



Особенности формирования базы данных по силам резания для моделирования маятникового шлифования плоских поверхностей инструментов из сталей Р9М4К8 и Х12

© Я.И. Солер, А.В. Прокопьева, С.Н. Дроzhжин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – создание базы данных по силам резания P_z , P_y для возможности моделирования нагрузок на инструменты из сталей Р9М4К8 и Х12, а также на детали и узлы станка с использованием компьютерных программ. Усилия P_z дополнительно позволяют моделировать тепловые явления в зоне шлифования, которые являются неблагоприятным фактором при абразивной обработке и снижают работоспособность режущих инструментов и штампов. Измерение сил резания вели с использованием динамометрической системы фирмы Kistler с выводом полученной информации на компьютер. Получены поправочные коэффициенты к базовой модели, учитывающие холостые проходы по ширине шлифуемой поверхности. Установлено, что увеличение операционного припуска при шлифовании кругами из кубического нитрида бора не сопровождается ростом сил резания, что характерно для кругов из традиционных абразивов (в частности электрокорунда). Силы резания при шлифовании штамповой стали Х12 оказались больше, чем быстрорежущей стали Р9М4К8: P_y – в 1,2 раза, P_z – в 1,36 раза. Полученные результаты повысят эффективность использования САЕ-систем (название для программ и программных пакетов от англ. Computer-aided engineering) в машиностроении, в частности при шлифовании. Подтверждено, что увеличение коэффициента шлифования $K_{шл} = P_z/P_y$ отражает улучшение условий работы абразивных кругов. В частности, он увеличивается при выходе круга из контакта с заготовкой от 0,32 до 0,46 при обратном ходе в этой же зоне от 0,46 до 0,64.

Ключевые слова: силы резания, шлифование стационарное и нестационарное, рабочие и выхаживающие проходы, коэффициент шлифования

Благодарности: Работа проведена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационный номер проекта № 9.6484.2017/БЧ от 1 января 2017).

Информация о статье: Дата поступления 24 мая 2019 г.; дата принятия к печати 12 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Солер Я.И., Прокопьева А.В., Дроzhжин С.Н. Особенности формирования базы данных по силам резания для моделирования маятникового шлифования плоских поверхностей инструментов из сталей Р9М4К8 и Х12. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 6. С. 1083–1092. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1083-1092>

Features of cutting force database formation for modeling of pendulum grinding of flat surfaces of tools made of R9M4K8 and X12 steels

Yakov I. Soler, Albina V. Prokopieva, Sergey N. Drozhzhin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to create a database on cutting forces P_z , P_y to enable the simulation of loads on the tools made of R9M4K8 and X12 steels and on machine-tool parts and components using computer programs. P_z forces additionally allow to simulate thermal phenomena in the grinding zone, which being an adverse factor in abrasive processing reduce the performance of cutting tools and dies. The cutting forces are measured using the Kistler dynamometer system and the output of the obtained information is presented in the computer. Correction factors to the basic model taking into account the idle passes by the width of the processed surface are obtained. It is found out that the increase in the operational allowance when grinding with cubic boron nitride wheels is not accompanied by an increase in cutting forces, which is typical for traditional abrasive wheels (in particular for electrocorundum). The cutting forces at grinding of die steel X12 are greater than those at grinding high-speed steel R9M4K8: P_y – by 1.2 times, P_z – by

1.36 times. The results obtained will increase the efficiency of using CAE-systems (Computer-aided engineering systems) in mechanical engineering, particularly in grinding. It is confirmed that the increase in the grinding coefficient $K_{gr} = P_z/P_y$ reflects the improvement in the abrasive wheel operating conditions. In particular, it increases when the wheel comes out of contact with the workpiece from 0.32 to 0.46 at the reverse motion in the same zone from 0.46 to 0.64.

Keywords: cutting forces, stationary and non-stationary grinding, working and spark-out passes, grinding coefficient

Acknowledgements: The work has been carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project registration No. 9.6484.2017 / БЧ of January 1, 2017).

Information about the article: Received May 24, 2019; accepted for publication November 12, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Soler YaI, Prokopieva AV, Drozhzhin SN. Features of cutting force database formation for modeling of pendulum grinding of flat surfaces of tools made of R9M4K8 and X12 steels. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1083–1092. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1083-1092>

1. ВВЕДЕНИЕ

Стали Р9М4К8 и Х12 нашли широкое распространение при изготовлении инструментов. Быстрорежущая сталь Р9М4К8 (HRC 67–68) обеспечивает повышение стойкости лезвийных инструментов в 3–5 раз по сравнению с Р18 при резании аустенитных и нержавеющей сталей и сплавов, а также легированных конструкционных сталей с повышенной твердостью на лезвийных инструментах, работающих с малой толщиной среза: развертки, зенкеры, протяжки и т.д., рабочие кромки которых нагреваются до 300–350°C¹. Высокохромистая сталь Х12 обладает высокой прокаливаемостью и закаливаемостью. При большой твердости обладает несколько пониженной вязкостью по сравнению со сталями Х12М, Х12Ф, благодаря чему применяется для штампов простой формы, которые работают без значительных ударных нагрузок. Например, для вытяжных штампов².

