

УДК 621.923.042

П.И. Бологов, вед. инж.**А.П. Максименко, вед. инж.****О.О. Пасичный, н.с.****В.Н. Скок, вед. инж.****М.Н. Шейко, к.т.н., с.н.с.***Институт сверхтвердых материалов
им. В.Н. Бакуля НАН Украины*

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ИСПЫТАНИЯ АЛМАЗНЫХ ФАСОННЫХ РОЛИКОВ МЕТОДОМ КВАЗИВРЕЗНОЙ ПРАВКИ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ

Предлагается методика испытаний сложнофасонных роликов по схеме так называемой квазиврезной правки, имитирующей истинно врезную и не требующей дорогостоящего специального оборудования, а позволяющей использовать универсальное. Названная схема получает обоснование как в плане самосогласованности теоретико-экспериментальных подходов к изучению врезной правки, так и в плане эффективности использования абразивного материала в модельных экспериментах. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что алмазные зерна выпуклого участка профиля большой кривизны испытывают большие силовые (до 30 раз), температурные (до 60 %) нагрузки по сравнению с прямым участком. Интенсивность его износа может возрасти до 70 раз.

Введение. В процессе отработки конструкции и технологии нанесения алмазно-абразивного слоя правящих роликов возникает необходимость испытаний лабораторных образцов инструмента в условиях, максимально приближенных к производственным. Однако оборудование, реализующее врезную схему правки фасонными роликами, недопустимо дорого и громоздко для эксплуатации в лабораторных условиях. Кроме того, высоты стандартных абразивных кругов $\varnothing 600$ в большинстве случаев превышают ширину рабочей части экспериментальных роликов, что создает значительные неудобства, так как обуславливает необходимость в дополнительном периодическом подрезании круга.

В настоящей работе предлагается методика испытаний роликов, не требующая дорогостоящего специального оборудования, а позволяющая использовать универсальное. Исследуются силы правки на различных режимах резания, проводится сравнение их с расчетными данными [1–5]. Кроме того, исследуется влияние

кривизны рабочего профиля и зернистости на износ алмазного слоя ролика.

Основная часть. Для моделирования врезной правки на круглошлифовальном станке ЗБ151 был модернизирован автономный привод ролика, устанавливаемый на столе станка и обеспечивающий скорость ролика $v_p = 16,4$ м/с, что при скорости круга $v_k = 29$ м/с соответствовало режимам правки, применяемым в производственных условиях. Экспериментальный ролик $\varnothing 140$ (рис. 1) имел рабочий профиль с цилиндрической калибрующей средней частью и профильные участки, содержащие фрагменты различной кривизны, по обоим краям. Профильные участки имели занижение $\Delta t = 20$ мкм по отношению к калибровочной части. Ролику по отношению к кругу, помимо вращения, сообщалась осевая возвратно-поступательная подача S с подачей на глубину t_0 на каждый ход стола. Осевая подача S выбиралась из условия

$$S > L, \quad (1)$$

где L – длина профильного участка, что обеспечивало независимый съем абразива каждым фрагментом этого участка, как это происходит при врезной правке без осевых подач. В этом суть *квазиврезной* правки, имитирующей врезную. Калибрующий участок, идущий следом за профильным, выбирает на круге многозаходную резьбу, образуемую профильным участком. При обратной осевой подаче вступает в работу профильный участок на другом краю ролика, его подача на глубину меньше (на высоту занижения) фактической подачи t_{ϕ} , установившейся для калибровочного участка. Доля абразивного круга, диспергированная профильным участком и приходящаяся на единицу его длины, составляет:

$$\eta = \left(1 - \frac{\Delta t}{t_0}\right) \cdot \frac{1}{S}. \quad (2)$$

Для сравнения – доля круга, приходящаяся на единицу длины испытываемого участка ролика, при истинно врезной правке составляет $1/H_{\text{эд}}$, где $H_{\text{эд}}$ – высота круга, что меньше чем (2). С учетом того, что каждый из профильных участков использует половину круга, эффективность использования абразивного материала при испытании ролика на износ при квазиврезной правке выше, чем при истинно врезной в $\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\Delta t}{t_0}\right) \cdot \frac{H_{\text{эд}}}{S}$ раз. Подставляя значения $\Delta t =$

$20 \cdot 10^{-3}$

мм,

$t_0 = 25 \cdot 10^{-3}$ мм, $H_{\text{од.}}$ = 63 мм, $S = 1,38$ мм, получаем преимущество в 4,6 раза, то есть в 4,6 раза более эффективно используется диспергируемый круг.

