

УДК 621.923+531.44:620.178

**В. И. Бутенко**, д-р техн. наук, проф.  
Донской государственный технический университет  
E-mail: [butenkowjktor@yandex.ru](mailto:butenkowjktor@yandex.ru)

## КРИТЕРИИ ВЫБОРА ЭФФЕКТИВНЫХ СОСТАВОВ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Предложено в качестве критериев выбора эффективных составов абразивных инструментов для финишной обработки поверхностей деталей машин из хромоникелевых сталей и сплавов использовать коэффициент шлифовального круга и удельную накопленную энергию деформации, которые не зависят друг от друга. Показано, что коэффициент шлифовального круга характеризует работоспособность абразивного инструмента, а удельная накопленная энергия деформации предопределяет эксплуатационные показатели качества обработанной поверхности детали.*

**Ключевые слова:** деталь, поверхностный слой, шлифовальный круг, состав, энергия деформации, мощность, эффективность.

**V. I. Butenko**

## CRITERIA FOR THE EFFECTIVE COMPOSITIONS ABRASIVE TOOLS SELECTION FOR PROCESSING SURFACES OF MACHINE PARTS

*It is proposed to use the grinding wheel coefficient and the specific accumulated strain energy, which are independent of each other, as criteria for choosing effective abrasive tools compositions for finishing surface machine parts treatment made of chromium-nickel steels and alloys. It is shown that the grinding wheel coefficient characterizes abrasive tool performance and the specific accumulated strain energy determines the operational quality indicators machined surface of part.*

**Keywords:** part, surface layer, grinding wheel, composition, strain energy, power, efficiency.

### 1. Введение

Обеспечение эксплуатационных показателей качества поверхностного слоя на этапе механической обработки деталей во многом определяется правильно выбранными способами финишной обработки, среди которых ведущее место занимает процесс шлифование. Однако высокая скорость нагрева материала в зоне обработки в сочетании с пластической деформацией формируют в материале поверхностного слоя не только значительные по величине остаточные напряжения растяжения, но и дефекты в виде прижогов, микротрещин и флокенов, существенно снижающих эксплуатационные свойства детали. В работе [1] показано, что повысить эффективность процесса шлифования поверхностей деталей можно за счёт использования модифицированной абразивной массы для изготовления шлифовальных кругов. Однако большое количество вариантов такого модифицирования (в том числе, за счёт импрегнирования шлифовальных кругов [2]) и отсутствие обоснованных критериев их выбора не позволяет эффективно применять имеющиеся решения при обработке различных конструкционных материалов. Актуальность решения этой проблемы обусловлена широким использованием в современном машиностроительном производстве деталей, изготавливаемых из труднообрабатываемых хромоникелевых высоколегированных сталей и сплавов, к поверхностям которых предъявляются высокие требования, исключающие наличие на них прижогов, микротрещин и других дефектов при одновременном повышении производительности операции шлифования и снижения её себестоимости.

### 2. Основное содержание и результаты работы

Процесс шлифования поверхностей деталей, как любой процесс резания металлов, решает задачу обеспечения установленных технических требований к обрабаты-

емой детали при минимальной себестоимости её изготовления. Предварительными исследованиями установлено, что для решения вышеуказанной задачи необходимо определить критерий выбора наиболее эффективного состава шлифовального круга и режимов обработки с учётом ограничений, обусловленных точностью изготовления детали и требованиями качества поверхностного слоя (допустимой высотой шероховатости, минимизацией прижогов, величиной технологических остаточных напряжений и т.д.). Обработка экспериментальных данных показала, что таким критерием может быть коэффициент шлифовального круга  $K_{шк}$ , определяемый по формуле

$$K_{шк} = \frac{\sigma_m \cdot J_m}{N}, \quad (1)$$

где  $\sigma_m$  – предел текучести обрабатываемого материала, Па;

$J_m$  – интенсивность съёма металла, м<sup>3</sup>;

$N$  – мощность, затрачиваемая на процесс шлифования, Вт.

Как показали исследования, коэффициент  $K_{шк}$  является индивидуальным для каждого конкретного шлифовального круга, определяется его составом и состоянием и не зависит от режимов обработки детали, т.к. с их изменением изменяется и мощность  $N$ . С увеличением коэффициента  $K_{шк}$  производительность обработки увеличивается, а мощность  $N$ , затраченная на процесс шлифования, уменьшается, что обеспечивает снижение себестоимости обработки. При шлифовании поверхностей деталей из железоуглеродистых сплавов величина коэффициента  $K_{шк}$  изменяется в диапазоне  $(0,95 - 2,53) \times 10^{-4}$  в зависимости от вида используемого абразивного материала, его зернистости, состава абразивной массы, вида и твёрдости связки, пористости и других факторов, характеризующих шлифовальный круг.