На заключительных операциях механической обработки режущие инструменты подвергаются шлифованию. Абразивная обработка относится к числу наиболее распространенных способов резания, без которого не обходится практически ни одна из отраслей машиностроения. В частности в инструментальном производстве доля шлифовальных станков достигает 50–60%.

По съему операционного припуска имеется две разновидности: маятниковое и глубинное. В данном исследовании рассматривается первая разновидность шлифования, которая на данный момент имеет наибольшее распространение в машиностроении и используется на окончательном этапе изготовления ответственных деталей с высокой точностью (5–8 квалитеты) и небольшой шероховатостью поверхности (R_a 0,16–1,25). Этот процесс характеризует небольшие глубины резания $t = 0,005 - 0,05$ мм и повышенные скорости продольного перемещения стола с заготовкой $s_{пр} = 10-20$ м/мин. Глубинное шлифование появилось сравнительно недавно в качестве альтернативы известным лезвийным методам обработки, например, фрезерованию. Оно позволяет за один проход снимать припуск в несколько десятков миллиметров при низкой скорости продольного стола $s_{пр} = 30-300$ мм/мин [1, 2]. По мнению Старкова В.К. [3], при удалении припуска не более 2 мм по интенсивности съема материала оба варианта шлифования рассматриваются равноценными. При большей его величине целесообразнее использовать только глубинную схему резания. Шлифуемая поверхность по длине заготовки включает три этапа: врезание, постоянной длины контакта и переходный, который заканчивается полным выходом абразивного круга из кон-

¹Арзамасов Б.Н., Соловьева Т.В. Справочник по конструкционным материалам. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2005. 640 с.

²Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.



такта с заготовкой. При глубинном шлифовании этапы врезания и переходный в результате большой глубины резания t играют значительную роль, а при маятниковом съеме операционного припуска их роль снижается до нуля. На первом этапе шлифования силы резания возрастают; на последнем – падают; на переходном – остаются на одном уровне [1, 2].

2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Суммарную силу резания при плоском шлифовании традиционным кругом без заборного конуса принято разлагать на две составляющие: тангенциальную P_z и нормальную (радиальную) P_y . Осевую составляющую P_x рассматривают равной нулю по двум обстоятельствам: если ширина круга $B_{кр}$ превышает ширину детали B или в более общем случае ($B_{кр} < B$) поперечная подача выполняется вне зоны резания. Усилие P_z формирует работу резания и неблагоприятное тепловыделение [4, 5]. Усилие P_y вызывает деформации заготовки и узлов станка. Обе составляющие участвуют в формировании поверхностного слоя детали.

В литературных источниках в лучшем случае содержатся сведения о силах резания на рабочем ходе, завершающем съём операционного слоя. Модели сил могут быть экспериментальными и теоретическими. В первом случае они чаще всего аппроксимированы степенными функциями вида:

$$\begin{aligned} & * B_{кр} > B^{3,4} [3, 5] - \\ & - (P_z, P_y) = C_p \cdot v_k^x \cdot s_{пр}^y \cdot t^z; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & * B_{кр} < B^5 [6] - \\ & - (P_z, P_y) = C_p \cdot B \cdot v_k^x \cdot s_{пр}^y \cdot t^z. \end{aligned} \quad (2)$$

Показатели степени в (1), (2) находятся в диапазоне: $x < 0, y > z > 0$. Недостатком моделей (1), (2) служит то, что они имеют узкий диапазон применения, тесно увязаны с условиями эксперимента и не учитывают взаимодействие факторов.

В работе В.А. Носенко [7] представлены силы P_z, P_y при шлифовании торцов колец подшипников в виде полинома, полученные с помощью полного факторного эксперимента типа 2^4 , которые позволяют учесть взаимодействия факторов в отличие от (1), (2).

В работах⁶ [8, 9] представлен другой подход к поиску моделей сил резания, который рассматривает различную роль абразивных зерен на поверхности шлифованного круга вследствие их разновысотности расположения, которая характеризуется отношением [10, 11]

$$h/\rho, \quad (3)$$

где h – глубина внедрения зерна в металл, ρ – радиус округления его вершины.

От величины (3) зависит роль, которую выполняют зерна на рабочей поверхности абразивного инструмента: при $h/\rho < 0,02$ – упругая деформация детали; при $0,02 < h/\rho < 0,3$ – пластическое оттеснение (выдавливание) металла по краям – микроцарапины без образования стружки; при $h/\rho > 0,3 - 0,5$ – срезание металла. Зерна из кубического нитрида бора (КБН) по сравнению с электрокорундом имеют в 2 раза меньшие ρ и большую остроту вершин примерно в том же диапазоне. Характер риски на обработанной поверхности зернами КБН указывает на то, что стружка отделяется путем срезания без выдавливания металла по ее краям. По результатам [12] классифицированы стружки трех типов:

³Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов: учеб. пособ. СПб: Лань, 2010. 204 с.