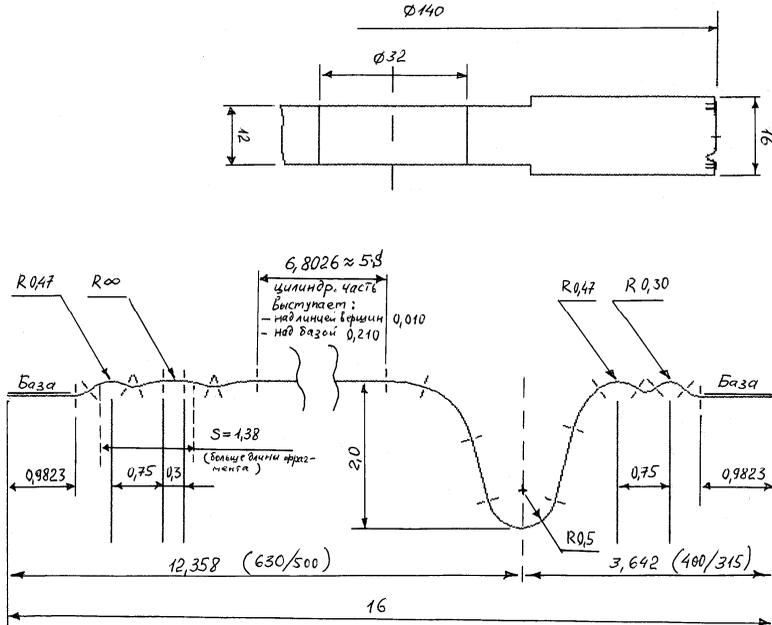


Рис. 1. Экспериментальный ролик для квазиврезной правки

В первой серии экспериментов для регистрации сил резания правился круг $\varnothing 600$ марки 24A25CM1K5 при указанных скоростях ролика и круга и подачах $t_0 = 0,020-0,030$ мм, $S = 1,38$ мм ($U = 26$ мм/с). Кроме того, направление вращения ролика изменялось, осуществляя встречную ($q = -1,77$, где $q = v_e/v_d$) и попутную ($q = +1,77$) правку. Условное напряжение резания-царапания абразива круга указанной марки составляло [6]:

$$\sigma_{\text{од.}} = 237(0,2 \exp(-0,173(v_{\text{од.}} - 15))) + 0,8) \cdot \dot{I} / \dot{i}^2,$$

где $v_{\text{од.}}$ – скорость резания, м/с. Характеристики рабочего слоя калибрующего пояска, вносящего исключительный вклад в суммарную силу правки, были следующие: алмазный порошок

АС125Т 630/500, $n_c = 2,4 \text{ мм}^{-2}$, $\alpha = 1,587$, $\beta = 0,5$,
 $h_{nc} = 0-0,02$ [7].

Силы правки роликами были исследованы в работах [8, 9]. К сожалению, во-первых, экспериментальные ролики были изготовлены методом гальваностегии, а не пластики; во-вторых, скорость ролика в этих работах не превышала 5–9 м/с, что не совсем соответствовало производственным условиям; в-третьих, результаты замеров были представлены отнесенными к величине $F_i = S_{\text{юва}} \cdot S_{\text{ит}}$, названной «суммарной площадью среза», но таковой на самом деле не являющейся. Из-за этого результаты не согласуются с соответствующими значениями условных напряжений резания–царапания [6]. В нашем же случае, как показано ниже, экспериментальные значения сил соответствуют расчетным и полученным с использованием данных условных напряжений.

