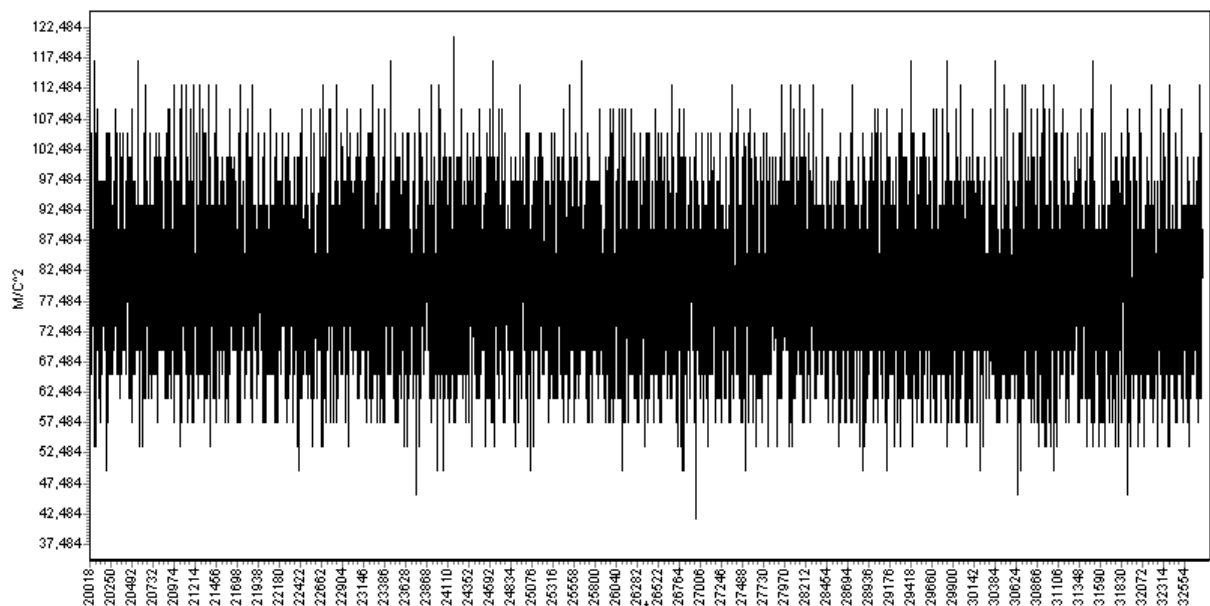


Рисунок 5 – Временная форма віброускорення: $t = 1,0$ мм; длительность записи 12,5 с

Следующая серия экспериментов была посвящена изучению физических процессов, реализуемых при ТФО.

Визуально определены цвета каления в зоне резания – светло-желтый или ярко-желтый (рисунок 6), что соответствует температуре 1150...1250°C или 1250...1300°C. Следы оплавленной поверхности на снимаемом материале позволяют предположить наличие высокой температуры, сравнимой с температурой плавления стали в зоне обработки (рисунок 7). Стружка имеет волнистую, периодическую структуру с шагом 1,5...2,6 мм, расстояние между волнами и параметры шероховатости могут меняться в зависимости от режимов обработки. Это позволяет утверждать о периодичности процесса обработки.



