

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТОЧНОСТЬЮ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ДОРНОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ

В. Е. Панкратов, Р. Н. Шадура, П. А. Шацкий

В работе расчетно-аналитическим методом получена зависимость для расчета точности при ультразвуковом дорновании, достоверность которой подтверждена экспериментально.

Влияние ультразвуковых колебаний на механизм пластического деформирования металлов при различных видах обработки достаточно широко исследовано отечественными и зарубежными учеными и обобщено в работах Ф. Блахы, Е. Г. Коновалова, А. И. Маркова, В. П. Северденко и др.

Наложение ультразвука на инструмент при обработке некоторыми способами поверхностного пластического деформирования позволяет значительно повысить эффективность процесса [1,2].

При наложении ультразвука на инструмент процесс деформирования отличается от статического так как в этом случае происходит наложение динамических знакопеременных нагрузок на статические, и поглощение ультразвуковой энергии носит локальный характер, что в итоге обеспечивает облегчение пластической деформации.

Для ультразвукового дорнования (УЗД) применяли колебательную систему с незакрепленным инструментом (рисунком 1).

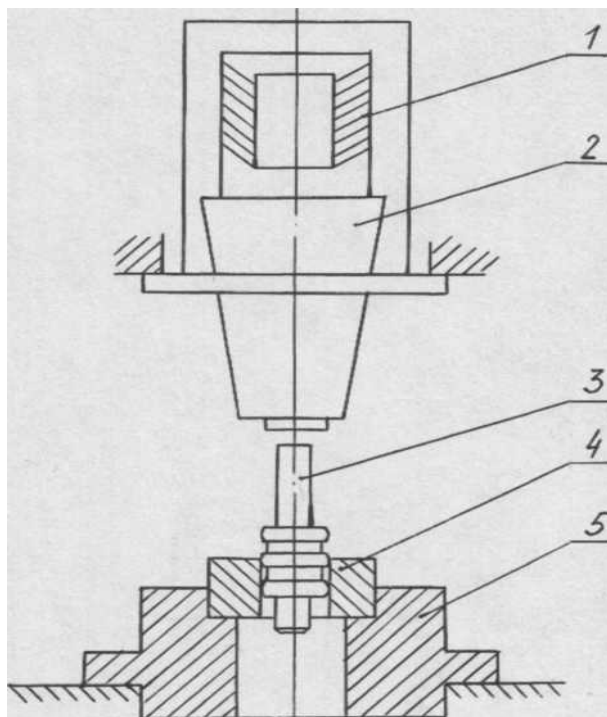


Рис.1. Схема колебательной системы для дорнования отверстий: 1 – преобразователь; 2 – волновод; 3 – дорн; 4 – деталь; 5 – опора

При реализации такой системы необходимо, чтобы масса незакрепленного инструмента, по которому наносит удары резонансный волновод, была значительно меньше массы последнего. Такая система может нагружаться сравнительно небольшими статическими силами, в противном случае она выходит из резонанса. В результате выхода системы из резонанса под нагрузкой, происходит уменьшение амплитуды на торце волновода.

Проведенные ранее исследования показали, что колебательная система, настроенная в резонанс без нагрузки, уже при усилиях деформирования порядка 2-3 кН выходит из резонанса и, как результат, уменьшается амплитуда.

Для поддержания резонансного режима колебательных систем под нагрузкой в настоящее время разработан ряд способов, которые имеют различные степени эффективности.

Резонансный режим работы колебательной системы под нагрузкой обеспечивался за счет ее тарирования по методике [3].

В связи с тем, что результаты по обеспечению резонансного режима работы колебательной системы показали возможность эффективного использования этой схемы УЗД даже при значительных нагрузках, дальнейшие исследования были посвящены подтверждению эффективности этой схемы, выражающейся в повышении точности и качества обрабатываемых поверхностей по сравнению со статическим дорнованием (СД).

Процесс дорнования осуществляется за счет периодических ударов, которые наносит по инструменту 3 боек, ввернутый в торец концентратора, и таким образом осуществляется процесс микродеформации. Процесс происходит с огромными ускорениями, что обеспечивает создание значительных динамических усилий.

