

УДК 622:001.57

**И.Н. Миков, Л.П. Ивлева, У.Ф. Фейзханов**

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАРНОГО МИКРОФРЕЗЕРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

*Описан стенд для реализации гравирования материалов методом ударного микрофрезерования. Он состоит из гравировального станка, комплекта датчиков и ноутбука со специальным программным обеспечением Zetlab. На станке-стенде были получены осциллограммы виброускорения якоря электромеханического преобразователя, фиксировался момент времени удара и число оборотов фрезы. Была уточнена математическая модель гравирования, полученная в Mathcad. Построены графики перемещения и скорости якоря.*

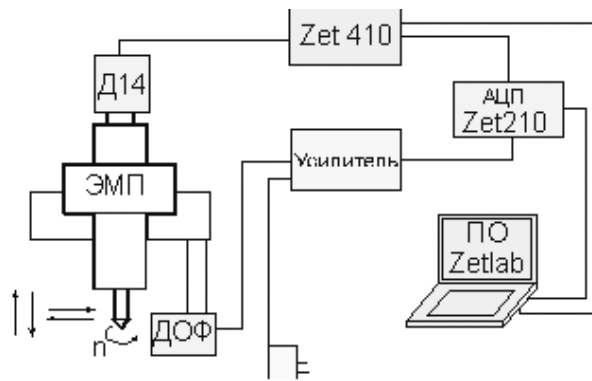
*Ключевые слова: ударное микрофрезерование, осциллограмма, гравирование.*