Идея регистрации сил правки заключалась в регистрации падения частоты вращения вала асинхронного электродвигателя автономного привода ролика (посредством плоскоременной однозвенной передачи). В основу методики регистрации текущей частоты вращения вала приводного двигателя положены принципы работы оптического тахометра. На выходном валу двигателя была закреплена четырехлопастная крыльчатка, которая при вращении двигателя периодически прерывала своим лопастями световой луч в рабочей зоне щелевого инфракрасного оптического датчика. Активным элементом у используемого датчика являлась пара светодиод–оптодиод. С целью увеличения мобильности проводимых экспериментов пульсирующий сигнал со светодиода подавался на линейный вход MP3-проигрывателя и записывался с частотой дискретизации сигнала 44100 Гц. Полученные mp3-файлы преобразовывались в стандартный WAV-файл, и дальнейшая их обработка происходила на персональном компьютере в среде Mathcad (программной среде для выполнения математических, инженерных и научных расчётов).

Результаты обработки экспериментальных данных следующие. При встречной правке зафиксировано падение частоты вращения вала двигателя от частоты вращения на холостом ходу (с присоединенным приводом) до рабочей частоты (при максимальных установившихся силах резания): $|\Delta n| = 994 - 990 = 4 \text{ об/мин}$. Соответствующее

приращение мощности на валу $\Delta N = 20 \frac{\text{Вт}}{\text{об/мин}} \cdot 4 \text{ об/мин} = 80 \text{ Вт}$ и

мощность резания $N_p = 0,7 \cdot 80 \text{ Вт} = 56 \text{ Вт}$.

При попутной правке приращение частоты вращения вала двигателя от холостого хода до рабочей частоты $\Delta n = 998 - 993 = 5$ об/мин, падение мощности на валу

$$|\Delta N| = 20 \frac{\text{Вт}}{\text{об/мин}} \cdot 5 \text{ об/мин} = 100 \text{ Вт}, \text{ мощность резания (по (7))}$$

$$N_p = 100 \text{ Вт} / 0,3 = 333 \text{ Вт}.$$

Кроме того, экспериментально установлено: наступление установившегося режима, когда силы резания достигают максимального значения, происходит не сразу – только за три касания инструмента (3 продольных прохода). Теоретические представления о квазиврезной правке как частном случае алмазно-абразивной обработки базируются на механико-статистическом подходе к рассмотрению данных процессов. При правке по такой схеме механизм накопления неудаленного припуска за ряд последовательных осевых проходов, по существу, такой же, как и при врезной правке алмазными брусками [10]. В нашем случае, при наличии осевой подачи S , длина H_p разбивается на $\text{int}(H_p/S)$ участков, имеющих различную степень нагрузки. Аналогично [10], условия работы каждого определяются параметрами $j = 1; m = 0, 1, \dots, m_{\text{max}}$, где $m_{\text{max}} = \text{int}(H_p/S) - 1$. В нашем случае $m_{\text{max}} = 4$. За каждый k -ый проход любая точка заправляемого круга подвергается контактированию со всеми участками, причем съем за проход $\frac{dT^k}{dk}$ и фактическая подача на глубину t_ϕ [10], как показывают расчеты, стабилизируются лишь к 3-му проходу (табл. 1).

Таблица 1

Съем припуска за проход и фактическая подача на глубину

Количество проходов k	Правка (подача на глубину $t_0 = 0,025$ мм)			
	встречная ($q = -1,77$)		попутная ($q = 1,77$)	
	съем за проход $\frac{dT^k}{dk}$, мм	фактическая подача на глубину t_ϕ , мм	съем за проход $\frac{dT^k}{dk}$, мм	фактическая подача на глубину t_ϕ , мм
1	$2,29 \times 10^{-2}$	$2,50 \times 10^{-3}$	$1,79 \times 10^{-2}$	$2,50 \times 10^{-3}$
2	$2,37 \times 10^{-2}$	$2,58 \times 10^{-3}$	$2,28 \times 10^{-2}$	$3,00 \times 10^{-3}$
3	$2,50 \times 10^{-2}$	$2,70 \times 10^{-3}$	$2,50 \times 10^{-2}$	$3,22 \times 10^{-3}$
4	$2,50 \times 10^{-2}$	$2,70 \times 10^{-3}$	$2,50 \times 10^{-2}$	$3,22 \times 10^{-3}$

...
-----	-----	-----	-----	-----

В соответствии с установившимся значением t_{ϕ} рассчитывалась нагрузка каждого из 5 участков ролика (табл. 2). Суммируя тангенциальные составляющие сил резания на всех участках, получены искомые силы правки.