Суммарная погрешность УЗД может быть определена по зависимости, полученной для СД [4]:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_m + \delta_{\chi} + \sqrt{\delta_k^2 + \delta_y^2 + 3\delta_u^2 + \delta_t^2}, \quad (1)$$

где δ_m – первичная погрешность, зависящая от механических свойств материала и исходной точности;

δ_{χ} – погрешность, зависящая от жесткости стенок деталей;

δ_k – погрешность, возникающая в результате колебания механических свойств материала деталей;

δ_y – погрешность установки заготовки для обработки;

δ_u – приращение размера в результате размерного износа инструмента, допустимого при наименьшем предельном размере;

δ_t – допуск на диаметральный размер инструмента.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования точности СД показывают, что действительная точность процесса определяется коэффициентами уточнения, не превышающими $\varepsilon = 1,4 - 1,6$. При использовании зависимости (1), следует иметь в виду, что первичные погрешности δ_m , δ_{χ} , δ_k , δ_y будут рассчитываться для УЗД по зависимостям, отличающимся от зависимостей для СД. Это связано с тем, что зависимость остаточных деформаций от натягов при УЗД имеет иной характер по сравнению со СД.

Как видно из *рисунка 2*, графическая зависимость остаточных деформаций от натягов при УЗД состоит из двух прямолинейных участков с различной крутизной. Большая крутизна первого участка объясняется сравнительно небольшими усилиями деформирования при малых натягах, и ударного импульса достаточно, чтобы обеспечить значительные деформации. При

увеличении натягов $i > i_A$ растет и сопротивление деформирования, которое даже при неизменной величине ударного импульса уменьшает его относительную величину, выполняющую работу по деформированию, что приводит к уменьшению крутизны второго участка зависимости. Это явление несколько снижает эффективность УЗД.

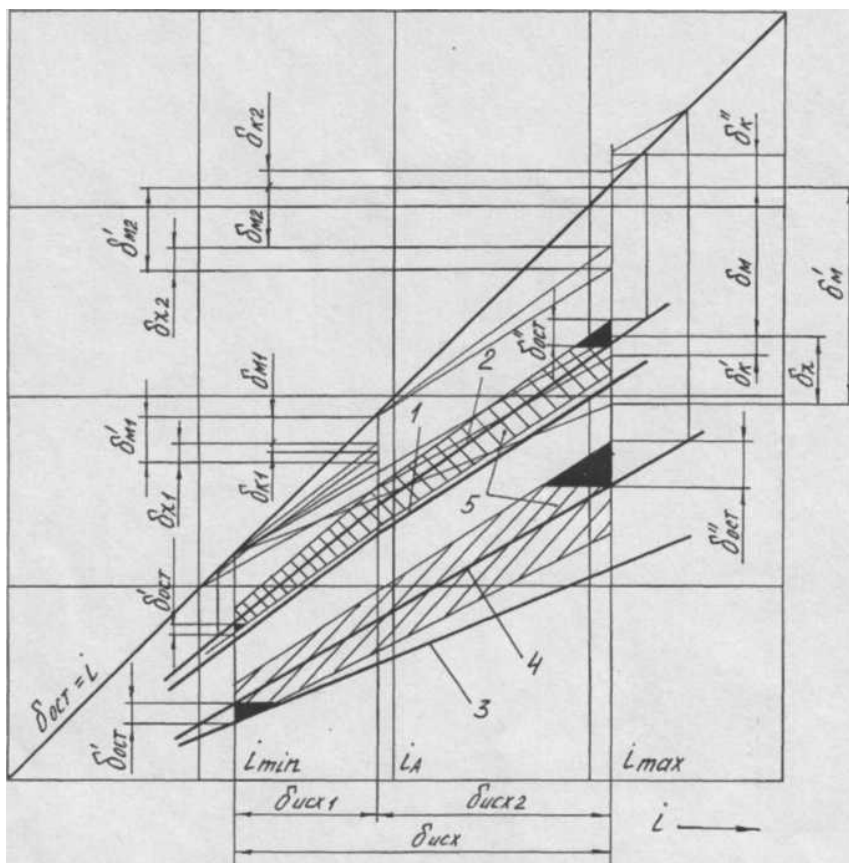


Рис. 2. Схема для расчета первичных погрешностей δ_m , δ_k и δ_χ : 1, 2, 3, 4 - зависимости остаточных деформаций от натягов для УЗД и СД при минимальной и максимальной жесткостях втулок; 5 – поле рассеяния действительных значений остаточных деформаций

Формирование первичных погрешностей δ_m , δ_k и δ_χ при УЗД и СД хорошо видно из рисунка 2.