Семинар № 25

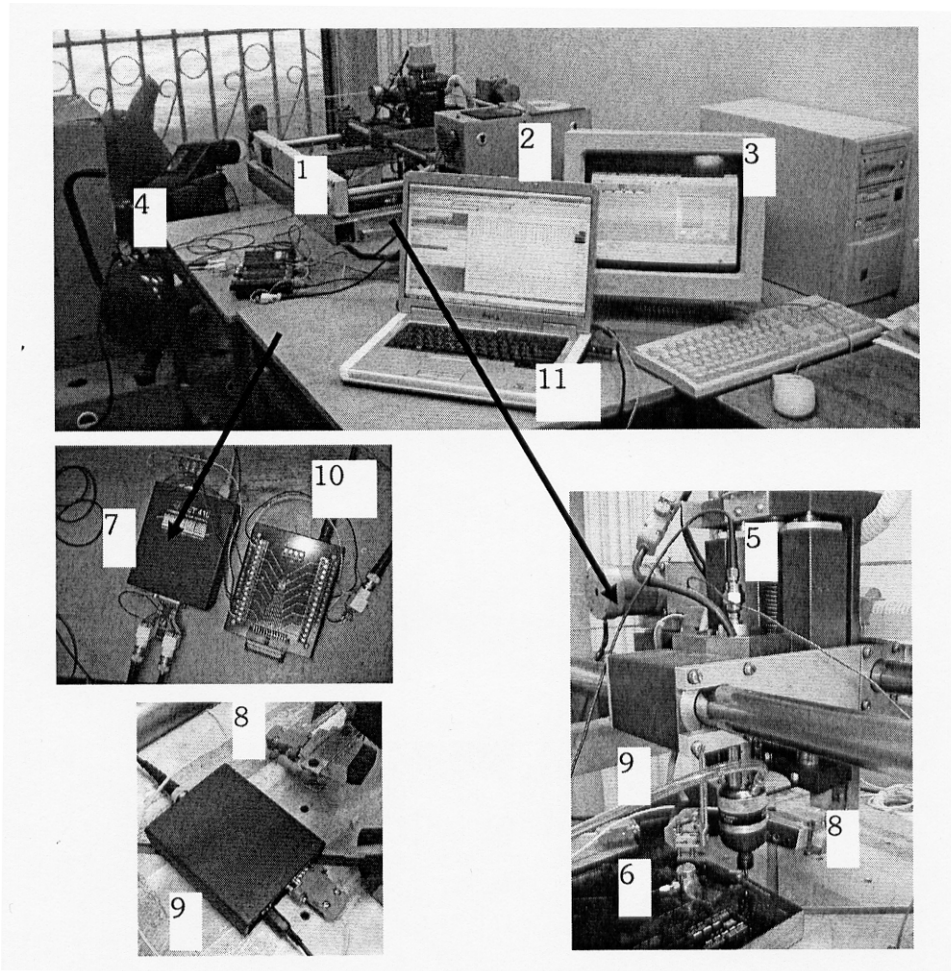
---

**Н**анесение изображений на поверхность материала с целью ее декорирования (художественное гравирование), маркировки, при изготовлении клише в полиграфии осуществляется несколькими способами. В том числе используют растровое гравирование на гравировальных и гравировально-фрезерных станках. Ударное микрофрезерование позволяет соблюсти соответствие оптических плотностей оригинала и изображения, как и обычное растровое гравирование, но, помимо этого обеспечивает повышение качества получаемых лунок. При УМФ совмещение вращательного и возвратно-поступательного движения режущего инструмента – одноперовой фрезы – позволяет убрать выплыв, образующийся при обработке пластичных материалов ударом, и дополнительный скол – при обработке хрупких материалов [1]. С целью изучения процесса гравирования и УМФ, в том числе, был создан станок-стенд, включающий в себя: гравировальный станок «Полутон» (станок 1, программируемый контроллер 2, компьютер 3, компрессор 4, комплект из двух вибропреобразователей 5, 6 с усилителем 7, фотодиодного датчика оборотов 8 с усилителем 9, АЦП-ЦАП (10) и ноутбука с программным обеспечением Zetlab 11. Принципиальная схема размещения датчиков и фото станка-стенда и приведены на рис. 1 и 2 соответственно. Для уменьшения шума и выделения полезного сигнала датчик на электромеханическом преобразователе (ЭМП) Д14 и АЦП заземлили в одной точке, разделили идущий на АЦП сигнал с помощью дополнительного сопротивления так, чтобы его интегральный уровень не превышал допустимый. Входное сопротивление усилителя Zet 410 изменили на 5МОм в отличие от стандартного 100 кОм.

Были использованы миниатюрные акселерометры – пьезоэлектрические вибропреобразователи ДН4-1М и Д14. В таблице 1 представлены их характеристики.



**Рис. 1. Схема станка стнда для УМФ**



**Рис. 2. Станок-стенд для исследования УМФ**

Таблица 1

**Характеристики пьезоэлектрических виброизмерительных преобразователей Д-14**

1. Рабочий диапазон частот, Гц	до 10000
2. Действительное значение коэффициента преобразования вибропреобразователя на частоте 1000 Гц, $\text{мВ} \cdot \text{с}^{2*} \cdot \text{м}^{-1}$	$2 \pm 0,3$
3. Электрическое сопротивление изоляции в нормальных условиях (от +15 до +25°C), ГОм, не менее	1
4. Электрическая емкость вибропреобразователя с кабелем, пФ	от 1100 до 1700
5. Неравномерность частотной характеристики в диапазоне частот, от 1000 до 8000 Гц относительно уровня выходного сигнала на частоте 1000 Гц, не более, в диапазоне частот от 8000 до 10000 Гц, не более,	$\pm 10$ $\pm 15$
6. Относительный коэффициент поперечного преобразования, не более, %	10
7. Нелинейность амплитудной характеристики до $1200 \text{ м/с}^2$ , не более, %	10
8. Габаритные размеры, мм	23x16
9. Масса, не более, кг	0,015
<b>ДН-4-М1</b>	
1. Рабочий диапазон частот, Гц	до 12 600
2. Действительное значение коэффициента преобразования вибропреобразователя на частоте 160 Гц, $\text{мВ} \cdot \text{с}^{2*} \cdot \text{м}^{-1}$	$1 \pm 0,06$
3. Относительный коэффициент поперечного преобразования, %	4
4. Средний срок службы, не менее, лет	10
5. Габаритные размеры, мм	20x20x14
6. Масса, не более, кг	0,013
7. Рабочий диапазон температур, °С	-30...+70