⁴Васильев Е.В. Повышение производительности алмазного шлифования твердосплавных изделий и ресурса кругов выбором оптимальных схем и режимов шлифования и характеристики круга: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2005. 16 с.

⁵Резников А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник. М.: Машиностроение, 1977. 391 с.

тонкие волосовидные, почти ровные, напоминающие сливные; стружка с одной гладкой и другой слегка шероховатой стороной и толстые элементные стружки. Следов оплавления стружки, которые часто встречаются при шлифовании кругами из традиционных абразивов, не обнаружено. Первый тип стружек характерен при использовании кругов из сверхтвердых абразивов: КНБ и синтетических алмазов.

Авторами⁶ [8, 9] предложены линейные модели, в которых силы шлифования представлены функцией толщины срезаемого слоя, а коэффициенты моделей (4), (5) зависят от геометрических параметров абразивных зерен и определены с использованием алгоритма Нелдера – Мида:

$$P_{yj} = k_{ye} dS_j + k_{yc} a_j h_j(t); \quad (4)$$

$$P_{zj} = k_{ze} dS_j + k_{zc} a_j h_j(t), \quad (5)$$

где P_{yj} , P_{zj} – соответственно, нормальная и тангенциальная сила резания, приходящаяся на каждое зерно j ; dS_j – длина линии контакта j -го элементарного отрезка режущей кромки с обрабатываемой поверхностью; a_j – характерная ширина зерна; $h_j(t)$ – толщина срезаемого слоя для центральной точки зерна; k_{yc} , k_{zc} – коэффициенты модели, характеризующие силы резания в радиальном и тангенциальном направлениях и зависящие от толщины срезаемого слоя.

В аналитических моделях используется условие равновесия внешних и внутренних сил, действующих на режущий элемент. Сказанное реализуется двумя основными составляющими: суммарной силой сдвига и суммарной силой трения по задней площадке абразивного зерна [1].

Для качественной оценки процесса шлифования целесообразно использовать коэффициент шлифования [13]:

$$K_{\text{шл}} = P_z / P_y. \quad (6)$$

Согласно мнению, изложенному в работе [2], уменьшение коэффициента $K_{\text{шл}}$ свидетельствует о том, что меньшая часть работы резания уходит непосредственно на разрушение межатомных связей в материале заготовки, т.е. на съём металла, а большая – на преодоление сил трения и, как следствие, нежелательный нагрев заготовки.

Известно, что маятниковое шлифование относится к многопроходному процессу. Однако в представленных моделях сил резания операционный припуск не представлен, и отсутствуют сведения об условиях шлифования. Только в работе [2] указано, что при шлифовании сплава ВТ6 кругами из карбида кремния зеленого при возрастании числа проходов от 1 до 11 сила P_y увеличилась в 3,35, а P_z – в 2,74 раза. Для моделирования тепловых явлений необходимо иметь информацию о силах P_z при обратном ходе стола, а также характер их изменения по ширине и глубине заготовки. Сказанное обусловило необходимость проведения данного исследования.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Опыты вели на плоскошлифовальном станке модели 3Е711В с прямоугольным столом, совершающим возвратно-поступательные перемещения, при вращении абразивного инструмента по часовой стрелке. В качестве объекта исследования служили образцы цилиндрической формы с размерами $D \times L$: 40 × 40 мм из быстрорежущей стали Р9М4К8 ($i = 1$), 47 × 50 мм из штамповой стали Х12 ($i = 2$), шлифуемые по торцу. Образцы предварительно прошли стандартную для инструмента термическую обработку. Режущим инструментом при шлифовании является нитридборовый круг нормальной пористости 1А1 СВН30 В107 100 ОV К27. Режим резания: скорость круга $v_k = 29$ м/с; $s_{\text{пр}} = 6$ м/мин; $s_{\text{п}} = 4$ мм/дв.ход (двойной ход); $t = 0,01$ мм; $z = 0,1$ мм;

⁶Кремень З.И., Буторин Г.И., Коломазин В.М. Технология обработки абразивным и алмазным инструментом: учебник. Л.: Машиностроение, 1989. 207 с.



СОЖ – 5-процентная эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-0014842-98), подаваемая поливом на заготовку в количестве 7–10 л/мин. Число дублирующих опытов $n = 30$. Опускание шпинделя на глубину резания вели в момент времени, когда стол с заготовкой смещался в крайнее левое положение относительно оператора. При использовании терминологии, принятой при цилиндрическом фрезеровании, рабочий ход стола ($q = 1$) выполняется по встречной схеме срезания металла, а обратный – выхаживающий ($q = 2$) – в условиях попутного шлифования.

