

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ОБРАБОТКЕ СИНТЕГРАНА СВЕРЛЕНИЕМ

В.А. Рогов, А.К. Велис, В.В. Копылов

Кафедра технологии машиностроения,
металлорежущих станков и инструментов
Инженерный факультет
Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

В статье рассматриваются исследования проведенных на синтегране для оценки влияния режимов резания сверлением на выходные силовые характеристики станка: осевая сила P_z и крутящий момент M_z для минимизирования напряжений узлов станка. Исследования проведены с помощью спиральных твердосплавных сверл из сплава ВК8, поверхность которых была обработана магнетронным напылением сплава NbHfTi для получения градиентного по содержанию легирующих элементов промежуточного слоя перед нанесением износостойкого покрытия (TiAl)N. Исследования проводились на обрабатывающем центре, оснащённом ЧПУ, с возможностью диагностирования силовых характеристик станка в режиме реального времени. Исследования показали оптимальные значения частоты вращения шпинделя станка и осевой подачи для сверления синтеграны.

Ключевые слова: синтегран, сверление синтеграны, сверла ВК8, модифицирование поверхности, компьютерная диагностика процесса резания, износостойкие покрытия, осевая подача, крутящий момент.

Целью настоящей работы является анализ работы спиральных твердосплавных сверл из сплава ВК8 (K20 по ISO), прошедших комплексную поверхностную обработку магнетронным напылением сплавом NbHfTi, и получение математических уравнений регрессии, описывающих зависимости выходных параметров P_z , M_z от входных параметров — частоты вращения шпинделя n и осевой подачи S .

График для осевой силы P_z , полученный с помощью сигналов системы ЧПУ станка, показан на рис. 1, где четко видны 8 разных отрезков от разных опытов при сверлении до глубины 20 мм на различных режимах.

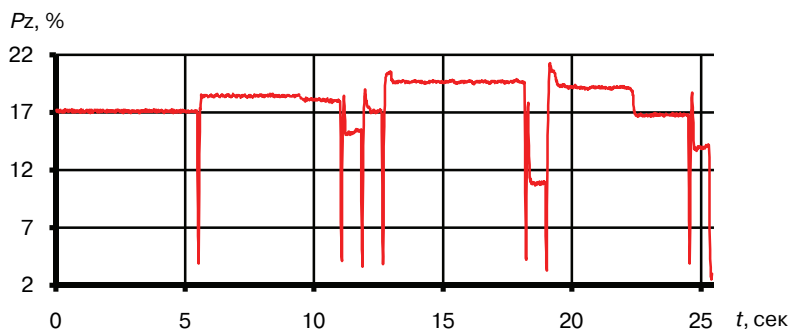


Рис. 1. График $P_z - t$, полученный с помощью ЧПУ станка

График крутящего момента M_z (рис. 2), также полученный с помощью системы ЧПУ станка, показывает неустойчивые значения крутящего момента, меняющегося при увеличении глубины отверстия. Это изменение может объясняться чувствительностью датчиков к этому показателю и неравномерностью свойств синтеграна. Значения момента M_z вдоль отверстия будем считать нормально распределенными, следовательно, их можно изучать статистически.