Таблица 2

**Характеристики Zet410<sup>1</sup> и Zet210<sup>2</sup> АЦП**

<b>Аналоговый вход (АЦП)</b>	
Количество входов	16 синфазных / 8 дифференциальных
Суммарная частота преобразования по всем включенным каналам	до 500 кГц
Количество разрядов АЦП	16
Максимальное входное напряжение/ток	$\pm 7 \text{ В}$
Входное сопротивление *	2 кОм
Динамический диапазон	84 дБ
Максимальная неравномерность АЧХ в частотном диапазоне 10 Гц...200 кГц	1 дБ
Защита входов при включенном питании	$\pm 30 \text{ В}$
Защита входов при выключенном питании	$\pm 30 \text{ В}$
Межканальное проникновение	- 72 дБ
Входная емкость	20 пФ
<b>Аналоговый выход (ЦАП)</b>	
Количество выходов	2 синфазных
Суммарная частота преобразования по всем включенным каналам	до 500 кГц
Максимальное выходное напряжение	$\pm 2,5 \text{ В}$
Количество разрядов ЦАП	16

<sup>1</sup> [http://www.zetms.ru/catalog/adc\\_dacs/tda.php](http://www.zetms.ru/catalog/adc_dacs/tda.php)<sup>2</sup> [http://www.zetms.ru/catalog/adc\\_dacs/adc\\_sigmausb.php](http://www.zetms.ru/catalog/adc_dacs/adc_sigmausb.php)

<b>Цифровой вход/выход</b>	
Количество бит на вход/выход	14 бит
FIFO-буфер	16 кслов
Тип логики	TTL
<b>Усилитель</b>	
<b>Вход / питание датчиков</b>	
Количество входных каналов	2 дифференциальных
Частотный диапазон при КУ = 1, 10, 100	до 80 кГц
Частотный диапазон при КУ = 1000	до 18 кГц
Максимальная скорость нарастания выходного сигнала	1,2 В/мкс
Максимальное входное напряжение	± 10 В
Входное сопротивление	100 кОм
Входной ток	3 нА
Входная емкость	7 пФ
Спектральная плотность шумов	15 нВ/Гц <sup>1/2</sup>
Межканальное проникновение	- 72 дБ
Коэффициент усиления	1, 10, 100, 1000
Гальваническая развязка входных каналов	
<b>Выход</b>	
Количество выходных каналов	2
Выходное напряжение	± 7 В
Выходной ток	до 10 мА

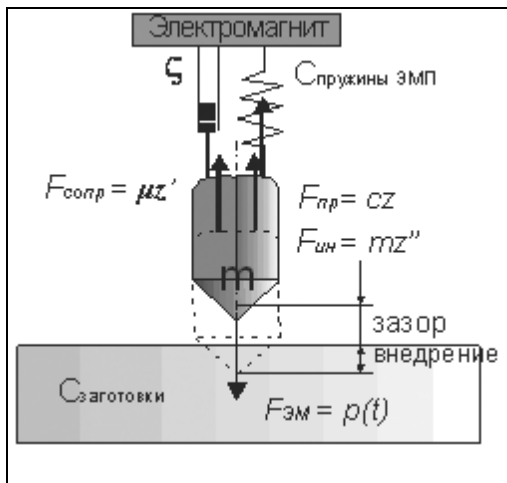
Таблица 3

**Характеристики ДОФ**

Наименование параметра	Значение по ТУ
Диапазон измерений, об/мин	0-10 000
Погрешность измерений, об/мин	±1
Напряжение питания, В	12±20%
Диапазон рабочих температур, °С	от +5 до +70
Размеры, мм	75x35x20
Масса, г	50

Для регистрации оборотов фрезы использовали фотодиодный датчик оборотов (ДОФ), предназначенный для измерения частоты вращения валов. Он обеспечивает преобразование измеряемого параметра в импульсный выходной сигнал за один оборот вала. Работает по отраженному световому сигналу в инфракрасном диапазоне. Рабочее расстояние до вращающегося вала составляет 20–50 мм. Его характеристики приведены в табл. 3.

