

УДК 621.7

И.Н. Миков, Л.П. Ивлева

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ГРАВИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ УДАРНОГО МИКРОФРЕЗЕРОВАНИЯ

Рассмотрено ударное микрофрезерование материалов – технология повышающая качество станочного факсимильного гравирования, убирающая выплыв при гравировании пластичных материалов и дополнительный скол при гравировании хрупких материалов. Предложено делать черновой проход за одно или несколько внедрений инструмента, а чистовой проход однократным внедрением на глубину действия пластических деформаций.

Ключевые слова: гравировально-фрезерный станок, ударное микрофрезерование, факсимильное гравирование.

Семинар № 25

Одним из способов нанесения изображений на плоскую поверхность материалов является гравирование, т.е. образование на поверхности материала точек и штрихов долблением или резанием. Сейчас ручное гравирование штихелями все в большем объеме заменяют станочные технологии: факсимильные растровое и векторное гравирование, осуществляемое на гравировально-фрезерных станках с ЧПУ. Так же используются технологии лазерной гравировки. С целью повышения качества и производительности станочного механического факсимильного гравирования была разработана технология ударного микрофрезерования [1, 2].

Инструмент – конусная фреза или, как ее еще называют, конусный гравер, реализующий совмещение одновременно двух рабочих движений – поступательного и вращательного (режим УМФ). Применим твердый сплав, позволяющий обрабатывать как металл, так и мягкий и средней твердости камень (в основном мрамор).

Возможна работа одной или двумя режущими гранями. В первом случае лезвие начинается от вершины конуса, проходящей через ось, что дает профиль идеальной конической лунки. Во втором случае – между режущими кромками имеется перемычка (аналогично спиральному сверлу), которая препятствует созданию острой вершины конусной лунки. Два лезвия повышают производительность и позволяют работать с уменьшенным числом оборотов инструмента, но вместе с тем затрудняется отвод стружки из зоны резания.

Способ УМФ позволяет избавиться от выплыва при обработке пластичных материалов и дополнительного скола с формированием ровного (кругового) края контура края лунки при обработке хрупких материалов, соответственно если эта обработка производится в области пластичных деформаций материала заготовки (рис. 1).

Рассмотрим более подробно этапы УМФ в табл. 1. Рис. 2 иллюстрирует эти этапы.



Рис. 1. Лунки, получаемые при гравировании и УМФ на пластичных и хрупких материалах

Таблица 1
Технологические этапы УМФ материалов

Этапы УМФ	Пластичный материал	Хрупкий материал
I этап	Разгон: за время прохождения зазора гравер развивает скорость до максимального заданного значения с целью превышения энергии упругой деформации и полного прохода режущей кромкой контура лунки за время внедрения инструмента. К нему приложено усилие $F_{эм\ y1}$, создаваемое электромеханическим преобразователем. Инструмент имеет энергию Q_1 , позволяющую ему преодолеть технологический зазор Δh за время τ и внедриться в заготовку на Δh_d	
II этап	Упругое деформирование материала заготовки под действием усилия $F_{эм\ y2} = F_{эм\ y1} + ma$. Инструмент уже внедрился в материал, но в начале внедрения резания не происходит. Фреза начинает резать лишь когда глубина внедрения Δh становится большей радиуса скругления r вершины режущей кромки: $\Delta h > (0,3-0,5)r$ (рис. 2). Инструмент внедряется с угловой ω и осевой V_z скоростями.	Касание материала – преодоление упругих деформаций. Важно не только обладание достаточной энергией, большей, чем критическая для материала заготовки, но и достаточное (для ввода энергии в материал) время контакта инструмента с заготовкой. Инструмент незначительно (1–5 мкм) внедряется в материал, но не происходит разрушения, а лишь упругие и пластические деформации. Соответственно, усилие $F_{эм\ y2}$, а энергия Q_2 . Образование ядра уплотнения (ЯУ).
III этап	Внедрение инструмента с угловой ω и осевой V_z скоростями	
	Пластическое деформирование – резание материала.	Разрушение материала – разрушение ЯУ и проваливание долбяка в лунку.
IV этап	Возврат долбяка в исходное положение за счет возвратной пружины (однокатушечный электромеханический преобразователь (ЭМП)) или электромагнитной силы возвратной катушки (двухкатушечный ЭМП)	