Измерение сил P_y и P_z вели на динамометрическом комплексе фирмы Kistler [14], включающем динамометр модели 9257B, усилитель-преобразователь типа 5070A01110 и программное обеспечение DunoWare. При шлифовании образцы должны располагаться на столе динамометра строго по центру. Для этого использовали приспособление в виде плиты, которая 4-мя винтами крепилась к его столу, и стакана для крепления образцов $i = 1, 2$ винтами.

В качестве иллюстрации на рис. 1

приведены осциллограммы сил резания P_y (верхняя кривая) и P_z (нижняя кривая), записанные для двух двойных проходов продольного стола с заготовкой при двух поперечных подачах на двойной проход.

Наибольшие силы на участках 2, 6 соответствуют рабочему ходу, наименьшие в зонах 4, 8 – обратному (выхаживающему) проходу.

Из условий эксперимента известно, что круг имеет высоту (ширину) $B = 10$ мм и шлифование ведем при $s_n = 4$ мм/дв.ход, благодаря чему на первых 2–3-х проходах протекает увеличение ширины контакта круга с заготовкой. При этом в пределах первых 4 мм круг срезает металл, а на остальном переменном участке происходит выхаживание поверхности. Эта зона названа нами «участком врезания» ($j = 1$). При дальнейшем перемещении ($B \geq 10$ мм) круг начинает работать по всей своей высоте, на основании чего условия его работы приняты за стационарные ($j = 2$). Как только передний торец круга начинает выходить за пределы контакта с заготовкой, то ширина шлифования снижается и зона именована выходом ($j = 3$).

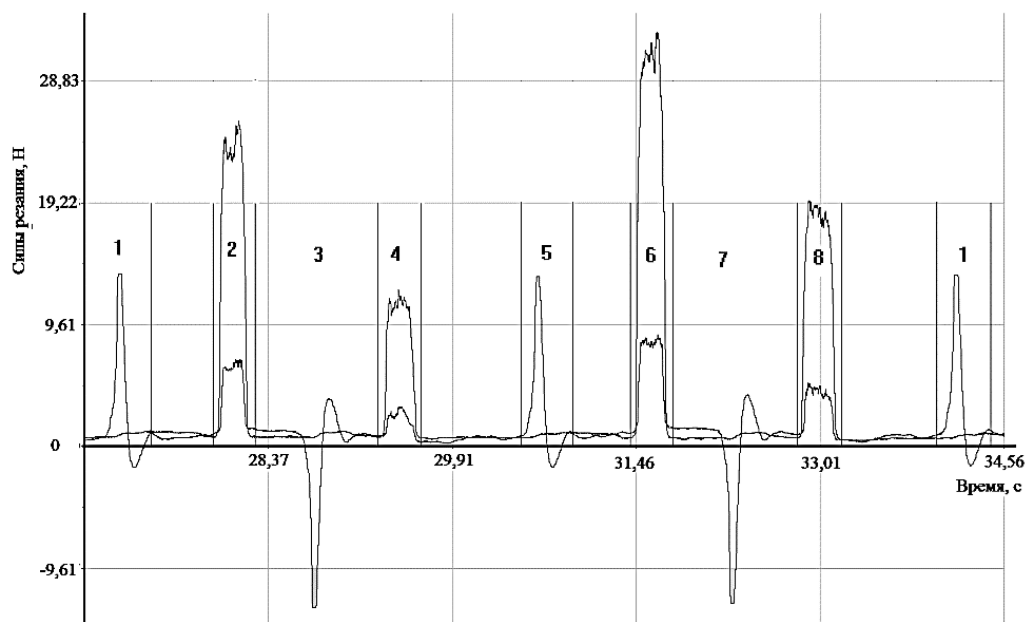


Рис. 1. Осциллограммы сил резания, где области: 2, 6 – врезание; 4, 8 – обратный ход; 1, 3, 5, 7 – реверс продольной подачи

Fig. 1. Oscillograms of cutting forces where the areas of 2, 6 – penetration; 4, 8 – reverse motion; 1, 3, 5, 7 – reverse of the longitudinal feed

Переменные условия шлифования необходимы для моделирования сил резания и в общем виде обозначены кодом (i, j, q) : $i = \overline{1,2}$, $j = \overline{1,3}$, $q = \overline{1,2}$. В качестве базовых моделей приняты полиномы:

$$\hat{P}_y = f(s_{\text{пр}}, s_{\text{п}}, t, z) \times k_{\text{my}i} \cdot k_{\text{пол} yj} \cdot k_{xyq} \cdot k_{\text{прох} y}, \quad (7)$$

$$\hat{P}_z = \psi(s_{\text{пр}}, s_{\text{п}}, t, z) \times k_{\text{mzi}} \cdot k_{\text{пол} zj} \cdot k_{xzq} \cdot k_{\text{прох} z}, \quad (8)$$

