

# Исследование процессов обработки

УДК 621.923.042

**М. Н. Шейко, О. О. Пасичный, В. Н. Скок,  
П. И. Бологов** (г. Киев)

## **Квазиврезная правка абразивных кругов как экспресс-метод испытания алмазных фасонных роликов.**

### **Сообщение 1. Регистрация сил правки**

*Предложена методика испытания 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 для самосогласованности теоретико-экспериментальных подходов к изучению врезной правки, так и для эффективности использования абразивного материала в модельных экспериментах.*

**Ключевые слова:** квазиврезная правка, сила правки, мощность резания, механико-статистическое описание, алмазный фасонный ролик, абразивный круг, асинхронный двигатель, оптический тахометр.

В машиностроении особое место среди методов финишной абразивной обработки занимает врезное фасонное шлифование, которое, как правило, осуществляется профильными кругами и является одним из самых перспективных видов высокопроизводительной технологии изготовления деталей машин. Такие технологии особенно эффективны в крупносерийном и массовом производстве. Врезное шлифование профильными кругами из обычных абразивов с использованием алмазных правящих роликов, работающих в условиях периодической или непрерывной правки, обеспечивает обработку с минимальным припуском не только фасонных, но и координатно-связанных между собой поверхностей. Таким образом, врезное фасонное шлифование можно характеризовать как малоотходную энерго- и ресурсосберегающую технологию [1].

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 экс-

плуатации в лабораторных условиях. Кроме того, высота стандартных абразивных кругов  $\varnothing 600$  в большинстве случаев превышает ширину рабочей части экспериментальных роликов, что создает значительные неудобства, так как обуславливает необходимость в дополнительном периодическом подрезании круга.

В настоящей работе предложена методика испытания роликов, не требующая дорогостоящего специального оборудования, а позволяющая использовать универсальное. Целью исследования, помимо апробации указанной методики, являлось, прежде всего, исследование влияния кривизны рабочего профиля и зернистости алмаза на износ алмазного слоя ролика. Его результаты будут отражены в сообщении 2. В настоящем сообщении обоснована целесообразность предлагаемой методики, предложен новый метод регистрации сил правки и приведены результаты их исследования на различных режимах резания, а также сравнение их с расчетными данными [2—6].

Для моделирования врезной правки на круглошлифовальном станке 3Б151 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  $\Delta t = 10$  мкм по отношению к калибровочной части. Ролику по отношению к кругу, помимо вращения, сообщалась осевая возвратно-поступательная подача  $S$  на глубину  $t_0$  на каждый ход стола. Осевую подачу  $S$  выбирали 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  $t_\phi$ , установившейся для калибровочного участка. Доля абразивного круга, диспергированная профильным участком и приходящаяся на единицу его длины, составляет

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

Для сравнения — доля круга, приходящаяся на единицу длины испытываемого участка ролика, при истинно врезной правке составляет  $1/H_{кр}$ , где  $H_{кр}$  — 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  $\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\Delta t}{t_0}\right) \frac{H_{кр}}{S}$  раз. Подставляя значения

$\Delta t = 10 \cdot 10^{-3}$  мм,  $t_0 = 20 \cdot 10^{-3}$  мм,  $H_{кр} = 63$  мм,  $S = 1,38$  мм, получаем преимущество в 11,4 раза, т. е. в 11,4 раза более эффективно используется диспергируемый круг.



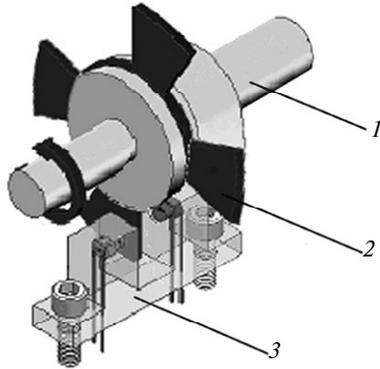


Рис. 2. Схема оптического тахометра: 1 — выходной вал двигателя; 2 — крыльчатка; 3 — оптический датчик (оптрон).