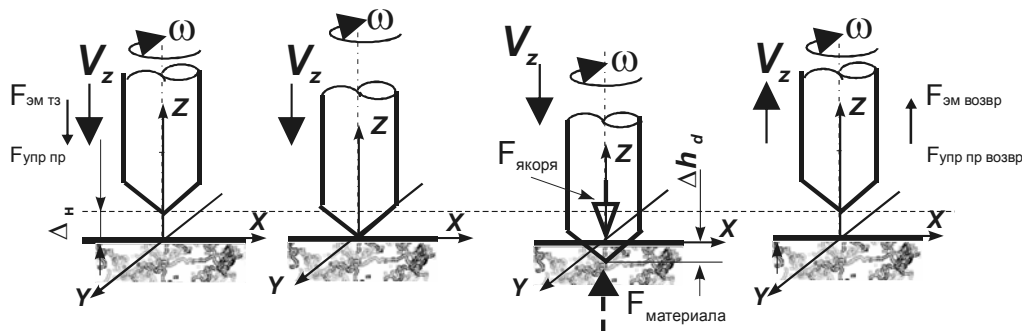


Рис. 2. Этапы УМФ

Таблица 2

Формулы для расчета энергетических передаточных характеристик технологических этапов внедрения инструмента при гравировании

	I этап	II этап	III этап
Хрупкие материалы	<p>Проход зазора до касания с заготовкой.</p> <p>Энергия долбежного инструмента находится на 1-м участке – a:</p> $Q_1 = m_{я} 2 (\Delta_n)^2 / \tau_{\Delta_n}^2 + c \Delta_n^2,$ <p>где τ_{Δ_n} – время прохода инструментом зазора Δ_n (длительность импульса, $\tau_{\Delta_n} = T/2$)</p>	<p>Конец этапа пластичных деформаций и начало этапа деформаций разрушения. Сжатие заготовки острием инструмента на $\Delta h = (\Delta h_k)$ и образование ЯУ глубиной h.</p> <p>Энергия долбежного инструмента на 2-м участке – b:</p> $Q_2 = m_{я} 2 (\Delta h_k)^2 / \tau_n^2 + c (\Delta h_k)^2 + Q_{ЯУ1},$ <p>где Δh_k – глубина внедрения, с которой начинается деформация разрушения; τ_n – время разрушения материала; $Q_{ЯУ1}$ – энергия первичного разрушения ядра уплотнения</p>	<p>Дальнейшее внедрение инструмента на $\Delta h_d = H - \Delta h_k$</p> <p>Энергия долбежного инструмента на 3-м участке – c:</p> $Q_3 = m_{я} 2 (H - \Delta h_k)^2 / \Delta_n^2 + c (H - \Delta h_k)^2 + Q_{ЯУ2},$ <p>где $Q_{ЯУ2}$ – энергия вторичного разрушения ядра уплотнения</p>
Примечание	<p>Формирование лунки производится в 2 такта.</p> <p>1-й такт, один удар – внедрение, но проникновение инструмента – многократное. Величина глубины внедрения $H_{начальное}$ рассчитывается из условия, что на этапе 3 результирующая величина дополнительного скола $C = \Sigma c_1 + c_2 + \dots$ после многочисленных проникновений инструмента первого внедрения $H_{1-го} = \Sigma H_{начальное} + H_{начальное} + H_{начальное} + \dots$ обеспечит диаметр лунки меньше окончательного.</p> <p>2. Далее следует этап 4, который функционирует на этапе пластичных деформаций b заданием соответствующего $\Delta h_{д 2-го} = H_{расчетное} - H_{1-го} < \Delta h_k$. При этом обеспечивается окончательный диаметр лунки, а заданием инструменту ω об/мин обеспечивается срезание выплыва, возникающего даже у камня, поскольку он работает на этапе пластичных деформаций</p>		

Окончание табл. 2

	I этап	II этап	III этап
Пластичные материалы	<p>Проход зазора до касания с заготовкой. Энергия долбежного инструмента находится на 1-м участке - а:</p> $Q_1 = m_{я} 2 \frac{(\Delta h)^2}{\tau_{\Delta h}^2} + c \Delta h^2$	<p>Сжатие заготовки острием инструмента на Δh, упругие деформирование материала под заготовкой и начало ее резания.</p> $Q_2 = m_{я} 2(\Delta h)^2/t_n^2 + c(\Delta h)^2 + Q_{деф}$ <p>где t_n - время прохода инструментом пути Δh</p> $t_n = \Delta h (\Delta h + \Delta h) * T/2$ <p>$Q_{деф}$ - энергия упругого и пластичного деформирования материала заготовки и ее резания при внедрении инструмента на глубину Δh</p>	<p>Прецизионное внедрение и фрезерование инструмента $\Delta h_{прец}$, для ликвидации незначительного выплыва, который может возникнуть из-за недостающей скорости фрезерования</p> $Q_3 = m_{я} 2(H - \Delta h)^2/t_n^2 + c(H - \Delta h)^2 + Q_{деф}$
Примечание	<p>Формирование лунки производится в 1 или 2 такта.</p> <p>1-й такт. Может возникнуть незначительный выплыв, из-за недостающей скорости фрезерования.</p> <p>2-й такт. Прецизионное внедрение и фрезерование инструмента</p> $\Delta h_{прец} = H_{расчетное} - \Delta h$		