Первичная погрешность δ_m^{UZD} при УЗД состоит из двух частей

$$\delta_m^{UZD} = \delta_{m1} + \delta_{m2}, (2)$$

Составляющие δ_{m1} и δ_{m2} будут определяться зависимостями:

$$\delta_{m1} = \delta_{исх1}(1 - C_1), (3)$$

$$\delta_{m2} = \delta_{исх2}(1 - C_2), (4)$$

Подставим (3) и (4) в (2) и введем коэффициент $K = \frac{\delta_{исх1}}{\delta_{исх}}$.

Тогда получим

$$\delta_m^{UZD} = K\delta_{исх}(1 - C_1) + (1 - K)\delta_{исх}(1 - C_2) = \delta_{исх}(1 - KC_1 - (1 - K)C_2), (5)$$

Приняв $K_M^{VЗД} = 1 - KC_1 - (1 - K)C_2$ получим

$$\delta_M^{VЗД} = \delta_{исх} \cdot K_M^{VЗД}, \quad (6)$$

Первичная погрешность $\delta_K^{VЗД}$ при УЗД также состоит из двух частей (рисунок 2):

$$\delta_K^{VЗД} = \delta_{\kappa 1} + \delta_{\kappa 2}, \quad (7)$$

где $\delta_{\kappa 1}$ и $\delta_{\kappa 2}$ определяются зависимостями:

$$\delta_{\kappa 1} = \frac{(1 - C_1)\delta'_{осм}}{C_1}, \quad (8)$$

$$\delta_{\kappa 2} = \frac{(1 - C_2)\delta''_{осм}}{C_2}, \quad (9)$$

Подставив (8) и (9) в (7), получим

$$\delta_K^{VЗД} = \frac{(1 - C_1)\delta'_{осм}}{C_1} + \frac{(1 - C_2)\delta''_{осм}}{C_2} = K_{\kappa 1}^{VЗД} \delta'_{осм} + K_{\kappa 2}^{VЗД} \delta''_{осм}, \quad (10)$$

$$\text{где } K_{\kappa 1}^{VЗД} = \frac{1 - C_1}{C_1}; K_{\kappa 2}^{VЗД} = \frac{1 - C_2}{C_2}.$$

Первичная погрешность $\delta_\chi^{VЗД}$, при УЗД, как видно из рис. 2, определяется следующим образом:

$$\delta_\chi^{VЗД} = \delta_{\chi 1} + \delta_{\chi 2}, \quad (11)$$

$$\text{где } \delta_{\chi 1} = K\delta_{исх}(C_1 - C'_1); \delta_{\chi 2} = (1 - K)(C_2 - C'_2)\delta_{исх}.$$

Тогда

$$\delta_\chi^{VЗД} = \delta_{исх}K(C_1 - C'_1) + (1 - K)(C_2 - C'_2), \quad (12)$$

или

$$\delta_\chi^{VЗД} = K_\chi^{VЗД} \cdot \delta_{исх}, \quad (13)$$

$$\text{где } K_\chi^{VЗД} = K(C_1 - C'_1) + (1 - K)(C_2 - C'_2).$$

Первичная погрешность $\delta_y^{VЗД}$ при УЗД будет определяться зависимостью

$$\delta_y^{VЗД} = \frac{\Delta T l \cdot K_M^{VЗД}}{d}, \quad (14)$$

Таким образом, полученные зависимости для расчета первичных погрешностей $\delta_M^{VЗД}$, $\delta_K^{VЗД}$, $\delta_\chi^{VЗД}$, $\delta_y^{VЗД}$ при УЗД, показывают на существенное снижение их влияния, на величину суммарной погрешности по сравнению со СД, т.к. $K_M^{VЗД} < K_M$; $K_\kappa^{VЗД} < K_\kappa$; $K_\chi^{VЗД} < K_\chi$.