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (3)$$

где  $M_k$  — максимальный крутящий момент двигателя;  $s_k$  — критическое скольжение. Откуда зависимость мощности от скольжения

$$N = M\omega = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \omega_0 (1-s),$$

где  $\omega$  — угловая скорость, а  $\omega_0$  — синхронная угловая скорость двигателя. При малых абсолютных значениях  $s$  меньших значения номинального скольжения  $s_{ном}$  мощность линейна скольжению:

$$N = \frac{2M_k \omega_0}{s_k} s. \quad (4)$$

Поэтому легко рассчитать мощность, снимаемую с вала (расходуемую на резание и потери в приводе ролика) и приходящуюся на единицу падения частоты вращения двигателя  $n$ ,  $\text{мин}^{-1}$ . С учетом  $s = 1 - n/n_0$ ,  $n_0 = 60\omega_0/2\pi$  имеем

$$\left| \frac{\Delta N}{\Delta n} \right| = \frac{\Delta N}{\Delta s} \left| \frac{\Delta s}{\Delta n} \right| = \frac{2M_k \omega_0}{s_k} \cdot \frac{1}{n_0} = \frac{\pi}{15} \cdot \frac{M_k}{s_k}.$$

Подставляя в последнем выражении  $M_k = \lambda M_{ном}$  и  $s_k = (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) s_{ном}$  [11], где  $M_{ном}$  и  $s_{ном}$  — номинальный момент и скольжение двигателя соответственно, окончательно имеем

$$\left| \frac{\Delta N}{\Delta n} \right| = \frac{\pi}{15} \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2}}} \frac{M_{ном}}{s_{ном}}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{об/мин}}. \quad (5)$$

В нашем случае номинальная мощность и обороты двигателя  $N_{ном} = 1,1 \text{ кВт}$  и  $n_{ном} = 940 \text{ об/мин}$  соответственно, чему отвечают значения  $M_{ном} = \frac{60 \cdot 1100}{2\pi \cdot 940} = 11,17 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и  $s_{ном} = 1 - \frac{940}{1000} = 0,06$ . Кратность максимального момента для данного класса двигателей лежит в пределах  $\lambda = 2,3—3,4$ . Для этих значений получаем  $\left| \frac{\Delta N}{\Delta n} \right| = 19,9—20,5 \frac{\text{Вт}}{\text{об/мин}}$  и принимаем

$$20 \frac{\text{Вт}}{\text{об/мин}}.$$

Силовые и энергетические расчеты плоскоременной передачи производили в соответствии с [12]. Начальное натяжение ремня составляло  $2F_0 = 200 \text{ Н}$ . Как показано в описательной части результатов экспериментов, при встречной правке частота вращения вала двигателя со шкивом  $\varnothing 135$  составляла  $n =$

990 об/мин ( $s = 10^{-2}$ ), что соответствует моменту на валу  $M \approx 1,9$  Нм и окружной силе на шкиве  $F_t \approx 28$  Н. Откуда коэффициент тяги

$$\varphi = \frac{F_t}{2F_0} = \frac{28 \text{ Н}}{200 \text{ Н}} = 0,14.$$

В соответствии с экспериментальной зависимостью к. п. д. передачи от коэффициента тяги  $\eta = \eta(\varphi)$  [12] получаем  $\eta \approx 0,7$ .

Аналогично для попутной правки  $n = 988$  об/мин,  $s = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $M = 0,37$  Н·м,  $F_t = 5,5$  Н,  $\varphi = 0,03$ ,  $\eta \approx 0,3$ .

Существенное отличие схем нагружения привода при двух видах правки заключалось в том, что при встречной правке ведомый шкив (на валу ролика) дополнительно нагружался моментом сил правки, направленным противоположно вращению. При этом ведущая ветвь ремня получала бóльшую нагрузку, но направление передачи энергии (от шкива двигателя к шкиву ролика) не менялось. При попутной же правке шкив ролика нагружался моментом, сонаправленным с вращением, ведущая и ведомая ветви ремня менялись ролями, а направление передачи энергии менялось на противоположное — от шкива ролика к шкиву двигателя. Это означало, что при составлении мощностного баланса при встречной правке мощность резания (более точно — мощность сил резания на валу ролика)  $N_p$  меньше величины приращения мощности на валу двигателя  $\Delta N$  на величину потерь в ременной передаче:

$$N_p = \eta \Delta N. \quad (6)$$

При попутной правке, наоборот, часть мощности резания теряется в ременной передаче на пути к двигателю:

$$N_p = \frac{|\Delta N|}{\eta}, \quad (7)$$

где приращение мощности на валу — отрицательная величина.