Определение энергий для каждого участка возможно на основе энергетических передаточных характеристик $Q = f(z)$. (табл. 2):

На рис. 3 приведены в качестве примера энергетические передаточные характеристики для минерала (хрупкого материала) [2]. Они отражают зависимость $Q = f(z)$, где Q - энергия, требуемая для прохода z инструментом технологического зазора - участок а, упруги, пластичных - б и деформаций разрушения - с материала заготовки.

Пластичные материалы имеют идентичные характеристики с той разницей, что участок упруго-пластичных деформаций - б у них значительно больше, а разрушение - с может вовсе не наступить при внедрениях 1-2 мм.

Из передаточных характеристики видно, что хрупкие материалы обладают зоной пластичности. Работая в ней возможно добиться срезания стружки, а не разрушения ЯУ, приводящего к дополнительному сколу.



Рис. 3. Энергетические передаточные характеристики $Q = f(z)$ при гравировании минерала однокатушечным преобразователем

Реализация *совмещения этапов разрушения и пластического деформирования при гравировании хрупких материалов позволяет многократное проникновение (с одного внедрения) на полную глубину лунки, но состоящую из серии малых глубин. Они объединены продолжительностью импульса силы, на этапе разрушения, с целью малого дополнительного скола и прецизионного прохода инструмента, имеющего технологические режимы долбления и фрезерования. Последнее внедрение происходит на этапе действия упруго-пластичных деформаций. Тогда процесс УМФ сводится к двум внедрениям с последующим переходом к следующей лунке: первое – многократное долбление на месте (разрушение) с целью получения заданной глубины лунки и отсутствия дополнительного скола, второе – прецизионный проход в пластичной области.

Для реализации данного метода необходимо импульсное изменение скорости (во время отработки лунки инструмент стоит на месте, а потом скачком переходит к следующей лунке). Практически это реализуемо уменьшением частоты шагового двигателя привода перемещения по строке и изменением математики в ЧПУ гравировального станка.

Отметим, что наличие ЯУ при разрушении хрупких материалов делает возможным сделать двух- (однократное разрушение и затем форматирование краев лунки), а не многопроходный режим.

Отсутствие дополнительного скола можно реализовать другим методом – заменить первое внедрение серией вторых (прецизионных) внедрений, т.е. гравировать хрупкий материал как пластичный. Но тогда резко падает производительность.

Важно, что срезание стружки при пластическом деформировании во время УМФ начинается с определенной глубины, зависящей от радиуса (r) скругления при вершине режущей кромки, и выражается по формуле

$$\delta > (0,3 - 0,5)r,$$

где δ – минимальная глубина резания.

С другой стороны, получить ровный контур лунки на хрупком материале возможно путем гравирования в два прохода: 1) черновой проход с разрушением материала и образованием дополнительного скола величины C ; 2) чистовой проход на этапе упруго-пластичных деформаций, с учетом $2C + A_1 < r$ (A_1 – ширина инструмента, r – радиус лунки) при котором форматируется лунка. Такой метод более производителен, по сравнению с многократным внедрением. Но требуется тщательного отслеживания износа инструмента, поскольку увеличение A_1 приведет к увеличению C и следовательно суммы $2C + A_1$ [3].

$$C = \frac{16Q^2 E^2 \mu \eta}{9B^2 \sigma A_1^3 \sigma_0^3 (1 - 2\mu)k},$$

Q – работа силы F при деформировании ЯУ; E – модуль упругости; B – ширина инструмента; A_1 – ширина лезвия инструмента; μ – коэффициент Пуассона, для минерала; σ – предел прочности минерала при растяжении; σ_0 – предел прочности минерала при объемном сжатии; η – коэффициент эффективности; k – коэффициент пластичности.

Можно принять [2]

$$C = 0,24 Q_{ЯУ}^2$$

На рис. 4 представлено образование дополнительного скола.