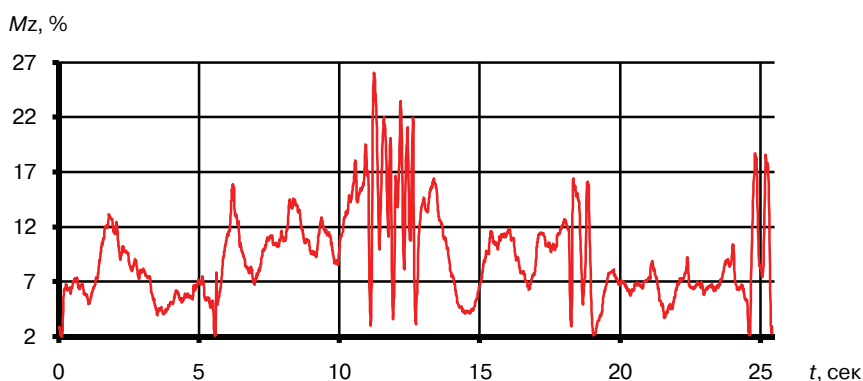


Рис. 2. График $P_z - t$, полученный с помощью ЧПУ станка

Запишем матрицу планирования для нашего полнофакторного эксперимента для определения математической модели шероховатости и силовых характеристик при обработке синтеграна.

Результаты опытов, проведенных на синтегрane, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты опытов

Опыт	n x_1	S x_2	P_{z1} y_{u1}	P_{z2} y_{u2}	\bar{y}_u	M_{z1} y_{u1}	M_{z2} y_{u2}	\bar{y}_u
1—5	1 600	40	13,70	14,75	14,22	10,99	10,08	10,54
2—6	400	40	16,07	15,93	16,00	11,25	11,72	11,49
3—7	1 600	5	15,19	16,16	15,67	6,81	5,69	6,25
4—8	400	5	17,55	17,48	17,51	8,72	7,68	8,20

Полнофакторный эксперимент типа $N = 2^k$ проведен на основе однофакторных экспериментов, проведенных в работе [1]. Суть его состоит в проведении эксперимента по заранее заданной схеме (матрица планирования) [2—5].

Матрица планирования полнофакторного эксперимента типа ПФЭ 2^2 для обработки синтеграна сверлением, учитывающая эффект взаимодействия, приведена в табл. 2.

Интервал варьирования и основной уровень выбрали из области определения [2; 1]. Для исключения систематических ошибок проведены два эксперимента с рандомизацией каждого опыта.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента 2^2 с параллельными опытами и с эффектом взаимодействия факторов

Опыт	Фактор			\tilde{x}_1, \tilde{x}_2	Переменная состояния	
	\tilde{x}_0	\tilde{x}_1	\tilde{x}_2		Y_{u1}	Y_{u2}
1—5	+1	+1		+1	Y_{11}	Y_{21}
2—6	+1	-1	+1	-1	Y_{12}	Y_{22}
3—7	+1	+1	-1	-1	Y_{13}	Y_{23}
4—8	+1	-1	-1	+1	Y_{14}	Y_{24}

Предполагаемая математическая модель принята линейной с эффектом взаимодействия между факторами, уравнение (1).

$$\hat{y} = b_0 \tilde{x}_0 + b_1 \tilde{x}_1 + b_2 \tilde{x}_2 + b_{12} \tilde{x}_1 \tilde{x}_2, \quad (1)$$

где \hat{y} — функция отклика факторов x_0, x_1, x_2 ; b_0, b_1, b_2 — коэффициенты уравнения регрессии; b_{12} — коэффициент взаимодействия между факторами x_1 и x_2 .

Таблица 3

Соответствие уровней и факторов для сверления синтегран

Уровень		Фактор	
		$n, \text{мм/об}$	$S, \text{мм/мин}$
		x_1	x_2
Верхний	+1	1 600	40
Основной	0	1 000	22,5
Нижний	-1	400	5

С помощью матрицы планирования (см. табл. 2) вычисляем коэффициенты b_0, b_1, b_2 по формулам (2), (3), (4):

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \tilde{x}_{iu} \bar{y}_u; \quad (u = 1, 2, \dots, N), \quad (2)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \tilde{x}_{iu} \tilde{x}_{ju} \bar{y}_u; \quad (u = 1, 2, \dots, N); (i \neq j), \quad (3)$$

где $\bar{y}_u = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M y_{uk}; \quad (4)$

(\tilde{x}_{iu} — кодированное значение фактора, \bar{y}_u — среднее значение по параллельным опытам k -х строк матрицы планирования, u — порядковый номер строки матрицы или номер опыта, i, j — номер колонки, $i \neq j, M$ — число повторных опытов).