Таким образом, выше представлена методическая часть перехода от зарегистрированной величины изменения частоты вращения двигателя к мощности резания при правке.

В основу методики регистрации текущей частоты вращения вала приводного двигателя положены принципы работы оптического тахометра. На выходном валу двигателя (рис. 2) была закреплена четырехлопастная крыльчатка, которая при вращении двигателя периодически прерывала своими лопастями световой луч в рабочей зоне щелевого инфракрасного оптического датчика. Активным элементом у используемого датчика была пара светодиода—оптодиод.

С целью увеличения мобильности проводимых экспериментов пульсирующий сигнал со светодиода подавали на линейный вход МРЗ проигрывателя и записывали с частотой дискретизации сигнала 44100 Гц. Полученные mp3 файлы преобразовывали в стандартный WAV файл и дальнейшая их обработка происходила на персональном компьютере в среде Mathcad (программной среде для выполнения математических, инженерных и научных расчетов).

Форма записанного исходного сигнала показана на рис. 3, а. Для получения целевой функции время—число оборотов необходимо определить время одного оборота  $t_{об}$ , что соответствует, исходя из количества лепестков крыльчатки, четырем всплескам напряжения (рис. 3, б). Для этого исходный сигнал

отсекали на уровне  $U_{отс}$ , а время определяли со стороны ниспадающей (правой) ветви графика как более крутой. Величина  $U_{отс}$  была определена экспериментально, при анализе записи холостого хода. Ее значение определяли из условия наиболее стабильного за время проведения эксперимента времени одного оборота  $t_{об}$ . Вычисленное таким образом значение  $U_{отс}$  оказалось равным 0,48 В.