Реализация ударного станочного гравирования возможна применением одного из двух механизмов – приводов по оси z :

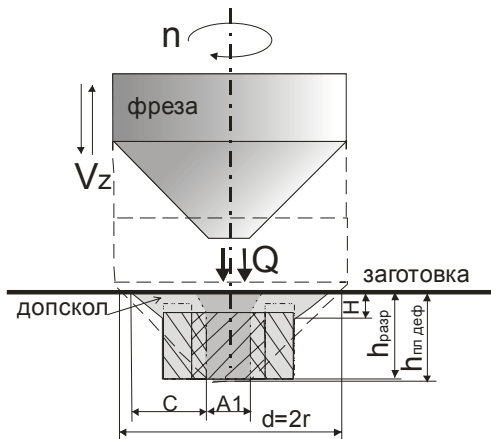


Рис. 4. Образование дополнительного скола

1) привод подач по оси z – шаговый двигатель-винт/гайка (интегрирующее звено, преимущество – возможность регулировки скорости перемещения в процесс перемещения, недостаток – небольшая частота колебаний (0,5 ...1 Гц) при переводе его в колебательное звено;

2) привод подач по оси z – подпружиненный якорь электромагнита (колебательное звено, недостаток – отсутствие возможности регулировки скорости перемещения (возможна регулировка до начала перемещения), преимущество – большая частота колебаний (до 100 Гц).

В обоих случаях привод подач по осям x и y одинаковый и каких-то изменений в части скрабирования не ожидается. В первом случае скорость осевой подачи V_z инструмента является постоянной величиной, во втором – переменной, т.е. имеет место удар. Таким образом, имеет место динамическое разрушение хрупкой заготовки, возникновение ЯУ, возникает возможность разрушения 2-х кратным внедрением и т.д. Но слож-

но выдержать строго детерминированную глубину разового внедрения.

Для подсчета требуемого количества оборотов фрезы обратимся к перемещению точки M на режущей кромке фрезы (гравера) в процессе образования лунки в материале при УМФ (рис. 5).

Точка M лежит в плоскости перпендикулярной оси Z .

$$\rho = k\varphi = a\varphi/2\pi,$$

где ρ – радиус спирали, k – смещение точки M конца вектора ρ при его повороте на 2π радиан, т.е. $k = a/2\pi$ (a – шаг спирали (приращение при его повороте на 2π радиан).

Путь точки M по спирали равен длине дуги

$$L = \frac{k}{2} \left[\varphi \sqrt{1 + \varphi^2} + \ln \left(\varphi + \sqrt{1 + \varphi^2} \right) \right].$$

Число оборотов, необходимое для получения полно-профильной лунки

$$N = (r/S_z) \operatorname{tg}(\alpha/2) + 1/b$$

$$\text{или } N = \Delta h/S_z + 1/b,$$

где r – радиус лунки, α – угол при вершине фрезы, b – число режущих кромок.

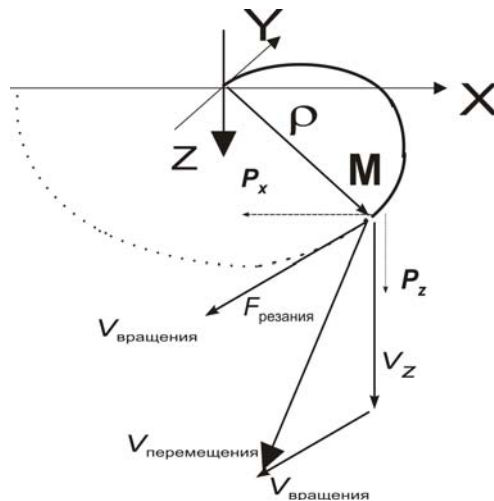


Рис. 5. Перемещение точки «М» по боковой конической поверхности формируемой лунки

дрения порядка 2–5 мс. Тогда порядка $n = 30000$ об/мин. [2]