полученные методом полного факторного эксперимента с постоянными (детерминированными) коэффициентами с использованием множественного дисперсионного анализа (МДА) – модели I МДА [15]. В (7), (8) поправочные коэффициенты несут следующую смысловую нагрузку: $k_{\text{my}i}$, k_{mzi} , $i = \overline{1,2}$ – коэффициенты, учитывающие марку инструментальной стали; $k_{\text{пол} yj}$, $k_{\text{пол} zj}$, $j = \overline{1,3}$ – коэффициенты, учитывающие положение зоны шлифования по ширине круг-

лой заготовки; k_{xyq} , k_{xzq} , $q = \overline{1,2}$ – коэффициенты, учитывающие холостой проход продольного стола с заготовкой; $k_{\text{прох} y}$, $k_{\text{прох} z}$ – коэффициенты, учитывающие число проходов по глубине при снятии операционного припуска в установившейся зоне шлифования $j = 3$.

Методика получения базовых моделей (7), (8) описана в работах [16, 17]. В них поправочные коэффициенты равны единице при $i = q = 1$, $j = 2$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 и на рис. 2 представлены силы резания при шлифовании пластин Р9М4К8 по их ширине на 6-м двойном вре-
 зании по глубине.

В табл. 1 и на рис. 2 величина 16 мм учитывает врезание круга на полную высоту и его перебеги в конце прохода. Из представленных результатов видно, что

Таблица 1

Силы резания и коэффициенты шлифования при перемещении круга по ширине детали Р9М4К8 на 6-м проходе по глубине снимаемого припуска

Table 1

Cutting forces and grinding coefficients when moving the wheel by the width of the R9M4K8 part at the 6th depth pass of allowance removal

№ прохода	Рабочий ход, Н		Обратный ход, Н		$K_{\text{шл}}$ (6)	$K_{\text{шл}}^{\text{обр.}}$ (6)	$\frac{P_y^{\text{обр.}}}{P_y}$, %	$\frac{P_z^{\text{обр.}}}{P_z}$, %
	P_y	P_z	$P_y^{\text{обр.}}$	$P_z^{\text{обр.}}$				
4	0,5066	0,3540	0,3019	0,2357	0,6988	0,7808	59,59	66,58
8	27,3900	8,4840	6,3050	1,5810	0,3097	0,2508	23,02	18,64
12	40,0600	11,4300	15,1600	3,6740	0,2853	0,2423	37,84	32,14
16	41,7600	13,2400	17,1200	4,5230	0,3170	0,2642	41,00	34,16
20	47,7500	15,4100	20,9200	5,7430	0,3227	0,2745	43,81	37,27
24	46,8400	14,9400	19,1500	6,1650	0,3190	0,3219	40,88	41,27
28	46,4200	14,6800	20,8300	5,5600	0,3162	0,2669	44,87	37,87
32	44,4200	14,3700	19,9700	5,3890	0,3235	0,2699	44,96	37,50
36	46,7800	14,6200	20,5000	5,5240	0,3125	0,2695	43,82	37,78
40	44,4100	13,9100	21,8100	5,9270	0,3132	0,2718	49,11	42,61
44	37,2400	11,7600	16,4700	4,5170	0,3158	0,2743	44,23	38,41
48	19,1500	5,7310	6,8300	1,7640	0,2993	0,2583	35,67	30,78
52	2,1910	1,0010	0,6531	0,4150	0,4569	0,6354	29,81	41,46

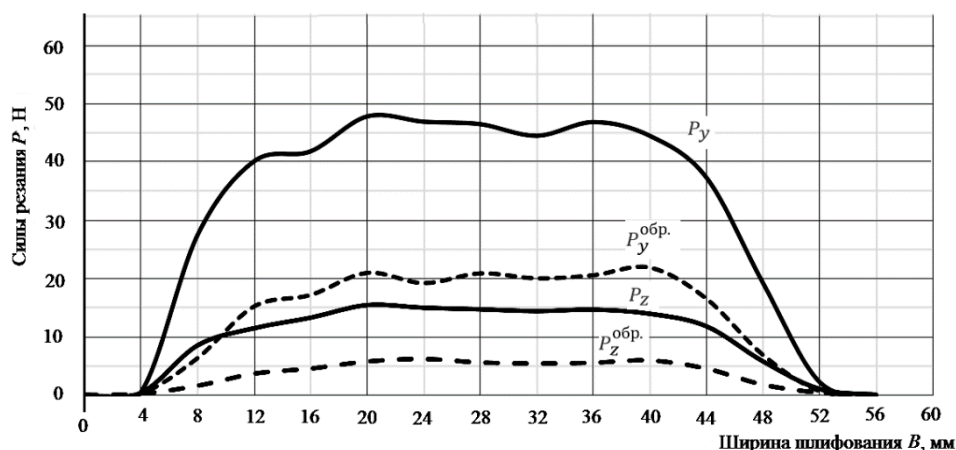


Рис. 2. Характер изменения сил резания при врезании круга в деталь Р9М4К8 по ширине (D+16) мм на 6-м проходе по глубине
Fig. 2. Cutting forces behavior at wheel penetration in a R9M4K8 part by the width of (D+16) mm on the 6th depth pass