После расчета коэффициентов уравнения регрессии по формулам (1) и (2) запишем все значения в табл. 4.

Уравнения регрессии для P_z, M_z будут иметь следующий вид:

$$P_z \rightarrow \hat{y} = 15,85 - 0,91\tilde{x}_1 - 0,74\tilde{x}_2 + 0,02\tilde{x}_1\tilde{x}_2, \quad (5)$$

$$M_z \rightarrow \hat{y} = 9,12 - 0,73\tilde{x}_1 + 1,90\tilde{x}_2 + 0,25\tilde{x}_1\tilde{x}_2. \quad (6)$$

Таблица 4

Коэффициенты уравнений регрессии для P_z, M_z

	P_z	M_z
b_0	15,85	9,12
b_1	-0,91	-0,73
b_2	-0,74	1,90
$b_{1,2}$	0,02	0,25

Проведем статистический анализ математической модели, который включает 1) проверку однородности дисперсии или оценки дисперсии воспроизводимости; 2) проверку коэффициентов регрессии; 3) проверку адекватности математической модели.

Для статистического анализа нам нужно рассчитать все построчные дисперсии параллельных опытов (уравнение (7)) и записать в табл. 5.

$$S_u^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (y_{uk} - \bar{y}_u)^2, \quad (7)$$

где: $(M-1)$ — число степеней свободы; M — число повторных опытов; S_u^2 — дисперсия выборки; u — порядковый номер строки параллельного опыта.

Таблица 5

Значения дисперсии для P_z, M_z

u	S_u^2 — для P_z	M_z
1	$S_1^2 = 1/(2-1)(13,70 - 14,22)^2 + (14,75 - 14,22)^2 = 0,55$	0,41
2	$S_2^2 = 1/(2-1)(16,07 - 16,00)^2 + (15,93 - 16,00)^2 = 0,01$	0,11
3	$S_3^2 = 1/(2-1)(15,19 - 16,67)^2 + (16,16 - 15,67)^2 = 0,47$	0,63
4	$S_4^2 = 1/(2-1)(17,55 - 17,51)^2 + (17,48 - 17,51)^2 = 0,00$	0,54
$\sum_{u=1}^N S_u^2$		1,03
		1,70

Проверка однородности дисперсий

Используем критерий Кохрена для проверки однородности, который является соотношением между максимальной дисперсией и суммой всех дисперсий. Математически выражается таким образом:

$$G_{\text{расч}} = \frac{(S_u^2)_{\max}}{\sum_{u=1}^N S_u^2} = \frac{0,55}{1,03} = 0,53. \quad (8)$$

Таблица 6

Расчетный критерий Кохрена для P_z, M_z

$G_{расч}$	
P_z	M_z
0,53	0,24

Дисперсия является однородной, если расчетные критерии Кохрена не превышают табличных.

Если $G_{расч} < G_{табл}$, (q, f_1, f_2), дисперсии однородны.

Если $G_{расч} > G_{табл}$, имеются отклонения в результатах опытов вследствие систематических ошибок и неучтенных факторов.

f_1 — число степеней свободы ($f_1 = M - 1 = 2 - 1 = 1$);

f_2 — число измерений переменной y ($f_2 = N = 4$);

M — число параллельных опытов ($M = 2$).

Так как $f_1 = 1$ и $f_2 = N = 4 \rightarrow$ из табл. 6 $G_{табл} = 0,91$.

Табл. 7 показывает $G_{расч}$ и $G_{табл}$, рассчитана по формуле (8) для P_z, M_z и R_z .

$P_z \rightarrow 0,53 < 0,91$; $M_z \rightarrow 0,24 < 0,91 \rightarrow$ дисперсия однородна.