Для выявления зависимости коэффициента  $K_{шк}$  от характеристики и состояния используемого шлифовального круга и влияния его на эффективность шлифования на круглошлифовальном станке мод. 3М151 были обработаны образцы из стали 12Х2Н4А диаметром 30 мм и длиной 320 мм. Испытаниям подвергались шлифовальные круги из электрокорунда нормального 14А и 24А, зернистости F 60 и F 100, среднемягкой твёрдости К7, на керамической связке V (ГОСТ Р 52587-2006). Использовались круги типа ПП ГОСТ 2424-83 размерами  $D \times d \times B = 400 \times 127 \times 60$  мм при следующих их состояниях: стандартном, состава по патенту №2672973 [3], импрегнированных диоксидом хрома по патенту №2620209 [4], импрегнированных диоксидом хрома по патенту №2703063 [5]. Шлифование образцов осуществлялось при скорости резания  $V_{кр} = 34,8$  м/с, скорости вращения образцов  $V_d = 0,314$  м/с, продольной подаче  $S_{пр} = 0,02$  м/с, подаче врезания (глубине резания)  $S_{вр} = 0,01$  мм/дв.ход. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовался 5-процентный водный раствор эмульсола Укринол-1. Оценка эффективности шлифования осуществлялась по периоду стойкости шлифовального круга между двумя последовательными переточками  $T$ , параметру шероховатости обработанной поверхности  $Ra$  и относительной площади прижогов  $S$ .

Для определения мощности  $N$ , затраченной на процесс шлифования, предварительно определялась доля мощности электродвигателя привода станка  $N_{пр}$ , затрачиваемая на процесс шлифования образцов из стали 12Х2Н4А стандартными кругами при заданных режимах резания. Используя 3-х компонентный динамометр, определялся крутящий момент на обрабатываемом образце  $M$  и вычислялась мощность  $N = M \times n_d$ , где  $n_d$  – частота вращения образца в об/с. По формуле  $g = N/N_{пр}$  вычислялась доля мощности электродвигателя привода станка, затрачиваемая на процесс шлифования, которая для исследуемых образцов из стали 12Х2Н4А составила  $g = 0,35$ .

В табл. 1 приведены результаты исследования эффективности шлифовальных кругов и их коэффициентов  $K_{шк} = K_{шк}' \times 10^{-4}$  при обработке образцов из стали 12Х2Н4А, из анализа которой следует, что чем выше значение коэффициента  $K_{шк}$ , тем выше стойкость шлифовального круга  $T$  и ниже значения параметров качества обработанных поверхностей  $Ra$  и  $S$ .

Таблица 1. – Результаты исследования эффективности шлифовальных кругов и их коэффициентов  $K_{шк}$  при обработке стали 12Х2Н4А

Характеристика круга		Состояние используемого шлифовального круга	Эффективность шлифования			$K_{шк} \times 10^{-4}$
электрокорунд	зернистость		$T$ , мин.	$Ra$ , мкм	$S$ , %	
14А	F60	Стандартное	15,8	2,65	21,3	1,13
		Состава по патенту №2672973 [3]	32,4	1,98	15,9	1,57
		Импregnированный по патенту №2620209 [4]	40,2	1,66	12,2	1,74
		Импregnированный по патенту №2703063 [5]	42,3	1,43	10,1	2,06
24А	F100	Стандартное	17,2	2,5 2	18,9	1,27
		Состава по патенту №2672973 [3]	38,9	1,74	13,8	1,60
		Импregnированный по патенту №2620209 [4]	43,4	1,42	10,5	1,81
		Импregnированный по патенту №2703063 [5]	45,7	1,21	9,5	2,18

В работах [6, 7] показано, что качественные показатели обработанной поверхности детали коррелируют с удельной накопленной энергией деформации  $\mathcal{E}_{yд}$ , которая может быть определена через энергетический критерий  $K_E = \mathcal{E}_a/A_{ш}$ , где  $\mathcal{E}_a$  - скрытая энергия деформации,  $A_{ш}$  – общая работа шлифования [6 – 8]:

$$\mathcal{E}_{yд} = \frac{\mathcal{E}_a}{V_{кр} \cdot s_{np}}, \frac{Дж}{м^2}, \tag{2}$$

где  $V_{кр}$  – высота шлифовального круга, м;  $s_{np}$  – продольное перемещение шлифовального круга в секунду, измеряемое в м.