наибольшие силы P_y , P_z имеют место на рабочем ходе при врезании круга в деталь в диапазоне $B = 20 - 28$ мм. На обратном холостом ходе силы $P_{y(хол)}^{max}$, $P_{z(хол)}^{max}$ смещаются до $B = 40$ мм. При этом коэффициент $K_{шл}$, напротив, снижается от 0,699 до 0,31 на рабочем ходе и от 0,78 до 0,27 при возвращении продольного стола в исходное положение. Рост сил P_y , P_z обусловлен увеличением ширины шлифования, а снижение коэффициента (6) – неполным срезанием металла в результате упругих отжатий шпинделя в пределах зазора в подшипниках станка. Как отмечено ранее, холостой ход стола выполняется без опускания круга на глубину t , поэтому в наибольшей мере снижается усилие P_z и отношение $\frac{P_z^{обр.}}{P_z}$ от 66,58 до 37,5%. В то же время отношение $\frac{P_y^{обр.}}{P_y}$ – только от 59,59 до 41–42%. Следует отметить, что силы P_y , P_z оказались при выходе из зоны шлифования в 1,5 раза меньше, чем при врезании. Сказанное обусловлено снижением ширины контакта круга с заготовкой на последних двух поперечных подачах.

При снятии операционного припуска $z = 0,1$ мм возрастание сил не обнаружено. Например, как при абразивном шлифовании титанового сплава в работе [9]. Аналогичные результаты по глубине снимаемого

припуска подтверждены при шлифовании быстрорежущих пластин торцом чашечного круга из КНБ. В установившейся зоне шлифования рекомендуется использовать поправочные коэффициенты:

$$k_{прох y} = k_{прох z} = 1.$$

В табл. 2 представлены средние силы $\bar{P}_y$, $\bar{P}_z$ при всех 10-ти прямых и обратных проходах по глубине шлифования с учетом положения круга по ширине образцов из сталей Р9М4К8, Х12.

Из табл. 2 видно, что силы резания при шлифовании штамповой стали Х12 ($i = 2$) оказались больше, чем для стали Р9М4К8: $k_{my2} = 1,21$, $k_{mz2} = 1,36$.

При этом коэффициент $K_{шл}$ однозначно оказался наименьшим в стационарной зоне ($j = 2$), в которой отмечены наиболее неблагоприятные условия шлифования вследствие наибольшего контакта круга с заготовкой: $\bar{K}_{шл} = 0,23 - 0,25$ – на рабочем ходе, $\bar{K}_{шл}^{(обр)} = 0,28 - 0,31$ – на обратном (выхаживающем) ходе. Очевидно, что наименьшие (6) имеют место при шлифовании сталей Р9М4К8, хотя силы P_y , P_z – также наименьшие.

Сказанное обусловлено тем, что при шлифовании стали Р9М4К8 в большей мере снижаются тангенциальные усилия по всем зонам $j = \overline{1,3}$: в 1,28–1,45 раза. В аналогичной ситуации сила P_y имеет

Таблица 2

Средние силы $\bar{P}_y$ и $\bar{P}_z$ и коэффициенты шлифования $\bar{K}_{шл}$, $\bar{K}_{шл}^{обр.}$ для сталей Р9М4К8 и Х12 по ширине образцов при всех 10-ти проходах съема операционного припуска

Table 2

Average forces $\bar{P}_y$ and $\bar{P}_z$ and grinding coefficients $\bar{K}_{шл}$, $\bar{K}_{шл}^{обр.}$ for the steels R9M4K8 and X12 by sample width at all 10 passes of operational allowance removal

Положение круга (j)	Сталь i	Рабочий ход, Н		Обратный ход, Н		$\bar{K}_{шл}$ (6)	$\bar{K}_{шл}^{обр.}$ (6)	$\frac{\bar{P}_y^{обр.}}{\bar{P}_y}$, %	$\frac{\bar{P}_z^{обр.}}{\bar{P}_z}$, %
		$\bar{P}_y$	$\bar{P}_z$	$\bar{P}_y^{обр.}$	$\bar{P}_z^{обр.}$				
Врезание (1)	1	15,84	4,90	4,24	1,30	0,31	0,31	26,77	26,61
	2	20,24	6,85	5,24	1,86	0,34	0,35	25,86	27,07
Стационарное (2)	1	42,17	9,76	10,93	3,01	0,23	0,27	25,93	30,81
	2	50,03	12,49	12,04	3,84	0,25	0,32	24,06	30,78
Выход круга (3)	1	12,11	3,81	3,87	1,08	0,31	0,28	31,97	28,44
	2	14,55	5,11	4,88	1,57	0,35	0,32	33,55	30,70

Примечание: i = 1 – Р9М4К8, i = 2 – Х12.