Таблица 7

Сравнение между $G_{расч}$ и $G_{табл}$ для P_z, M_z

$G_{табл}$		$G_{расч}$	
P_z	M_z	P_z	M_z
0,91	0,91	0,53	0,37

Вычислены значения ошибки опыта или дисперсий воспроизводимости по формуле (9) и занесены в табл. 8.

$$S_0^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_u^2 = \frac{1}{4}(0,55 + 0,01 + 0,47 + 0,00) = 0,26. \quad (9)$$

Таблица 8

Значения ошибок опыта для P_z, M_z

S_0^2 — ошибка опыта или дисперсия воспроизводимости	
P_z	M_z
0,26	0,42

Расчет дисперсии коэффициентов уравнения регрессии S_{bi}^2 дан в табл. 9.

$$S_{bi}^2 = \frac{S_0^2}{N}, \quad (10)$$

где $S_{bi} = \sqrt{S_{bi}^2}$ — среднеквадратичное отклонение; $S_{bi}^2 = \frac{0,26}{4} = 0,065$.

Таблица 9

Значения ошибок опыта для P_z, M_z

S_{bi}^2		S_{bi}	
P_z	M_z	P_z	M_z
0,065	0,106	0,25	0,33

Проверка значимости коэффициентов уравнений регрессии

Проверим значимость коэффициентов уравнений для P_z, M_z из табл. 4.

Для проверки равенства средних значений в двух выборках (двух повторных опытов) используем критерий Стьюдента или t -критерии.

При нулевой гипотезе предполагается, что средние значения равны.

$f = N(M - 1) = 4$ — число степеней свободы;

$q = 10\% \rightarrow t_{\text{табл}} = 2,13$ — уровень значимости;

$(t_i)_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}(q, f)$ — условие значимости коэффициентов.

$$(t_i)_{\text{расч}} = \frac{|b_i|}{S_{bi}}, \tag{11}$$

где $(t_i)_{\text{расч}}$ — расчетное значение критерия Стьюдента, табл. 10. S_{bi} — среднеквадратичное отклонение.

Таблица 10

Расчетное значение критерий Стьюдента для P_z, M_z

Опыт	$(t_i)_{\text{расч}}$	
	P_z	M_z
$t_0^{\text{расч}}$	62,39	27,98
$t_1^{\text{расч}}$	3,56	2,22
$t_2^{\text{расч}}$	2,91	5,81
$t_{1,2}^{\text{расч}}$	0,06	0,77

Если $(t_i)_{\text{расч}} > t_{\text{табл}} \rightarrow$ коэффициент значим;

если $(t_i)_{\text{расч}} < t_{\text{табл}} \rightarrow$ коэффициент незначим.

Форма уравнений регрессии с учетом значимости коэффициентов регрессии показана ниже.

Уравнения регрессии с учетом значимости для P_z, M_z :

$$P_z \quad \hat{y} = 15,85 - 0,91\tilde{x}_1 - 0,74\tilde{x}_2, \tag{12}$$

$$M_z \quad \hat{y} = 9,12 - 0,73\tilde{x}_1 + 1,90\tilde{x}_2. \tag{13}$$

Расчет дисперсной адекватности

Проводим проверку адекватности математической модели про критерий Фишера.

Остаточная дисперсия, или дисперсия адекватности:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{M}{N - M - 1} S_{\text{н}}^2 = \frac{M}{N - M - 1} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2, \quad (14)$$

где M — число параллельных опытов в u -й строке матрицы; N — число различных опытов (число строк матрицы); $S_{\text{н}}^2$ — средняя квадратическая ошибка прогноза $\left(S_{\text{н}}^2 = \sum_{u=1}^N S_{\text{ун}}^2 = \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2 \right)$.