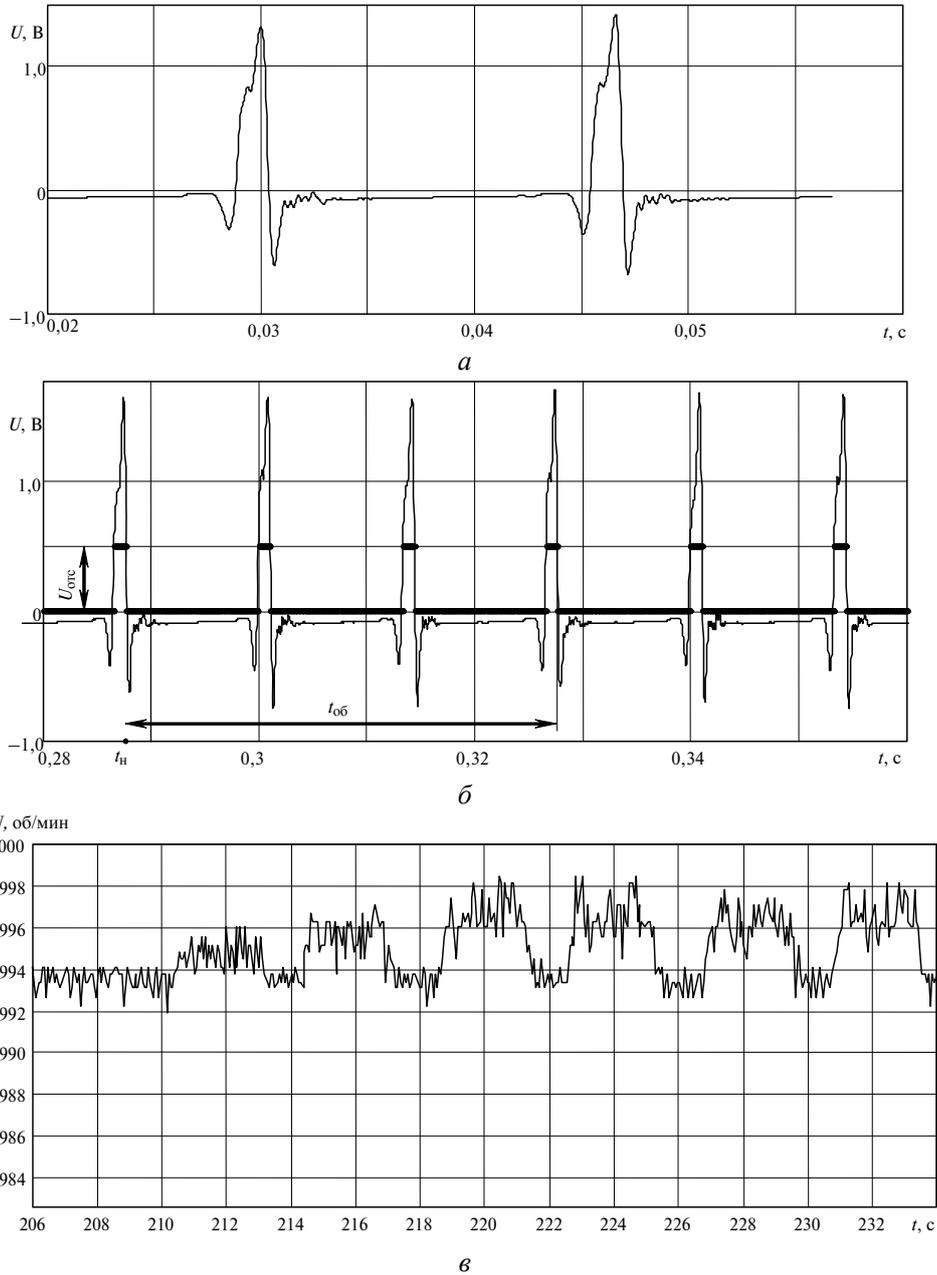


Рис. 3. Исходный сигнал со светодиода (а), схема его преобразования (б) и зависимость числа оборотов шпинделя от времени (в).

По обработанным таким образом данным строили новые таблицы данных, содержащих два поля — время одного оборота  $t_{об}$  и время начала этого обо-

рота  $t_n$  (см. рис. 3, б). Эти данные и являются дискретным представлением искомой функции время—число оборотов. Графическое изображение этой функции представлено на рис. 3, в.

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):  $|\Delta n| = 994 - 990 = 4$  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 (по формуле (6))  $N_p = 0,7 \cdot 80 \text{ Вт} = 56 \text{ Вт}$ .

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  $|\Delta N| = 20 \frac{\text{Вт}}{\text{об/мин}} \cdot 5 \text{ об/мин} = 100 \text{ Вт}$ , мощность резания (по (7))  $N_p = 100 \text{ Вт} / 0,3 = 333 \text{ Вт}$ .

Кроме того, экспериментально установлено, что наступление установившегося режима, когда силы резания достигают максимального значения, происходит не сразу, а только за три касания инструмента (три продольных прохода) (см., например, рис. 3, в).

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 [13]. В нашем случае, при наличии осевой подачи  $S$ , длина  $H_p$  разбивается на  $\text{int}(H_p/S)$  участков, имеющих различную степень нагрузки. Аналогично [13], 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  $k$ -тый проход любая точка заправляемого круга подвергается контактированию со всеми участками, причем съем за проход  $\frac{dT^k}{dk}$  и фактическая подача на глубину  $t_\phi$  [13], как показывают расчеты, стабилизируются лишь к 3-му проходу (табл. 1).

**Таблица 1. Зависимость фактических параметров обработки от числа проходов**

Число проходов $k$	Правка (подача на глубину $t_0 = 0,0025$ мм)			
	встречная ( $q = -1,77$ )		попутная ( $q = 1,77$ )	
	съем за проход $\frac{dT^k}{dk}$ , мм	фактическая подача на глубину $t_\phi$ , мм	съем за проход $\frac{dT^k}{dk}$ , мм	фактическая подача на глубину $t_\phi$ , мм
1	$2,29 \cdot 10^{-2}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \cdot 10^{-2}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$
2	$2,37 \cdot 10^{-2}$	$2,58 \cdot 10^{-3}$	$2,28 \cdot 10^{-2}$	$3,00 \cdot 10^{-3}$
3	$2,50 \cdot 10^{-2}$	$2,70 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-2}$	$3,22 \cdot 10^{-3}$
4	$2,50 \cdot 10^{-2}$	$2,70 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-2}$	$3,22 \cdot 10^{-3}$
...	...	...	...	...