уменьшение в меньшей мере: в 1,2–1,28 раза. Вышесказанное свидетельствует о том, что уменьшение (6) не во всех случаях шлифования связано с ростом нагрузки на круг. По результатам, приведенным в табл. 2, получены коэффициенты к моделям (7), (8) по переходным зонам положения: $k_{пол y1} = 0,41$; $k_{пол z1} = 0,49$ и $k_{пол y3} = 0,36$; $k_{пол z3} = 0,39$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые получены поправочные коэффициенты: $(k_m, k_{пол j}, k_{xq}, k_{прох})_{(y,z)}$ к базовым моделям (7), (8), позволяющие моделировать силовые и температурные явления в зоне плоского шлифования сталей Р9М4К8 и Х12.

Библиографический список

- Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов // Тонкие наукоемкие технологии. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 616 с.
- Федоров Д.Г., Скуратов Д.Л. Экспериментальное исследование качества поверхностного слоя и сил резания при плоском шлифовании титанового сплава ВТ6 // Вестник Самарского аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королева. 2015. Т. 14. № 3-2. С. 400–408. <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2015-14-3-400-408>
- Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
- Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управлении качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.
- Эльянов В.Д., Куликов В.И. Прижоги при шлифовании. М.: НИИМАШ, 1974. 63 с.
- Безъязычный В.Ф., Прокофьев М.А. Вопросы оптимизации режимов плоского шлифования по параметрам качества поверхностного слоя высоконагруженных деталей из жаропрочных сплавов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2008. № 8. С. 2–4.
- Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Орлов С.В., Сара-

- зов А.В. Плоское шлифование торцов колец крупногабаритных подшипников с требуемым качеством поверхности // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. 2014. Т. 14. № 4. С. 67–78.
- Воронов С.А., Киселёв И.А., Ма Вэйдонг, Ширшов А.А. Имитационная динамическая модель процесса шлифования сложнопрофильных деталей. Развитие методов моделирования // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 5. С. 40–58. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-dinamicheskaya-model-protsesta-shlifovaniya-slozhnoprofilnyh-detaley-razvitie-metodov-modelirovaniya/viewer> (25.01.19). <https://doi.org/10.7463/0515.0766577>
- Киселев И.А., Воронова И.С., Ширшов А.А., Николаев С.М. Имитационная динамическая модель процесса шлифования сложнопрофильных деталей. Модель инструмента и обрабатываемой детали // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 9. С. 1–16. [Электронный ресурс]. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/814388.html> (25.01.19). <https://doi.org/10.7463/0915.0814388>



10. Никитин С.П. Моделирование процесса резания при шлифовании с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12. № 4. С. 61–65.
11. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Раб А.Ф. Основы алмазного шлифования. Киев: Техника, 1978. 192 с.
12. Никифоров И.П. Современные тенденции шлифования и абразивной обработки. Старый Оскол: ТНТ, 2017. 560 с.
13. Утенков В.М., Быков П.А. Возможности использования динамометра Kistler для испытания металлорежущих станков // Инженерный вестник: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 10. С. 1–23. [Электронный ресурс]. URL: <http://engsi.ru/doc/492011.html> (27.01.19).
14. Кендалл М., Стюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды / пер. с англ. М.: Наука, 1976. 736 с.

15. Солер Я.И., Нгуен Чи Киен. Построение моделей и предсказание отклонений от плоскостности поверхностей деталей из сплава 1933T2 при многопроходном шлифовании // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 2. С. 64–73.
16. Soler Ya.I., Chi Kien Nguyen. Modeling of the surface microrelief during multi-pass grinding of parts of variable rigidity from alloy 1933T2 // Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017. Vol. 9. № 1S. P. 1327–1340. <https://doi.org/10.4314/jfas.v9i1s.768>
17. Урывский Ф.П., Солер Я.И. Исследование сил резания при торцовом шлифовании быстрорежущих сталей алмазными и боразоновыми кругами // Производительность, качество обработки и надежность в эксплуатации изделий из жаропрочных и титановых сплавов: сб. статей. Куйбышев: Изд-во КуАИ, 1970. Вып. 43. С. 22–28.