Усилитель Zet410 обеспечил соединение Д14 и ДН4-М1 с АЦП Zet210, который, в свою очередь, обеспечил ввод сигнала в виде цифровых данных в память ноутбука для их дальнейшей обработки с помощью фильтров пакета Zetlab. Характеристики АЦП приведены в табл. 2. Модуль ZET 210 предназначен для измерений параметров сигналов в широком частотном диапазоне (с частотой дискретизации до 500 кГц), поступающих с различных первичных преобразователей. Для расширения функциональных возможностей измерительного прибора ZET 210, универсализации и увеличения номенклатуры подключаемых датчиков используется предварительный усилитель ZET 410 [2]. К усилителю можно подключать как пассивные (резистивные) датчики, так и датчики на интегральных микросхемах (миниатюрные акселерометры, датчики



**Рис. 3. Схема колебательной системы при гравировании**

магнитного и электрического полей и т.д.). Коэффициенты усиления – фиксированные (1, 10, 100 или 1000) – выбираются при помощи микропереключателей, расположенных на лицевой панели усилителя.

Базовое ПО Zetlab с модулем регистрации и воспроизведения сигналов позволило не только записать, но и в дальнейшем обработать сигналы: профильтровать их с помощью программного фильтра высоких и низких частот,

адаптивного фильтра 50 Гц. Путем первого и второго интегрирования из сигнала виброускорения получены виброскорости и виброперемещения.

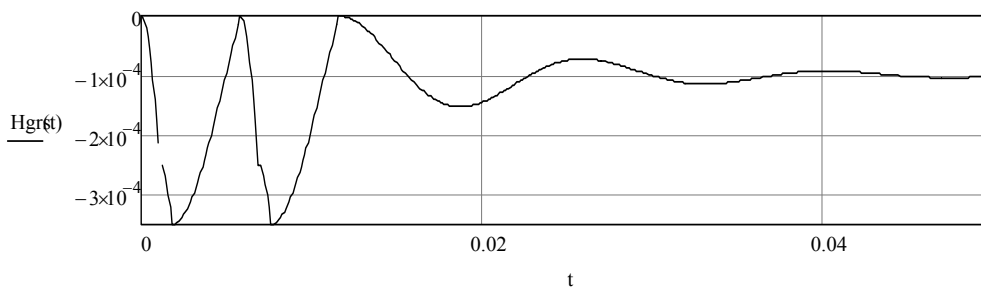
На собранном станке-стенде проводились измерения виброускорения ЭМП, фиксация момента удара инструмента о заготовку, отслеживание числа оборотов фрезы с последующим нахождением скорости и ускорения инструмента. Это необходимо для проверки математической модели гравирования, в которой инструмент представлен колебательной системой с одной степенью свободы, характеризующейся приведенной массой, суммарной жесткостью и коэффициентом демпфирования (рис. 3).

Переходная характеристика колебательного звена  $h(t)$  рассматривается на 3 этапах: 1) прохождение технологического зазора под действием электромагнитной силы (вынужденные колебания), 2) внедрение в материал также под действием электромагнитной силы (причем здесь существенно меняется приведенная жесткость системы), 3) возврат инструмента в исходное положение за счет пружины при однокатушечном исполнении ЭМП (свободные колебания) [3].

В теории автоматического регулирования уравнение динамического (любого) звена второго порядка записывается в виде (2):

$$a_2 x_{\text{вых}}'' + a_1 x_{\text{вых}}' + a_0 x_{\text{вых}} = b_0 x_{\text{вх}}. \quad (2)$$

При корнях, когда  $a_1^2 < 4 a_0 a_2$ , звено второго порядка называется колебательным.



**Рис. 4. Прохождение зазора, внедрение, возврат якоря ЭМП и его провисание**

Первая форма записи этого звена

$$T^2 x_{\text{ВЫХ}}'' + 2\xi T x_{\text{ВЫХ}}' + x_{\text{ВЫХ}} = kx_{\text{ВХ}}. \quad (3)$$

Вторая форма записи этого звена

$$x_{\text{ВЫХ}}'' + 2\xi \omega_0 x_{\text{ВЫХ}}' + \omega_0^2 x_{\text{ВЫХ}} = \omega_0^2 kx_{\text{ВХ}}, \quad (4)$$

где  $T = \sqrt{a_2 / a_0}$  – постоянная времени,  $\xi = a_1 / 2\sqrt{a_2 a_0}$  – относительный коэффициент затухания,  $k = b_0 / a_0$  – коэффициент усиления звена,  $\omega_0 = 1/T = \sqrt{a_0 / a_2}$  – частота собственных колебаний звена [1/сек].