$$\text{Из (12), (13) } \hat{y} = 15,85 - 0,91\tilde{x}_1 - 0,74\tilde{x}_2,$$

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - x_{i,0}}{\Delta x_i},$$

где \tilde{x}_i — кодированное значение i -го фактора; x_i — натуральное значение i -го фактора; $x_{i,0}$ — натуральное значение основного (нулевого) уровня i -го фактора; Δx_i — интервал варьирования i -го фактора; i — номер фактора.

$$\hat{y} = 15,85 - 0,91 \frac{x_1 - x_{1,0}}{\Delta x_1} + 0,74 \frac{x_2 - x_{2,0}}{\Delta x_2},$$

так как $x_{1,0} = 1000$; $x_{2,0} = 22,5$; $\Delta x_1 = 600$; $\Delta x_2 = 17,5$.

Средние значения экспериментальных данных и результаты для расчетных значений, полученных по уравнениям (12) и (14) для P_z, M_z , приведены в табл. 11.

Таблица 11

Средние и расчетные значения опытов, по формулам (12) и (13)

Опыт	P_z			M_z		
	\bar{y}_u	\hat{y}_u	$S_{\text{ун}}^2$	\bar{y}_u	\hat{y}_u	$S_{\text{ун}}^2$
1	14,22	14,21	0,0001	10,54	10,29	0,06
2	16,00	16,02	0,0004	11,49	11,74	0,06
3	15,67	15,69	0,0004	6,25	6,50	0,06
4	17,51	17,50	0,0001	8,20	7,95	0,06
$\sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2$			0,0010	$\sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2$		0,24

С помощью значений табл. 11 и формулы (14) рассчитаем дисперсию адекватности табл. 12.

Таблица 12

Дисперсия адекватности уравнений регрессии для P_z, M_z

P_z	M_z
$S_{\text{ад}}^2$	$S_{\text{ад}}^2$
0,002	0,48

Проверка адекватности модели

$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$; при $(q; f_1; f_2)$ — условие адекватности модели;

$F_{\text{расч}}$ — расчетное значение критерия Фишера;

$F_{\text{табл}}$ — табличное значение критерия Фишера.

Из табл. 13 и табл. 8 получим $F_{\text{расч}}$ и значения занесем в табл. 13.

Таблица 13

Расчетное и табличное значения критерия Фишера уравнений регрессии для P_z и M_z

P_z		M_z	
$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{табл}}$	$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{табл}}$
0,0077	7,71	1,14	7,71

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_0^2} = \frac{0,002}{0,26} = 0,0077.$$

Значения F берем из таблицы (критерий Фишера) и запишем в табл. 13.

$$f_1 = N - M - 1 = 1; f_2 = N(M - 1) = 4;$$

$$F_{\text{табл}} = 7,71, F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}} \rightarrow \text{модель адекватна.}$$

Так как $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, из табл. 13 следует, что математические модели для P_z и M_z адекватны.

$$\hat{y} = 15,85 - 0,91 \frac{x_1 - x_{1,0}}{\Delta x_1} + 0,74 \frac{x_2 - x_{2,0}}{\Delta x_2},$$

где $\hat{y} = P_z$; $x_1 = n$; $x_2 = S$; $\hat{y} = M_z$; $x_1 = n$; $x_2 = S$.

После математических преобразований уравнения регрессии приобретут следующий вид:

$$P_z = 15,85 - 0,91 \frac{n - 1000}{600} + 0,74 \frac{S - 22,5}{17,5},$$

$$P_z = 16,42 - 0,00152 \cdot n - 0,0423 \cdot S.$$

Уравнения регрессии для P_z , M_z

$$P_z \quad P_z = 16,42 - 0,00152 \cdot n - 0,0423 \cdot S, \quad (15)$$

$$M_z \quad M_z = 7,89 - 0,00122 \cdot n + 0,109 \cdot S. \quad (16)$$

Значения осевых усилий, возникающих на сверле, показаны на рис. 3, 4. Как ожидалось, максимальные усилия P_z , возникающие на сверле, получаются при минимальных частотах вращения n и минимальной осевой подачи S , в то время как минимальные значения P_z — при максимальных значениях n (рис. 3). Линии одного цвета представляют уровни равного усилия P_z .