References

1. Nosenko VA, Nosenko SV. *Metal grinding technology*. Staryj Oskol: Tonkie naukoemkie tekhnologii; 2013, 616 p. (In Russ.)
2. Fedorov DG, Skuratov DL. Experimental research of the surface layer quality and cutting forces in flat grinding of the BT6 titanium alloy. *Vestnik Samarskogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S.P. Koroleva* = Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2015;14(3-2):400–408. <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2015-14-3-400-408> (In Russ.)
3. Starkov VK. *Grinding with highly porous wheels*. Moscow: Mashinostroenie; 2007, 688 p. (In Russ.)
4. Sipajlov V.A. *Thermal processes at grinding and surface quality control*. Moscow: Mashinostroenie; 1978, 167 p. (In Russ.)
5. Jel'janov VD, Kulikov VI. *Burn marks at grinding*. Moscow: NIIMASH; 1974, 63 p. (In Russ.)
6. Bez'yazychnyj VF, Prokofev MA. Optimization issues of flat grinding modes by surface layer quality parameters of highly loaded parts from heat-resistant alloys. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal s prilozheniem* = Handbook. Engineering Journal with the application. 2008;8:2–4. (In Russ.)
7. Nosenko VA, Tyshkevich VN, Orlov SV, Sarazov AV. Flat grinding of big bearing races end with the demanded quality of a surface. *Vestnik yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie* = Bulletin of the South Ural State University. 2014;14(4): 67–78. (In Russ.)
8. Voronov SA, Kiselyov IA, Ma Weidong, Shirshov AA. Numerical simulation of a grinding process model for the spatial work-pieces: development of modeling techniques. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Bauman* = Science and Education: scientific edition of Bauman MSTU. 2015;5:40–58. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-dinamicheskaya-model-protsesta>

shlifovaniya-slozhnoprofilnyh-detaley-razvitiye-metodov-modelirovaniya/viewer [Accessed 25th January 2019]. (In Russ.) <https://doi.org/10.7463/0515.0766577>
9. Kiselev IA, Voronova IS, Shirshov AA, Nikolaev SM. Numerical simulation of a grinding process for the spatial work-pieces: a model of the work-piece and grinding wheel. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Bauman* = Science and Education: scientific edition of Bauman MSTU. 2015;9:1–16. Available from: <http://technomag.bmstu.ru/doc/814388.html> [Accessed 25th January 2018]. (In Russ.) <https://doi.org/10.7463/0915.0814388>
10. Nikitin SP. Modeling of cutting operation in grinding subject to coupling elastic and thermal systems. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of Ufa State Aviation Technical University. 2009;12(4):61–65. (In Russ.)
11. Semko MF, Grabchenko AI, Rab AF. *Basics of diamond grinding*. Kiev: Tekhnika; 1978, 192 p.
12. Nikiforov IP. *Modern trends in grinding and abrasive processing*. Staryj Oskol: Tonkie naukoemkie tekhnologii; 2017, 560 p. (In Russ.)
13. Utenkov VM, Bykov PA. Possibilities of using the Kistler dynamometer for testing metal-cutting machine tools. *Inzhenernyj vestnik nauchnoe izdanie Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Bauman* = Engineering Bulletin: scientific edition of Bauman MSTU. 2012;10:1–23. Available from: <http://engsi.ru/doc/492011.html> [Accessed 27th January 2019]. (In Russ.)
14. Kendall M, Styuart A. Multidimensional statistical analysis and time series, 1976, 736 p. (Russ. ed.: *Mnogomernyj statisticheskij analiz i vremennye ryady*. Moscow, Nauka, 1976, 736 p.)
15. Soler YaI, Nguyen Chi Kien. Model building and prediction flatness surfaces of details from 1933T2 alloy at multipass grinding. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* = Fundamental and Ap-

plied Problems of Technics and Technology. 2016;2:64–73. (In Russ.)

16. Soler YaI, Chi Kien Nguyen. Modeling of the surface microrelief during multi-pass grinding of parts of variable rigidity from alloy 1933T2. Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017;9(1S):1327–1340.

17. Uryvskij FP, Soler YaI. Studying cutting forces at face grinding of high-speed steels with diamond and

borazon wheels. In: *Proizvoditel'nost', kachestvo obrabotki i nadezhnost' v ekspluatatsii izdelij iz zharno-prochnykh i titanovykh splavov* = Productivity, processing quality and operation reliability of products from heat-resistant and titanium alloys: collected articles. Kujbyshev: S. P. Korolev Kuibyshev aviation Institute; 1970, issue 43, p. 22–28. (In Russ.)

Критерии авторства

Солер Я.И., Прокопьева А.В., Дроzhzhин С.Н. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Soler Ya.I., Prokopyeva A.V., Drozhzhin S.N. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Солер Яков Иосифович,

кандидат технических наук,
профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: solera@istu.edu

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yakov I. Soler,

Cand. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Mechanical Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: solera@istu.edu

Прокопьева Альбина Валерьевна,

старший преподаватель кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: albanoisa@yandex.ru

Albina V. Prokopyeva,

Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: albanoisa@yandex.ru

Дроzhzhин Сергей Николаевич,

старший преподаватель кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: drojzin@istu.edu

Sergey N. Drozhzhin,

Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: drojzin@istu.edu