Для механической системы [4] вводятся следующие обозначения:  $a_2 = m$ ,  $a_1 = r$ ,  $a_0 = c$ ,  $b_0 = 1$ ,  $k = b_0 / a_0 = 1/c$ ,  $T = \sqrt{m/c}$ ,  $\omega_0 = \sqrt{c/m}$ ,  $2\xi T = r/c$ ,  $\xi = r / 2\sqrt{m c}$ .

Примем обозначение (оригинал) единичного ступенчатого воздействия –  $x_{\text{ВХ}}(t) = 1(t)$ , а обозначение реакции звена (оригинал) на это воздействие –  $x_{\text{ВЫХ}}(t) = h(t)$ .

Для автоматического регулирования для моделирования в среде Mathcad воспользуемся формулой (3), записанной в виде (5):

$$T^2 h''(t) + 2\xi T h'(t) + h(t) = k, \quad (5)$$

где  $T = \sqrt{m/c}$ ,  $k = 1/c$ ;  $\xi$  – коэффициент затухания (демпфирования).

Решение уравнения (10) – переходная характеристика (функция) колебательного звена, т.е. системы «долбляк (якорь) – пружина – катушка» (рис. 4).

Математическая модель была получена в MathCAD на основе графического решения дифференциальных уравнений с коэффициентами, меняющимися в зависимости от этапа процесса и характера колебаний. За исходные были приняты параметры:  $\xi = 0,2$ ,  $m = 5 \cdot 10^{-3}$  кг,  $c = 10^3$  кг/м,  $\Delta = 2,5 \cdot 10^{-4}$  м,  $\Delta h = 1 \cdot 10^{-4}$  м (рис. 4)

Из осциллограмм, полученных при УМФ на станке-стенде при помощи ПО Zetlab, коэффициенты дифференциального уравнения были уточнены. Для упругой системы ЭМП получены:  $m \approx 2,6 \cdot 10^{-2}$  кг,  $c \approx 10^3$  кг/м,  $T \approx 1,4 \cdot 10^{-3}$  с,  $\xi \approx 0,5$ . Отметим, что процесс гравирования идет под воздействием силовой импульсной последовательности реализуемой ЭМП. Причем импульсы имеют скважность 2, а частоту 70–100 Гц (настраивается в ПО Grave, управляющим работой гравировального станка). В ходе измерений были сняты осциллограммы и на их основе получены графики скорости и перемещения инструмента (рис. 5). Гравирование проводилось при следующих параметрах программы Grave, управляющей гравировальным станком: амплитудный режим, частота 70,5 Гц, скорость строчной подачи 1039 м/мин, амплитуда 0,5 на черном цвете и 2,3 – на белом, шаг 0,25 мм. Из анализа показаний ДОФ и рассмотрения лунок полученных методом УМФ под микроскопом доказано, что формула (6) определения необходимого числа оборотов фрезы для получения полнопрофильной лунки [1] верна:

$$N = (r/Sz) \operatorname{tg}(\alpha/2) + 1/b \quad \text{или} \quad N = \Delta h/Sz + 1/b, \quad (6)$$

где  $r$  – радиус лунки,  $\alpha$  – угол при вершине фрезы,  $b$  – число режущих кромок,  $Sz$  – подача по оси  $Z$ .