Подставив полученные выражения первичных погрешностей (6), (10), (13) и (14) в (1) получим зависимость для расчета суммарной погрешности УЗД в развернутом виде:

$$\delta_\Sigma^{VЗД} = \delta_{исх} (K_M^{VЗД} + K_\chi^{VЗД}) + \sqrt{(K_{\kappa 1}^{VЗД} \delta'_{осм} + K_{\kappa 2}^{VЗД} \delta''_{осм})^2 + \left(\frac{K_M^{VЗД} \Delta T \cdot l}{d}\right)^2} + (3\delta_u)^2 + (T_\chi)^2, \quad (15)$$

Таким образом, в результате теоретического анализа, расчетно-аналитическим методом получена зависимость для определения суммарной погрешности УЗД и ее первичных составляющих, которая позволяет прогнозировать обеспечение точности процесса УЗД.

Первое составляющее зависимости (15), представляет долю суммарной погрешности, унаследованную с предыдущей операции, а второе составляющее определяет долю собственных погрешностей УЗД в суммарной погрешности.

Обозначив второе слагаемое через $\delta_c^{УЗД}$, получим:

$$\delta_{\Sigma}^{УЗД} = \delta_{исх} (K_m^{УЗД} + K_{\chi}^{УЗД}) + \delta_c^{УЗД}, (16)$$

Используя (16), можно получить зависимость для расчета коэффициента уточнения при УЗД в следующем виде:

$$\varepsilon_{\Sigma}^{УЗД} = \frac{\delta_{\Sigma}^{УЗД} - \delta_c^{УЗД}}{\delta_{\Sigma}^{УЗД} (K_m^{УЗД} + K_{\chi}^{УЗД})}, (17)$$

которая позволит прогнозировать предполагаемую точность в процессе УЗД, при полном проявлении первичных погрешностей.

Для исследований точности отверстий при УЗД использовалась установка, собранная на базе токарно-винторезного станка 1К625 (рисунок 3). Колебательная система 5 устанавливалась при помощи конического хвостовика в задней бабке, которая закреплялась на станине станка. Для установки детали, силоизмерительного устройства и других элементов, применяемых при исследованиях, предусмотрено специальное приспособление, которое закреплялось в резцедержателе суппорта.

Источником электрических ультразвуковых колебаний служит ультразвуковой генератор УЗГ-10 с обратной акустической связью и выходной мощностью 9,5 кВт.

Колебательная система включает в себя магнитострикционный преобразователь ПМС-15А-18 номинальной мощностью 4 кВт, собственной частотой 18,75 кГц, преобразующего электрические колебания ультразвуковой частоты в механические. Для обеспечения усиления амплитуды применялись конические и ступенчатые концентраторы.

Исследования формирования точности при УЗД проводились для условий эффективного использования этой схемы дорнования по снижению статических усилий. Учитывая это, а также то, что доли остаточных деформаций в натягах при УЗД значительно больше, чем при СД, можно рекомендовать для определения максимального натяга при УЗД партии деталей следующую зависимость:

$$i_{\max} = \delta_{исх} + \delta_{\phi} + 2R_{z_{исх}}, (18)$$

где $\delta_{исх}$ - исходная точность обрабатываемых отверстий; δ_{ϕ} - предельная величина погрешностей формы; $R_{z\text{ исх}}$ - исходная шероховатость поверхностей отверстий по R_z .