Соответствующие мощности встречной и попутной правки $N_p = 4,16 \text{ Н} \cdot 16,4 \text{ м/с} = 68 \text{ Вт}$ и $N_p = 20,6 \text{ Н} \cdot 16,4 \text{ м/с} = 338 \text{ Вт}$.

Указанные цифры свидетельствуют: расчеты, базирующиеся на механико-статистическом подходе к описанию алмазно-абразивной обработки, хорошо согласуются с экспериментальными данными. (Напомним, экспериментально полученные значения мощностей правки по двум схемам – 56 и 333 Вт соответственно).

Выводы. Таким образом, предлагаемая схема квазиврезной правки получает обоснование в плане самосогласованности теоретико-экспериментальных подходов к изучению врезной правки и в плане эффективности использования стандартного оборудования и абразивного материала в модельных экспериментах.

Таблица 2

Распределение силы резания по участкам обработки

j	m	Встречная правка		Попутная правка	
		тангенциальная составляющая силы правки		тангенциальная составляющая сила правки	
		на единицу ширины контакта $\frac{1}{b} T_m$ $\frac{\text{Н}}{\text{мм}}$	на m-ом участке $T_m, \text{ Н}$	на единицу ширины контакта $\frac{1}{b} T_m,$ $\frac{\text{Н}}{\text{мм}}$	на m-ом участке $T_m, \text{ Н}$
1	0	2,120	2,93	6,45	8,90
	1	0,531	0,733	3,75	5,18
	2	0,202	0,279	2,28	3,15
	3	0,102	0,141	1,464	2,02
	4	0,0614	0,085	0,986	1,36

$$\sum 4,16$$

$$P_z = 4,16 \text{ Ї}$$

$$\sum 20,6$$

$$P_z = 20,6 \text{ Ї}$$

Во второй серии экспериментов проводились стойкостные испытания правящего ролика в тех же условиях. Предварительные расчеты характеристик правки [11] приведены в таблице 3. Данные указывают на незначительный линейный износ рабочей поверхности правящего инструмента.

В подтверждение этому, диспергировав $1,98 \cdot 10^7$ мм³ абразивного материала марки 24A25CM1K5, не было обнаружено ни характерных помутнений поверхности алмазных зерен, свидетельствующих об их износе, ни изменений режущей способности инструмента. Непосредственное измерение линейного износа по пластинчатому свидетелю не выявил такого с точностью не хуже ± 2 мкм . Было решено продолжить испытания в более жестких условиях – при тех же режимах, но с абразивным кругом марки 24A25CT2K5.

Правка производилась при встречном резании ($q = -1,77$), периодически контролировалось состояние целостности рабочей поверхности ролика и нарезался плоский свидетель. Профиль ролика содержал горизонтальные участки, не участвующие в основной работе по износу, они служили базой для замеров линейного износа контролируемых участков. Было диспергировано $2,27 \times 10^7$ мм³ абразивного материала (два круга в диапазоне от $\varnothing 600$ до $\varnothing 362$). Сравнивался линейный износ следующих участков (рис. 1). Первый – калибрующий поясок прямого профиля (алмазный порошок AC125T 630/500, радиус кривизны $R = \infty$). Этот участок удалял львиную долю полного припуска – более 86 %. Второй – профильный участок с занижением в 20 мкм и содержащий вершины $R0,47$ и $R = \infty$ (AC125T 630/500). Третий – с таким же занижением в 20 мкм и содержащий $R0,47$ и $R0,30$ (AC125T 400/315).