Рисунок 6 – Общий вид процесса термофрикционной обработки

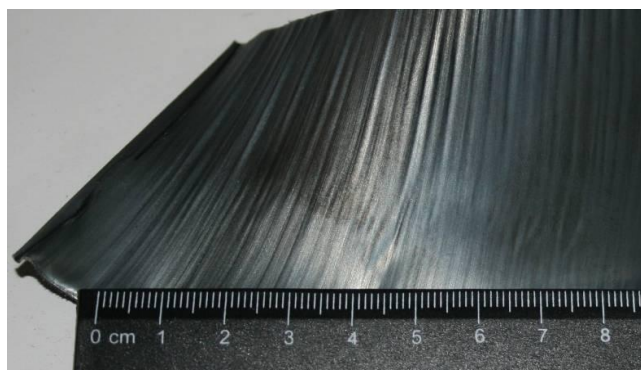


Рисунок 7 – Периодические следы на стружке

Вид обработанной поверхности позволил предположить, что в результате ТФО реализуется ускоренный процесс износа схватыванием второго рода [3]. Условия образования: трение скольжения, высокие давление и скорость относительного перемещения (линейная скорость диска ≈ 50 м/с), сочетание которых обуславливает большие потери на трение, высокий градиент и интенсивное возрастание температуры в поверхностных слоях (до 1300°C). Различают три стадии износа схватыванием второго рода. Первая стадия соответствует, для сталей, интервалу температур до 600°C , мало снижающих механические свойства материалов. Внешний вид поверхности: вырывы частиц на детали из менее прочного материала, чередующиеся через примерно одинаковые промежутки. Вторая стадия износа развивается в интервале температур $600\ldots 1300^{\circ}\text{C}$. Такая температура заметно снижает механические свойства сталей и металл размягчается. Внешний вид поверхности: на контактной поверхности более прочной детали видны налипания и размазывание металла, а на поверхности менее прочной детали – вырывы. Третьей стадии износа соответствуют температуры плавления – на поверхности трения появляются оплавленные бороздки [3].

В процессе выполнения эксперимента обработка проводилась вращающимся диском, контактирующим с неподвижной деталью. В результате температура в зоне контакта увеличивается свыше 1200°C , что приводит к размягчению материала заготовки (снижаются прочностные свойства по зависимости $\sigma = f(t)$ до значений $40\ldots 50$ МПа). Материал диска имеет более низкую температуру (ниже 150°C) благодаря одностороннему охлаждению, цвета побежалости (синего цвета – около 300°C) наблюдались лишь по краю диска (рисунок 8).

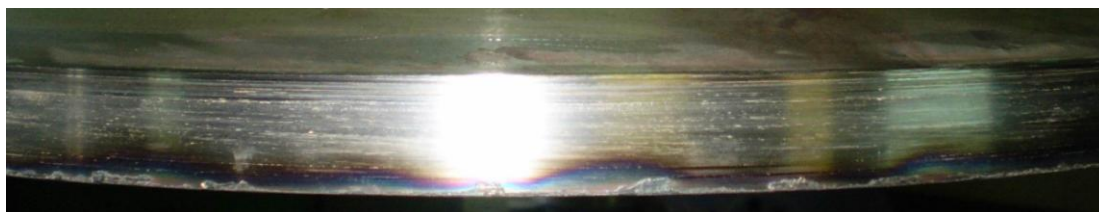


Рисунок 8 – Нагрев передней поверхности РД

Происходит потеря устойчивости разогреваемого материала и диск перемещается на глубину прогретой зоны. Предел текучести за прогретой зоной больше и вновь начинается режим разогрева зоны. В данном периодическом процессе схватывания и налипания в значительной мере не происходит из-за довольно большого различия в прочности контактирующих материалов (пара твердый – мягкий).

В процессе ТФО основными действующими силами являются силы трения. Исходя из данного предположения, определена следующая последовательность процесса:

- разогрев металла в зоне трения до температуры, близкой к температуре плавления;
- потеря прочностных свойств и устойчивости в зоне контакта заготовки и диска;
- продвижение диска на расстояние прогретой зоны;
- повторение цикла обработки.

Это позволяет объяснить возникновение периодических следов на стружке, снимаемой при обработке. Практически в зоне резания реализуются следующие физические процессы: снижение прочностных свойств материала обрабатываемой детали; потеря устойчивости снимаемой стружки; изменение коэффициента трения.

Можно предположить, что при температурах больших $1100...1200^{\circ}\text{C}$, возникающих при ТФО, существует значительное уменьшение коэффициента трения из-за изменения характера взаимодействия контактирующих поверхностей. Происходит переход к квазизжидкостному трению, роль жидкости выполняют расплавленные (или оплавленные) частицы металла. Следовательно, при изменении температуры будет меняться коэффициент трения, и процесс становится периодическим.

Исходя из условия потери устойчивости снимаемого слоя стружки, определяемого формулой Эйлера, силой, необходимой для подачи, и параметрами шага периодических следов можно оценить снижение модуля упругости по формуле [3]:

$$E = \left(2 \cdot \sigma_T \cdot s^2 \right) / \left(\epsilon^2 \cdot t^2 \right),$$

где $\sigma_T = 40...50$ МПа – предел текучести материала при температуре $1200...1300^{\circ}\text{C}$; $s = 1,6...2,6$ мм – периодический шаг процесса; $t = 0,5...1,5$ мм толщина снимаемой стружки.