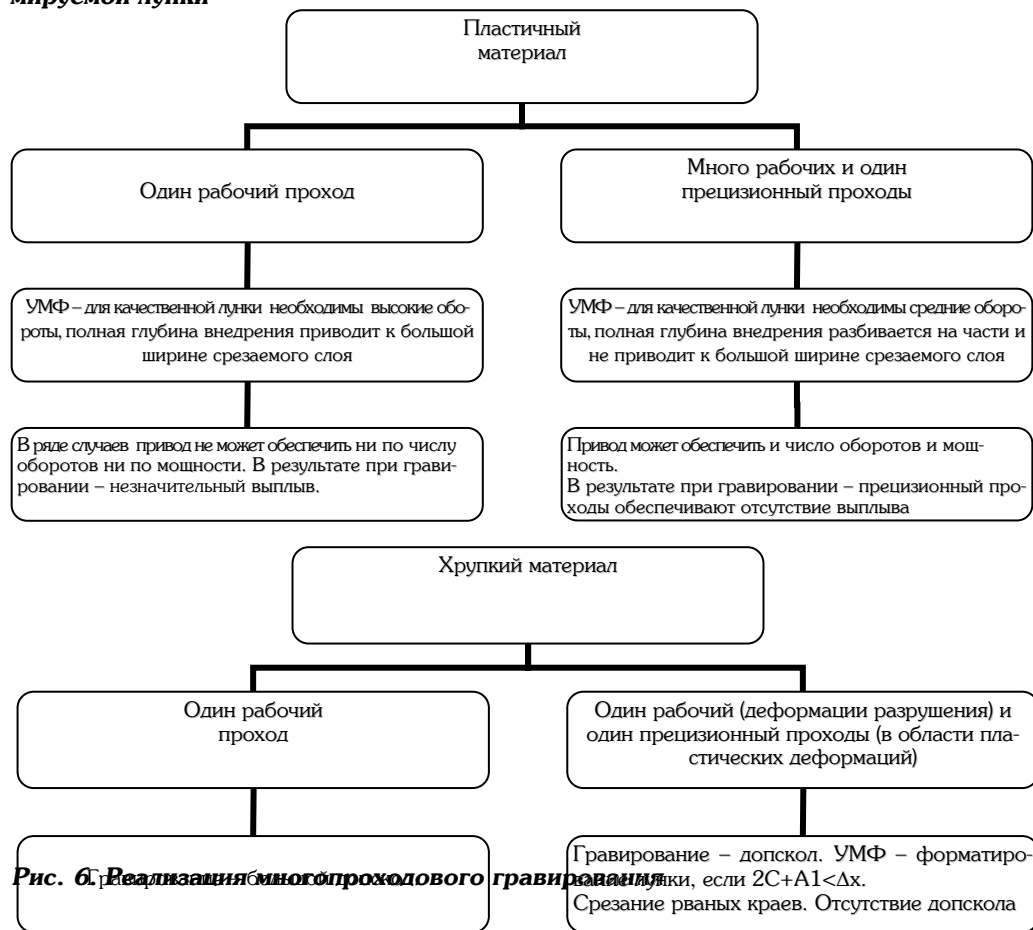


Рис. 6. Реализация многопроходового гравирования

Тогда, зная время внедрения на заданную глубину (из модели колебательного звена «долбляк на пружине»), можно рассчитать число оборотов шпинделя:

$$n = N / t_{вн}$$

В среднем частота ЭМП (она указывается в диалоговом окне программы Grave, управляющей станком) по рекомендациям [4] варьируется в пределах 70–75 Гц. Глубина внедрения 0,1 мм, зазор в среднем 0,20 ... 0,30 мм. Этому соответствует время вне-

При правильном назначении n об/мин для хрупких материалов гравирование в два или более прохода позволяет дополнительно повысить качество получаемых лунок, а следовательно и все гравирование поскольку тогда оптические плотности оригинала и изображения будут наиболее приближены. Искажение в виде дополнительного скола и неровного профиля лунки будет отсутствовать. То же при гравировании пластичных материалов отсутствие выплыва приведет к отсутствию искажений оптической плотности.

Схематично особенности технологии гравирования материалов в несколько проходов можно представить в виде (рис. 6).

Итак, повысить качество станочного растрового гравирования возможно путем введения УМФ, совмещающего поступательное и вращательное движение инструмента. Данная технология убирает выплыв при обработке пластичных материалов и дополнительный скол при гравировании хрупких.

Дополнительно повысить качество лунок на изделиях требующих особо точного исполнения (клише в полиграфии, в т.ч. для денег) позволяет совмещение рабочего и чистового (прецизионного) гравирования. Так предлагается делать рабочий проход за одно или несколько внедрений инструмента, а чистовой однократным внедрением на глубину действия пластических деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миков И.Н., Науменко И.А. Теоретические аспекты технологии гравирования изображений на материалах методом динамического микрофрезерования. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, № 6., 2005. – с. 288 – 294.
2. Миков И.Н., Морозов В.И. Технология автоматизированного гравирования художественных изображений. – М.: Изд-во «Мир горной книги», 2007. – 346 с.
3. Протасов Ю.И. Теоретические основы механического разрушения горных пород. – М.: НЕДРА, 1985. – 239 с.
4. Гравировально-фрезерный станок «График ЗК/ЗКМ» // Руководство по эксплуатации. – М.: НПФ ООО «САУНО», 1997, 2003. **ГЛАС**

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



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ			
ГУРИЕВА	Повышение полноты использова-	25.00.22	к.т.н.

Евгения Владимировна	ния недр интенсификацией выпуска при добыче потерянных руд	05.05.06	
----------------------	--	----------	--