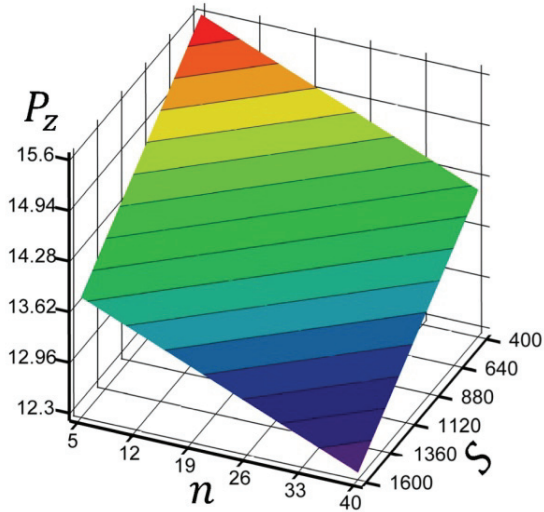


Рис. 3. Поверхность отклика осевого усилия P_z по уравнению (15)

Из анализа поверхности отклика (см. рис. 3) видно, что максимальный крутящий момент, возникший при обработке синтеграна сверлением, получен при минимальных значениях вращения шпинделя и максимальных осевых подачах, в то время как минимальные значения крутящего момента возникают при максимальных значениях вращения шпинделя и минимальных значениях осевой подачи. Линии одного тона представляют уровни равного крутящего момента M_z .

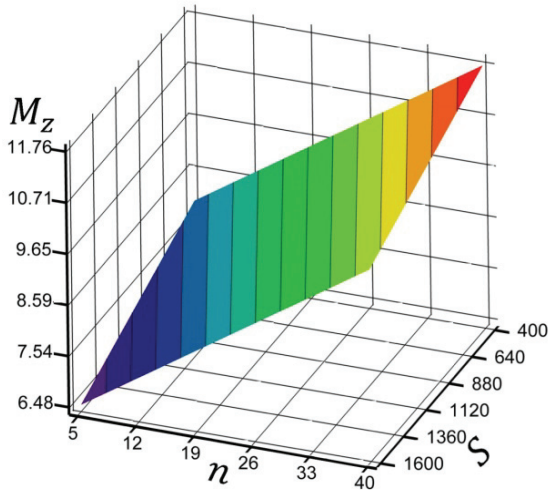


Рис. 4. Поверхность отклика крутящего момента M_z по уравнению (16)

Из вышесказанного следует, что оптимальным значениям для n и S при обработке синтеграна (при осевой подаче 25—30 мм/мин и значениях числа оборотов 1300—1600 об/мин) соответствует светло-серый район на рис. 3 и 4.

После обработки экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

— минимальные осевое усилие получается при максимальных значениях n и S , в то время как крутящий момент минимальный, когда частота вращения максимальна и осевая подача минимальна, но этот режим не производителен;

— оптимальный режим, обеспечивающий станку нормальную производительность работы, выбран для n — 25—30 мм/мин и S — 1300—1600 об/мин;

— при сверлении отверстий в синтегране с оптимальными режимами обработки можно получить 5—6 класс шероховатости;