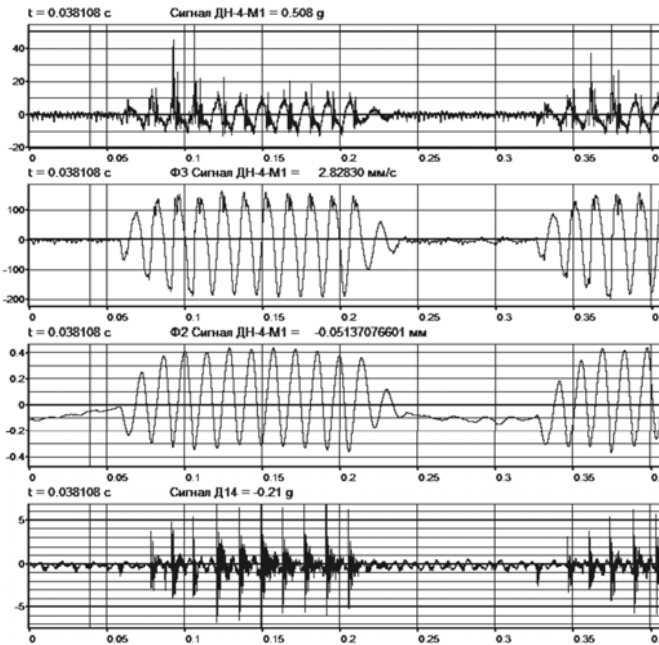
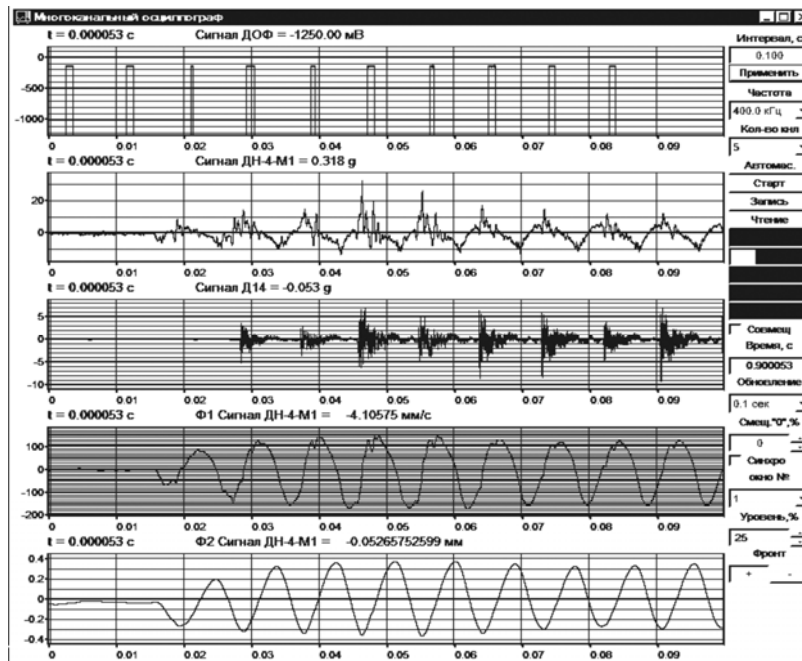
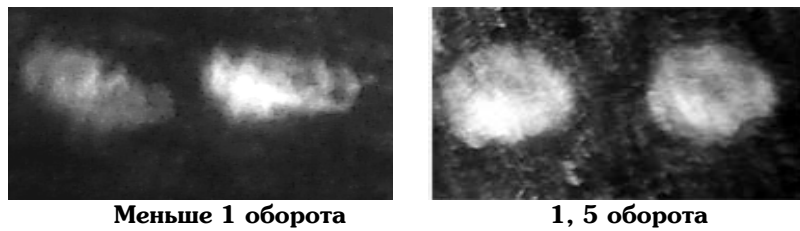


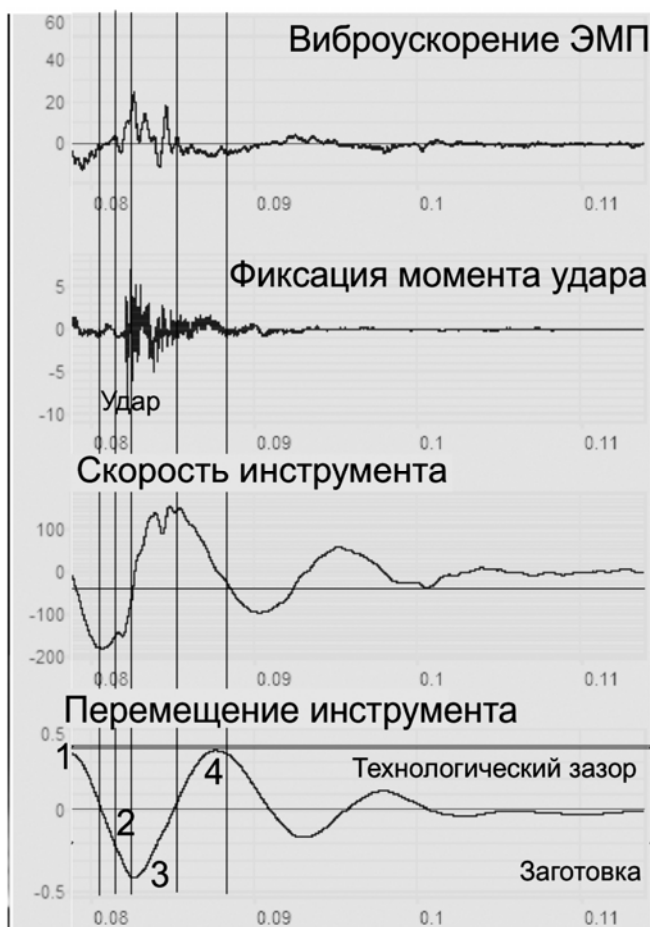
Рис. 5. Примеры осциллограмм, полученные в ПО Zetlab