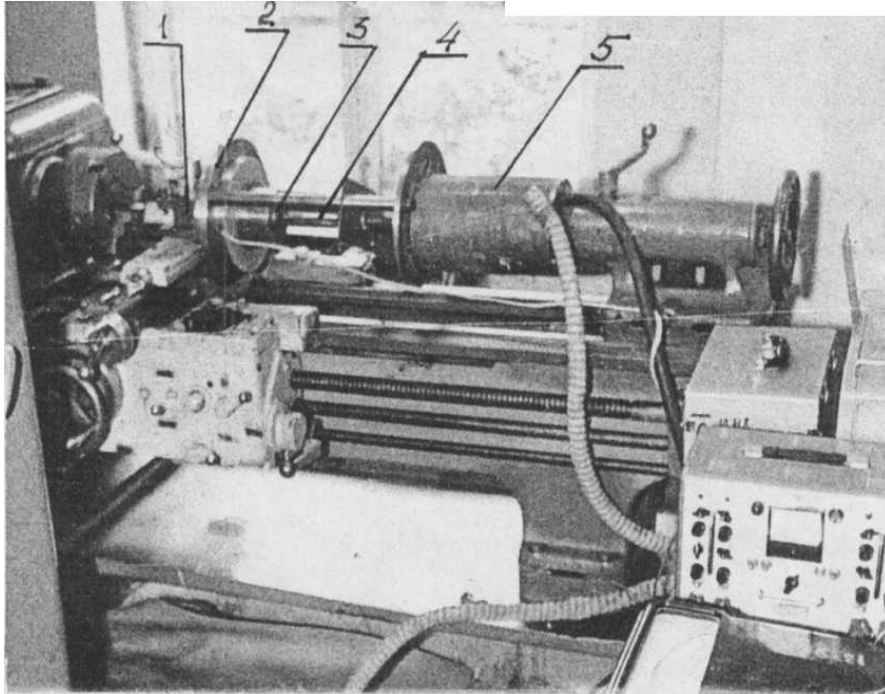


Рис. 3. Установка для УЗД отверстий: 1 – установочное устройство; 2 – силоизмерительное устройство; 3 – деталь; 4 – инструмент; 5 – колебательная система

Для исследований были изготовлены две выборки втулок (по 50 шт.) из бронзы БрА9Ж3 ГОСТ 493-79 (НВ 90-110). Действительная твердость материала оказалась НВ 83-117. Отверстия втулок обрабатывались до диаметра 12Н9 ($\delta_{исх} = 43$ мкм). Наружный диаметр втулок $D_n = 22$ и 26 мм, длина отверстия 16 мм. Дорнование осуществлялось с натягами $i = 0,03 \dots 0,073$ мм и $i_A = 0,055$ мм.

Сначала были получены зависимости остаточных деформаций от натягов при твердости материала втулок НВ100 (рисунок 4).

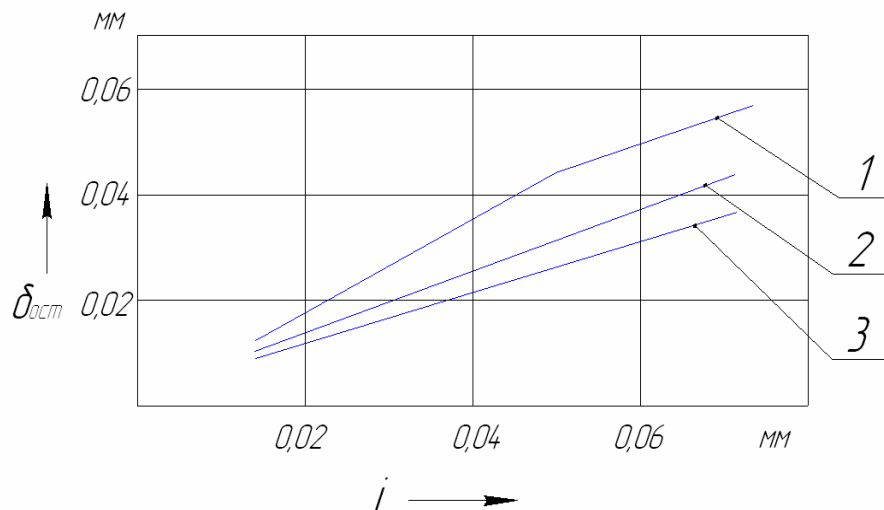


Рис. 4. Зависимость остаточных деформаций от натягов: 1 – при УЗД; 2,3 – при СД

Так как зависимости 2,3 и участки зависимости 1 хорошо совпадают с прямыми, то, аппроксимируя их, были получены эмпирические уравнения для определения остаточных деформаций при СД и УЗД:

- для СД:

$$\text{при } D_n = 26 \text{ мм} - \delta_{ост} = 0,64 i - 0,003,$$

$$\text{при } D_n = 22 \text{ мм} - \delta_{ост} = 0,59 i - 0,002;$$

- для УЗД:

$$\text{первый участок} - \delta_{ост} = 0,85 i - 0,002 \text{ (при } D_n = 22 \text{ и } 26 \text{ мм)},$$

$$\text{второй участок} - \delta_{ост} = 0,66 i + 0,008 \text{ (при } D_n = 22 \text{ и } 26 \text{ мм)}.$$