Периодичность процесса обработки подтвердилась при анализе временных реализаций вибрационного сигнала, зафиксированных на обрабатываемой детали. Форма сигнала при глубине резания 0,5 мм для различной длительности записи приведена на рисунках 9, 10. Сигнал модулируется частотой вращения диска. Зафиксированные периоды колебаний – следствие периодичного процесса резания, приводят к появлению на поверхности заготовки рисунка с шагом $1,6...2,6$ мм. Установлено, что изменение глубины резания приводит к искажению симметричности модулирующего сигнала. Процесс образования стружки является квазипериодическим.

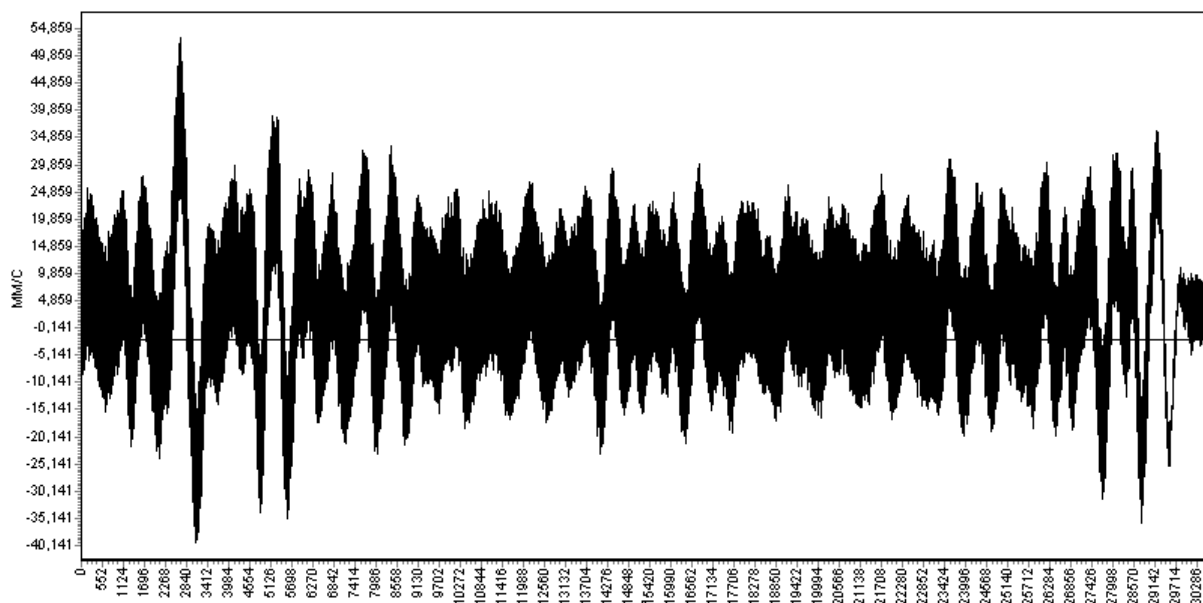
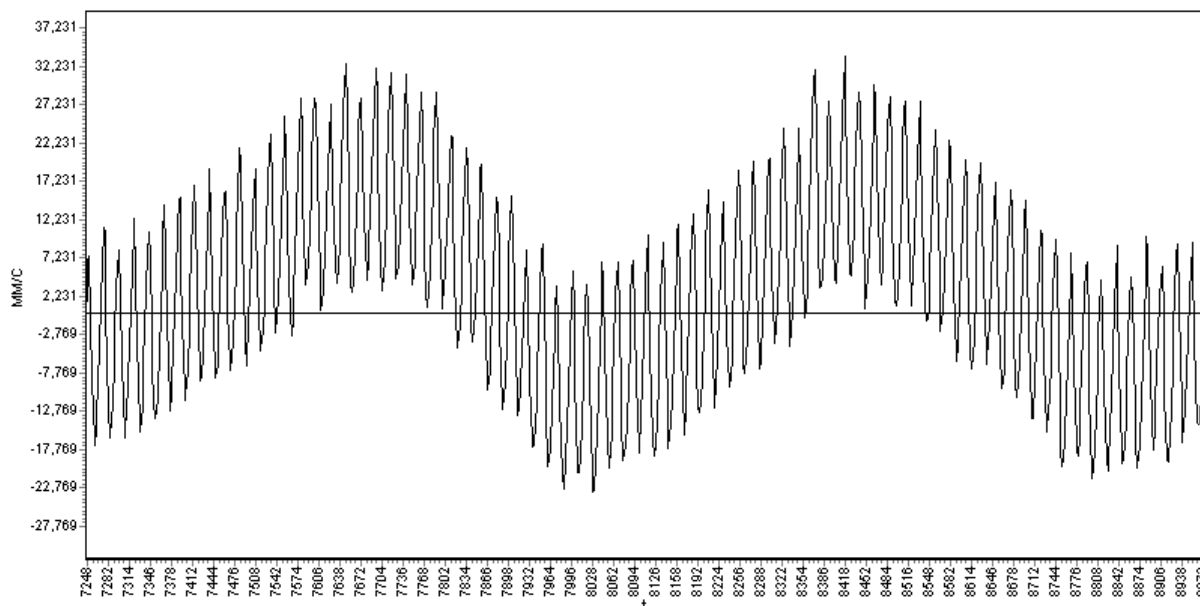