Таблица 3

Показатели правки правящим роликом

Параметр	При $q = -1,77/+1,77$			
	AC125T 630/500		AC125T 400/315	
	$R = \infty$	$R = 0,47$	$R = 0,47$	$R = 0,3$
\bar{X} , мкм	5,06/7,94	5,12/8,00	5,00/7,87	5,04/7,92
\bar{T} , Н	0,085/0,228	0,149/0,399	0,087/0,237	0,116/0,314
$\bar{\theta}$, °С	221/113	224/113	274/140	277/141
$G, \frac{\text{м}^3}{\text{мм}^2 \cdot \text{мм}}$	$1,36 \cdot 10^{-10}/$ $1,25 \cdot 10^{-10}$	$2,44 \cdot 10^{-10}/$ $2,23 \cdot 10^{-10}$	$1,39 \cdot 10^{-10}/$ $1,29 \cdot 10^{-10}$	$1,88 \cdot 10^{-10}/$ $1,73 \cdot 10^{-10}$

$\delta, \frac{\text{ì}}{\text{èñàíèèà}}$	$6,54 \cdot 10^{-10}/$ $6,01 \cdot 10^{-10}$	$1,17 \cdot 10^{-9}/$ $1,07 \cdot 10^{-9}$	$1,66 \cdot 10^{-9}/$ $1,54 \cdot 10^{-9}$	$2,24 \cdot 10^{-9}/$ $2,07 \cdot 10^{-9}$
$\delta, \text{отн. ед.}$	1,09/1	1,95/1,78	2,76/2,56	3,73/3,44

Результаты испытаний показали следующее. Скорости линейного износа для всех трех участков быстро стабилизировались и в течение времени диспергирования последних 2/3 объема абразивных кругов оставались постоянными. При этом вершины на профильных участках достаточно быстро притупились, что не позволило точно определить абсолютную скорость износа криволинейных участков. Поэтому было бы более корректно говорить об относительных скоростях износа криволинейных участков с различной кривизной профиля или зернистостью алмазного порошка.

Пересчет линейного износа на 1 касание (на оборот ролика) дал следующие результаты. Участок 630/500, $R_{0,47}$ изнашивался со скоростью $15,3 \cdot 10^{-8}$ мм/касание, участок 400/315, $R_{0,47}$ – $22,0 \cdot 10^{-8}$ мм/касание (соотношение 1:1,44). Участок калибрующего пояска 630/500, $R = \infty$ изнашивался со скоростью $19,4 \cdot 10^{-8}$ мм/касание, а участок с занижением 630/500, $R = \infty$ – со скоростью $14,4 \cdot 10^{-8}$ мм/касание (соотношение 1,35:1). Для участка с зернистостью 400/315 износ вершин $R_{0,47}$ и $R_{0,30}$ сравнивался не по абсолютной величине, а по первой производной зависимости «износ – объем диспергированного материала» в точке, близкой к началу износа. Вершина $R_{0,47}$ изнашивалась со скоростью $0,87 \cdot 10^{-6}$ мкм/мм³, а вершина $R_{0,30}$ – со скоростью $1,14 \cdot 10^{-6}$ мкм/мм³ (соотношение 1:1,31). Обобщение полученных экспериментальных данных и сравнение их с теоретическими приведено в таблице 4.

Вышеприведенные данные свидетельствуют:

- во-первых, размерная стойкость правящего инструмента нелинейно зависит от твердости заправляемых кругов, что связано с влиянием как силового, так и температурного факторов [11];

- во-вторых, что, впрочем, очевидно, уменьшение радиуса кривизны профильного участка правящего инструмента снижает его размерную стойкость;

- в-третьих, что отнюдь не очевидно, уменьшение зернистости снижает размерную стойкость инструмента, не смотря на то, что удельное количество зерен на рабочей поверхности в этом случае выше;

– в-четвертых, неплохое соответствие экспериментальных и расчетных значений указывает на конструктивную роль механико-статистические представления о процессах, сопровождающих алмазно-абразивную обработку [1–5].