**Рис. 6. Внешний вид лунок при различном количестве оборотов**

Действительно, полтора оборота для двухперовой фрезы достаточно, чтобы получить адекватные лунки на примере УМФ черного мрамора (рис. 6).

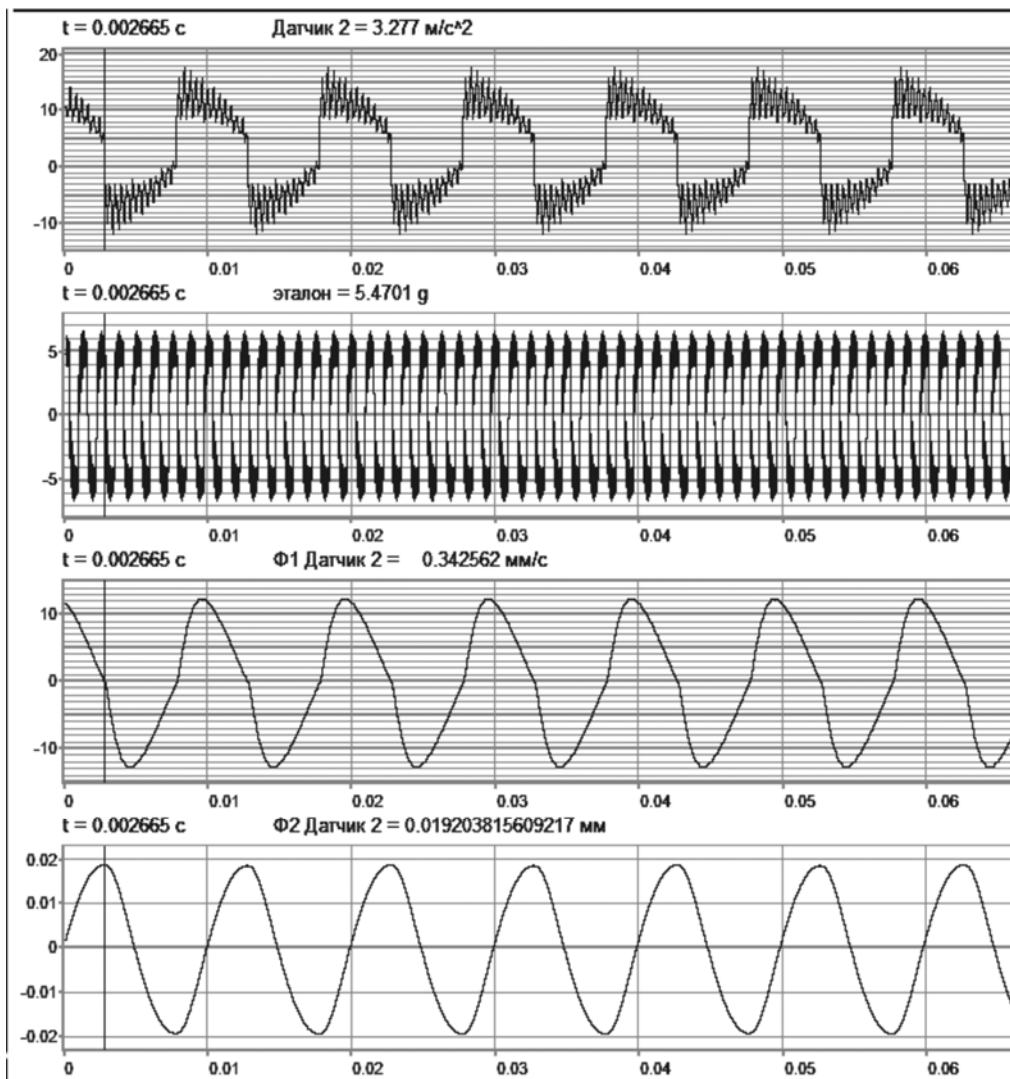
Из фрагмента осциллограммы (рис. 7) видно, что в момент касания заготовки характеристика перемещения не изменяется, в то время как скорость совершает скачок. Вообще скачки на осциллограммах объясняются наличием шумов. Станок – сложная динамическая система и в процессе гравирования УМФ совершается вращение инструмента и его удары о материал, перемещение каретки по строке и столбцу, что создает массу помех. Частично они остаются даже после программной фильтрации сигнала. Из фрагмента видно, что скорость в момент удара не является максимальной. Однако это исправляется корректировкой зазора (его уменьшением). После подъема, долбяк совершает свободные затухающие колебания, не касаясь до заготовки – наблюдается явление его проседания.