Рисунок 9 – Временная форма виброскорости: $t = 0,5$ мм; частота вращения РД 2000 мин^{-1} ; подача 160 мм/мин ; длительность записи 30 с



ДонНТУ/Пуганск/25_10_08/2 (2000/10/25 13:09:51 - Функция времени $F(t)$)

Рисунок 10 – Временная форма виброскорости: $t = 0,5$ мм; частота вращения РД 2000 мин^{-1} ; подача 160 мм/мин; длительность записи 1,7 с

В наибольшей степени отражает энергетические параметры протекающего процесса запись временной формы виброскорости. Минимальные абсолютные значения среднеквадратичного значения виброскорости можно соотнести с минимальными энергетическими затратами на реализацию процесса обработки. Вторым необходимым условием является стабильность процесса, характеризуемая разбросом амплитудных значений и стабильностью периода модулирующего сигнала. Данные предположения позволяют сформировать диагностическое пространство $D = f(A, t)$ [4]. Пример расчета для выборки значений временной формы виброскорости, представленной на рисунке 9, приведен на рисунке 11. При проведении планируемого эксперимента в качестве функции отклика возможно использовать значения радиус-вектора исследуемого режима от теоретического значения.

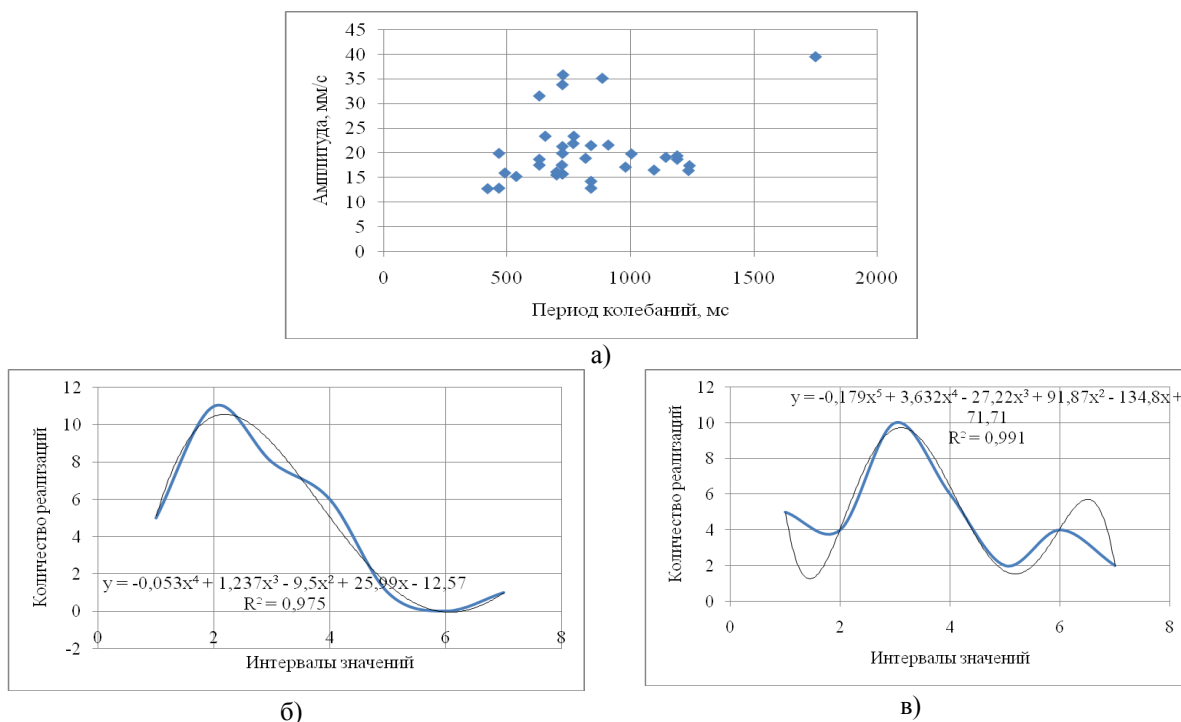


Рисунок 11 – Конкретная реализация диагностического пространства $D = f(A, t)$ (а) и распределение значений амплитуды (б) и периода (в)

Таким образом, на основании анализа полученных результатов, можно сделать следующие выводы.

1. Процесс ТФО является периодическим, при котором частота вращения обрабатываемого инструмента модулируется низкочастотным процессом резания.

2. Причинами колебаний при ТФО являются следующие физические процессы: снижение прочностных свойств материала обрабатываемой детали в результате нагрева в локальной зоне трения; потеря устойчивости снимаемого слоя металла; изменение коэффициента трения вначале плавное, а затем ступенчатое.

3. Для оценки оптимальности режима ТФР могут быть использованы диагностические параметры стабильности вибрационного процесса: разброс амплитудных значений и стабильность периода модулирующего сигнала.

Перспективным направлением исследований в данной области является определение закономерностей изменения коэффициента трения в зоне контакта в зависимости от режимов обработки и сочетания материалов контактирующих пар (инструмента и заготовки).