На основании этих данных были проведены расчеты первичных и суммарной погрешностей, определены ожидаемые коэффициенты уточнения УЗД и СД, которые сведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета точности дорнования в мкм

Метод дорнова-	Первичная погрешность						δ_{Σ}	ε
	δ_m	δ_{χ}	δ_{κ}	δ_y	δ_u	δ_T		
СД	16	2	10	4	0	6	30	1,43
УЗД	10	0	6	2	0	6	19	2,30

Дорнование отверстий втулок осуществлялось дорнами, изготовленными из стали X12Ф (HRC 64-65). Наружный диаметр втулок двух выборок $D_n = 22$ мм. В качестве смазывающего вещества использовали сульфозфрезол Р.

После измерения размеров отверстий их результаты подвергались статистическим исследованиям и корреляционному анализу.

Оценку изменения точности размеров производили при помощи коэффициента уточнения $\varepsilon_d = S_x / S_y$, позволяющего качественно оценить это изменение.

Для оценки количественного влияния первичных погрешностей на формирование суммарной погрешности, с учетом технологической наследственности, устанавливались корреляционные связи погрешностей между операциями с определением коэффициентов корреляции r_{xy} и уравнений связи вида $y=a+bx$.

Для количественной оценки влияния технологической наследственности на формирование суммарной погрешности УЗД предложены коэффициенты M и N .

Коэффициент M , определяющий долю дисперсии собственной погрешности в дисперсии выходной, определяется зависимостью

$$M = (1 - r_{xy}^2)100\% , (19)$$

Доля дисперсии, унаследованная от исходной погрешности в дисперсии выходной определяется коэффициентом

$$N = r_{xy}^2 \cdot 100\% , (20)$$

Результаты статистических исследований и корреляционного анализа точности отверстий после СД и УЗД представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты исследований точности УЗД и СД в мкм

Метод дорнования	S_x ,	\bar{X} ,	S_y ,	\bar{Y} ,	ε_d	TD=6S	r_{xy}	Уравнение	M,	N,
СД	7,2	21,5	4,8	49,3	1,5	28,8	0,78	$y=0,52x+38$	39	61
УЗД	7,6	22,6	3,2	62,4	2,4	19,2	0,70	$y=0,29x+56$	51	49

Как видно из табл. 2, подтвердилось высказанное выше предположение по обеспечению точности отверстий при УЗД и СД. Полученные в результате экспериментов коэффициенты уточнения незначительно отличаются от рассчитанных по формулам.

Несущественное повышение точности при СД ($\varepsilon_d = 1,5$) объясняется большей долей унаследованных первичных погрешностей в суммарной ($N = 61$ %), в то время как при УЗД эта доля составляет $N = 49$ %.

Таким образом, УЗД обеспечило более значительное повышение точности обработки отверстий ($\varepsilon_d = 2,4$) по сравнению со СД за счет снижения отрицательного влияния первичных погрешностей δ_m , δ_λ , δ_k и δ_y .

Литература

1. Марков, А. И. Ультразвуковое алмазное выглаживание деталей и режущего инструмента / А. И. Марков, И.Д Устинов. – М.: Машиностроение, 1979. – 54 с.
2. Муханов, И. И. Импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом /И.И. Муханов. – М.: Машиностроение, 1978. – 44 с.
3. Курьянов, В.А. Исследование процесса прошивания отверстий малого диаметра с наложением ультразвуковых колебаний: автореф. дис. канд. техн. наук. – Свердловск: 1974. – 26 с.
4. Шадуро, Р.Н. Расчетно-аналитический метод определения точности при дорновани / Р.Н. Шадуро, В.В. Гапонов и П.А. Шацкий // Вестн. МГТУ. – 2006. - № 1. – с. 276-282.

Панкратов Владимир Евгеньевич

Студент заочного факультета
Белорусско-Российский университет, г. Могилёв
Тел.: 24-40-71

Шадуро Роман Николаевич

Доцент кафедры «Технология машиностроения», к.т.н.
Белорусско-Российский университет, г. Могилёв
Тел.: 48-87-85