— из проведенных опытов рекомендуем обрабатывать синтегран сверлами с напайваемыми твердосплавными пластинами с износостойким покрытием (TiAl)N, с дополнительным специальным покрытием сплавом NbHfTi, так как время, затраченное на заточку, уменьшает производительность.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Рогов В.А., Кокарев В.И., Велис А.К.* Исследование процесса обработки синтеграна твердосплавными сверлами. Т. 1. — М.: Фундаментальные исследования, 2013. [*Rogov V.A., Kokarev V.I., Veliz A.C.* Issledovanie protsesssa obrabotki sintegrana tverdosplavnyimi sverlami. T. 1. — М.: Fundamentalnyie Issledovaniya, 2013.]
- [2] *Кокарев В.И.* Применение статистических методов планирования эксперимента при идентификации процесса эксплуатации режущего инструмента. — М.: Крук, 2013. [*Kokarev V.I.* Primenenie statisticheskikh metodov planirovaniya eksperimenta pri identifikatsii protsesssa ekspluatatsii rezhushchego instrumenta. — Moskva: Kruk, 2013.]
- [3] *Адлер Ю.П.М.Е.В.Г.Ю.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. [*Adler Yu.P.M.E.V.G.Yu.V.* Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnyih usloviy. — М.: Nauka, 1976.]
- [4] *Douglas C.M.* Design and analisys of experiments. — Arizona: John Wiley & Sons Inc., 2001.
- [5] *Ашихмин В.Н., Гитман М.Б., Келлер И.Э.* Введение в математическое моделирование. — М.: ЛОГОС, 2005. [*Ashihmin V.N., Gitman M.B., Keller I.E.* Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie. — М.: LOGOS, 2005.]
- [6] *Тюкпиеков В.Н.* Повышение эффективности обработки синтеграна на основе физ. и мат. моделирования: Диссертация. — М., 2002. [*Tyukpiekov V.N.* Povyishenie effektivnosti obrabotki sintegrana na osnove fiz. i mat. modelirovaniya: Dissertatsiya. — М., 2002.]
- [7] *Валид Махмуд Мохамед Э.С.Ш.* Мат. и физ. моделирование динамики процесса резания композиционных структурно-неоднородных материалов (на примере синтеграна): Диссертация. — М., 2005. [*Valid Mahmud Mohamed E.S.Sh.* Mat. i fiz. modelirovanie dinamiki protsesssa rezaniya kompozitsionnyih strukturno-neodnorodnyih materialov (na primere sintegrana): Dissertatsiya. — М., 2005.]
- [8] *Кокарев В.И., Федоров В.И., Велис А.С.* Исследование процесса сверления синтеграна твердосплавными сверлами с комплексным модифицированием режущей части // Вести СТАНКИНА. — 2013. [*Kokarev V.I., Fedorov V.I., Veliz A.C.* Issledovanie protsesssa sverleniya sintegrana tverdosplavnyimi sverlami s kompleksnyim modifitsirovaniem rezhushchey chasti // Vesti STANKINA. — 2013.]
- [9] *Елин А.В.* Повышение эффективности и качества обработки полимербетонов шлифованием на примере синтеграна: Диссертация. — М., 2008. [*Elin A.V.* Povyishenie effektivnosti i kachestva obrabotki polimerbetonov shlifovaniem na primere sintegrana: Dissertatsiya. — М., 2008.]

STATISTICAL STUDY ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS WHEN DRILLING SINTETHYC GRANITE

V.A. Rogov, A.C. Veliz, V.V. Kopylov

Department of Mechanical Engineering,
Metal-cutting and Tool
Engineering Faculty
People's Friendship University of Russia
Ordzhonikidze str., 3, Moscow Russia, 115419

This paper is a research on sintegran to determine the effects of drilling on the power characteristics of machine: axial force — P_z , and torque — M_z to minimize the stresses on the drilling process. Investigations were carried out using spiral carbide drills alloy BK8, the surface of which was treated with an electron beam by magnetron sputtering alloy NbHfTi gradient for the content of alloying elements intermediate layer before hardfacing (TiAl) N. Studies were conducted on a machining center equipped with CNC (computer numerical control), with the possibility of diagnosing power machine performance in real time. Studies have shown the optimal values of spindle speed and axial feed for machining sintegran.

Key words: Sintegran, drilling of sintegran, carbide drills, surface modification, computer diagnostics of mechanical tests, wear resistant coatings, axial feed, spindle speed.