Таблица 4

Сравнение экспериментальных данных
обработки с теоретическими

Изменяемый фактор	Относительное изменение скорости линейного износа участка	
	экспери- ментальные данные	теоретические данные при исходных табл. 3 (круг 24A25CM1K5) и круг 24A25CT2K5
Уменьшение зернистости участка R0,47 с 630/500 до 400/315	1 : 1,44	1 : 1,48–1,84
Уменьшение радиуса вершины участка 400/315 с R0,47 до R0,30	1 : 1,31	1 : 1,30
Увеличение припуска под съем для участка 630/500, $R = \infty$ на 20 мкм	1 : 1,35	1 : 1,29–1,84
	Абсолютное значение скорости линейного износа калибрующего пояска, мм/касание	
	экспери ментальные данные	теоретические данные при исходных: круг 24A25CT2K5 и учет износа пояска
	$19,4 \cdot 10^{-8}$	$(4,91 - 35,9) \cdot 10^{-8}$

ЛИТЕРАТУРА:

1. Шейко М.Н. Динамика съема припуска при шлифовании периферией круга на стадии врезания и выхаживания: фактор инструмента и режима обработки / М.Н. Шейко // Сверхтвердые материалы. – 1994. – № 4. – С. 52–57.

2. *Шейко М.Н.* К вопросу о распределении параметров срезов при шлифовании периферией круга: фактор инструмента и режима обработки: Сообщение 1 / *М.Н. Шейко* // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 3. — С. 55–64, 70.
3. *Шейко М.Н.* К вопросу о распределении параметров срезов при шлифовании периферией круга: фактор инструмента и режима обработки: Сообщение 2 / *М.Н. Шейко* // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 5. – С. 51–61.
4. *Шейко М.Н.* Сила шлифования в свете теоретико-вероятностных представлений о процессе / *М.Н. Шейко* // Современные процессы механической обработки и качество поверхностей деталей машин : сб. науч. тр. – К. : ИСМ НАН Украины, 1998. – 198 с. – С. 172–175.
5. *Шейко М.Н.* Компьютерная модель шлифования как стохастического процесса / *М.Н. Шейко, О.В. Химач, А.К. Молодид* // 5-я ежегод. междунар. конф. «Новая компьютерная технология в промышленности, энергетике, образовании», Алушта, 21–23 сентября 1999 : сб. докл. – К., 1999. – С. 47–48.
6. *Полупан Б.И.* Силы резания при правке абразивных кругов алмазным зерном / *Б.И. Полупан, А.К. Байкалов* // Синтетические алмазы. – 1978. – Вып. 3. – С. 58–61.
7. *Шейко М.Н.* Микроскопические характеристики поверхностного слоя правящего ролика и способы их измерений / *М.Н. Шейко* // Редкол. журн. «Сверхтвердые материалы» АН УССР, АН Украины. – К., 1991. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ 18.07.91, № 3074–В91.
8. *Байкалов А.К.* Усилия при правке шлифовальных кругов алмазными роликами / *А.К. Байкалов, Н.П. Дубовик* // Синтетические алмазы. – 1971. – Вып. 3. – С. 14–18.
9. *Байкалов А.К.* Усилия при врезной правке абразивных кругов / *А.К. Байкалов, В.В. Коломиец, Б.И. Полупан.* // Синтетические алмазы. – 1975. – Вып. 3. – С. 17–20.
10. *Шейко М.Н.* Врезная правка алмазными брусками в свете механико-статистических представлений об абразивно-алмазной обработке. Установившаяся фактическая подача на глубину при многократных проходах / *М.Н. Шейко, А.П. Максименко* // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 4. – С. 86–91.
11. *Шейко М.Н.* Абразивный износ отдельных зерен в алмазных роликах и брусках при правке абразивных кругов и его связь с

износом алмазов в инструменте в целом / *М.Н. Шейко* // Сверхтвердые материалы. – 2007. – № 6. – С. 58–64.

БОЛОГОВ Павел Иванович – ведущий инженер Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- обработка материалов резанием;
- режущие инструменты;
- сложнопрофильная прецизионная обработка.

МАКСИМЕНКО Анатолий Петрович – ведущий инженер Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- обработка материалов резанием;
- режущие инструменты;
- сложнопрофильная прецизионная обработка.

ПАСИЧНЫЙ Олег Олегович – кандидат технических наук, научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- абразивная обработка;
- абразивный инструмент с упорядоченной структурой.

СКОК Владимир Николаевич – ведущий инженер Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- правящий инструмент;
- гальваническая обработка.

ШЕЙКО Максим Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- правящий инструмент;
- сложнопрофильная прецизионная обработка;
- технология правки правящими роликами.

Тел.: 432–95–15.

E-mail: ceramic@ism.kiev.ua

Подано 23.09.2010