**Рис. 7. Характер перемещения и скорости якоря ЭМП (инструмента): 1 – якорь в верхней точке; 1–2 – участок технологического зазора; 2 – момент касания заготовки; 2–3 – участок внедрения заданную на глубину лунки; 3–4 – подъем якоря ЭМП**

Помимо использования станка-стенда процесс гравирования был смоделирован на электродинамическом вибростенде ВС-133.





**Рис. 8. Моделирование на вибростенде**

На вход системы была дана импульсная последовательность с частотой 100 Гц, амплитудой 0,1 мм и скважностью 2. Были получены следующие осциллограммы, показывающие характер виброускорения, виброскорости и виброперемещения (рис. 8). Видно, что  $a = 0 \text{ м/с}^2$ ,  $v = 0 \text{ м/с}$ ,  $h = \text{max}$ ;  $a = -\text{max} \text{ м/с}^2$ ,  $v = \text{max} \text{ м/с}$ ,  $h = 0 \text{ м}$ .

Итак, при исследовании движения долбяка с помощью вибродатчиков и датчика оборотов были получены значения массы якоря, жесткости, коэффициента демпфирования. Это позволило уточнить параметры математической модели и провести ее коррекцию. Модель необходима для дальнейших расчетов режимов гравирования и УМФ.

Подтверждена формула для вычисления необходимого числа оборотов фрезы, обеспечивающего лунку с ровным контуром.

Вибропреобразователь, установленный на ЭМП, имею малу массу и удобное резьбовое крепление не нарушает работу ЭМП, а ДОФ позволяет бесконтактно измерять обороты. Все это позволяет не нарушить динамику механизма гравировального станка и повысить точность измерения его параметров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Миков И.Н., Морозов В.И.* Технология автоматизированного гравирования художественных изображений. - М.:2007. – 346 с.:ил.
2. сайт [www.zetlab.ru](http://www.zetlab.ru).
3. *Миков И.Н., Осипова Л.П., Стефанова Н.Н.* Моделирование прямого и обратного движения долбяка. – М.: ГИАБ № 4 2006. – С. 247-252
4. *Красовский А.А., Поспелов Г.С.*, Основы автоматики технической кибернетики. -М.:, Изд. ВВИА имени проф. Н.Е. Жуковского, 1961. **ГИАБ**

#### Коротко об авторах

*Миков И.Н.* – доктор технических наук, профессор кафедры Технологии художественной обработки материалов,

*Ивлева Л.П.* – аспирант кафедры Технологии художественной обработки материалов Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, [ud@msmu.ru](mailto:ud@msmu.ru)

*Фейзханов У.Ф.* – директор ЗАО «ЭТМС», г. Зеленоград, [etm-s@mail.ru](mailto:etm-s@mail.ru)



#### ДИССЕРТАЦИИ

##### ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
<b>УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ</b>			
РЕШЕТНИКОВ Александр Александрович	Оценка степени воздействия взрывной волны на трубопроводные системы	05.26.03	к.т.н.
<b>УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ</b>			
ЖАБКО Андрей Викторович	Исследование закономерностей, определяющих геометрию поверхности скольжения в откосах и расчетные характеристики в изотропных горных массивах	25.00.16	к.т.н.