В соответствии с установившимся значением  $t_{\phi}$  рассчитывали нагрузку каждого из пяти участков ролика (табл. 2). Суммируя тангенциальные составляющие сил резания на всех участках, получили искомые силы правки.

**Таблица 2. Составляющие сил резания на разных участках ролика**

$j$	$m$	Тангенциальная составляющая силы правки			
		встречной		попутной	
		на единицу ширины контакта $\frac{1}{b} T_m, \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$	на $m$ -том участке $T_m, \text{Н}$	на единицу ширины контакта $\frac{1}{b} T_m, \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$	на $m$ -том 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
			$\Sigma 4,16$		$\Sigma 20,6$
			$(P_z = 4,16\text{Н})$		$(P_z = 20,6\text{Н})$

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, что 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).

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

Как указывалось выше, в следующем сообщении будут освещены закономерности износа сложнофасонного рабочего профиля алмазных правящих роликов.

1. Шейко М. Н., Химач О. В. Технология механообработки сложнопрофильных изделий в крупносерийном и массовом производстве с использованием прецизионных правящих алмазных инструментов // Станки. Инструмент. Технологии для металлообрабатывающей отрасли: Тез. докл. Международного технического форума. — Киев, 2006.
2. Шейко М. Н. Динамика съема припуска при шлифовании периферией круга на стадии врезания и выхаживания: фактор инструмента и режима обработки // Сверхтв. материалы. — 1994. — № 4. — С. 52—57.
3. Шейко М. Н. К вопросу о распределении параметров срезов при шлифовании периферией круга: фактор инструмента и режима обработки: Сообщение 1 // Там же. — 1993. — № 3. — С. 55—64, 70.
4. Шейко М. Н. К вопросу о распределении параметров срезов при шлифовании периферией круга: фактор инструмента и режима обработки: Сообщение 2 // Там же. — 1993. — № 5. — С. 51—61.
5. Шейко М. Н. Сила шлифования в свете теоретико-вероятностных представлений о процессе // Современные процессы механической обработки и качество поверхностей деталей машин: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ НАН Украины, 1998. — С. 172—175.

6. Шейко М. Н., Химач О. В., Молодид А. К. Компьютерная модель шлифования как стохастического процесса // 5-я Ежегод. междунар. конф. “Новая компьютерная технология в промышленности, энергетике, образовании”, Алушта, 21—23 сент. 1999 г.: Сб. докл. — Киев, 1999. — С. 47—48.
7. Полупан Б. И., Байкалов А. К. Силы резания при правке абразивных кругов алмазным зерном // Синт. алмазы. — 1978. — Вып. 3. — С. 58—61.
8. Шейко М. Н. Микроскопические характеристики поверхностного слоя правящего ролика и способы их измерений / Редкол. журн. “Сверхтвердые материалы”. — Киев, 1991. — 12 с. — Деп. в ВИНТИ 18.07.91, № 3074—В91.
9. Байкалов А. К., Дубовик Н. П. Усилия при правке шлифовальных кругов алмазными роликами // Синт. алмазы. — 1971. — Вып. 3. — С. 14—18.
10. Байкалов А. К., Коломиец В. В., Полупан Б. И. Усилия при врезной правке абразивных кругов // Там же. — 1975. — Вып. 3. — С. 17—20.
11. Чиликин М. Г. Сандер А. С. Общий курс электропривода. — М.: Энергоиздат, 1981. — 576 с.
12. Основы конструирования и детали машин. Глава 14. Ременные передачи. — МГТУ им. Н. Э. Баумана. Кафедра РК-3. — [www.bmstu.ru/~rk3/okdm/lect/lect\\_14.htm](http://www.bmstu.ru/~rk3/okdm/lect/lect_14.htm)
13. Шейко М. Н., Максименко А. П. Врезная правка алмазными брусками в свете механико-статистических представлений об абразивно-алмазной обработке. Установившаяся фактическая подача на глубину при многократных проходах // Сверхтв. материалы. — 2008. — № 4. — С. 86—91.

Ин-т сверхтвердых материалов  
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 16.01.09