Бibliографический список использованной литературы

1. Зарубицкий Е.У. Исследование процесса стружкообразования при обработке металлов диском трения / Е.У. Зарубицкий, Н.В. Талантов, Т.П. Костина // Вестник машиностроения. — 1981. — № 9. — С. 57–58.

2. Покинтелица Н.И. Пластическое деформирование и температура в зоне резания при термофрикционной обработке материалов / Н.И. Покинтелица, В.А. Плахотник // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. пр. — Луганськ: Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2003. — Ч. 1. — С. 196–201.

3. Синопальников В.А. Надежность и диагностика технологических систем: учебное пособие для вузов / В.А. Синопальников, С.Н. Григорьев. — М.: Высш. шк., 2005. — 344 с.

4. Зуева Л.М. Оценка параметров эффективности технологической системы по обработке валков / Л.М. Зуева (Л.М. Богданова) // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. — Краматорськ–Київ, 2008. — Вип. 23. — С. 248–254.

Поступила в редакцию 1.09.2010 г.

Покинтелица М.І., Сидоров В.А. Особливості температурно-деформаційних процесів у зоні контакту інструменту та заготовки при термофрикційному різанні металів

У статті представлені результати досліджень температурно-деформаційних процесів у зоні контакту інструмента та заготовки при термофрикційній обробці сталей різальними дисками. Показано, що процес термофрикційної обробки є періодичним, при якому частота обертання інструменту моделюється низькочастотним процесом різання.

Ключові слова: термофрикційна обробка, різальний диск, інструмент, температура, деформація, вібрація, заготовка, стружка, спектр, шпиндель.

Pokintelitsa N.I., Sidorov V.A. Features of temperature-deformation processes in the area of contact between an instrument and a workpiece at the thermofrictional cutting of metals

The article shows research results on temperature-deformation processes in the area of contact between the instrument and a workpiece at thermofrictional treatment of steels by cutting disks. It is shown that the process of thermofrictional treatment is periodical, at which frequency of rotation of an instrument is modulated by the low frequency process of cutting.

Keywords: thermofrictional treatment, cutting disk, instrument, temperature, deformation, vibration, purveyance, shaving, spectrum, spindle.