Так как  $N = \frac{A_{ш} \cdot S_{np}}{L}$ ,  $\mathcal{E}_a = A_{ш} \cdot K_E$ , то с учётом формул (1) и (2) после соответствующих преобразований получаются следующие зависимости между коэффициентами  $K_{шк}$  и  $K_E$ :

при круглом шлифовании поверхностей деталей

$$K_{шк} = \frac{\pi \cdot d_d \cdot \sigma_m}{\mathcal{E}_{yд} \cdot s_{np}} \cdot K_E; \tag{3}$$

при плоском шлифовании поверхностей деталей

$$K_{\text{шк}} = \frac{\sigma_m \cdot L}{\mathcal{E}_{\text{уд}} \cdot s_{\text{пр}}} \cdot K_E, \quad (4)$$

где  $d_d$  – диаметр обрабатываемой детали в м;

$L$  – длина обрабатываемой поверхности детали в м.

Величина удельной накопленной энергии деформации  $\mathcal{E}_{\text{уд}}$  может быть вычислена по параметрам кривой деформационного течения металла, используя зависимость [8]:

$$\mathcal{E}_{\text{уд}} = \frac{Q}{\alpha^2 \cdot G} (\sigma - \sigma_{0,2})^2, \quad (5)$$

где  $Q$  – коэффициент пропорциональности, принимаемый в соответствии с кривой деформационного течения железоуглеродистых сплавов равный 0,5 – 1,0;

$G$  – модуль сдвига материала детали, Па;

$\alpha$  – параметр междислокационного взаимодействия [9];

$\sigma_{0,2}$  – напряжение начала пластического течения материала, Па; согласно выполненным исследованиям [10] величина напряжения  $\sigma_{0,2}$  для железоуглеродистых сплавов может быть принята равной экспериментально определённому напряжению сцепления контактирующих материалов;

$\sigma$  – напряжение, необходимое для перемещения подвижных дислокаций, определяемое по формуле [11]

$$\sigma = \sigma_m \cdot \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho}; \quad (6)$$

здесь  $b$  – вектор Бюргерса;

$\rho$  – плотность дислокаций,  $\text{см}^{-2}$ .

Для практического определения величины удельной накопленной энергии деформации  $\mathcal{E}_{\text{уд}}$  при шлифовании цилиндрических деталей разработана и изготовлена специальная установка, в основе которой был использован метод сканирующей калориметрии, реализованный в дифференциальной двухстадийной схеме измерения разности тепловыделения в двух рабочих ячейках, содержащих исследуемый образец и эталон [12].

Выполнены экспериментальные исследования по установлению связи между  $\mathcal{E}_{\text{уд}}$  и  $K_{\text{шк}}$  ( $K_{\text{шк}}' \times 10^{-4}$ ) при круглом наружном шлифовании цилиндрических деталей из стали 12Х2Н4А и сплава ЖС-6 с использованием как стандартных, так и изменённых по составу кругов. Результаты исследований приведены в табл. 2, анализ которых свидетельствует о том, что величина удельной накопленной энергии деформации  $\mathcal{E}_{\text{уд}}$  и коэффициент шлифовального круга  $K_{\text{шк}}$  являются параметрами, зависящими от характеристики используемого круга и его состояния, причём для каждого обрабатываемого материала эта зависимость индивидуальна. При этом следует отметить, что с уменьшением величины удельной накопленной энергии деформации  $\mathcal{E}_{\text{уд}}$  при использовании шлифовальных кругов, защищённых патентами, коэффициент шлифовального круга  $K_{\text{шк}}$  увеличивается. Это свидетельствует о том, что использование шлифовальных кругов, защищённых патентами, обеспечивает повышение качества поверхностного слоя (например, снижение технологических остаточных напряжений растяжения) и увеличение работоспособности абразивного инструмента по удельному съёму металла и стойкости шлифовального круга. При этом следует иметь в виду,

Таблица 2. – Результаты исследования взаимосвязи между удельной накопленной энергией деформации  $\mathcal{E}_{уд}$  и коэффициентом  $K_{шк}$ 

Характеристика круга		Состояние используемого шлифовального круга	Обрабатываемый материал	$\mathcal{E}_{уд}$ , Дж/м <sup>2</sup>	$K_{шк}' \times 10^{-4}$
электрокорунд	зернистость				
14А	F60	Стандартное	сталь 50ХН	0,786	1,18
			сплав ЖС-6	0,892	1,06
		Состава по патенту №2672973 [2]	сталь 50ХН	0,542	1,65
			сплав ЖС-6	0,709	1,49
		Импрегнированный по патенту №2620209 [3]	сталь 50ХН	0,503	1,84
			сплав ЖС-6	0,674	1,55
		Импрегнированный по патенту №2703063 [4]	сталь 50ХН	0,487	1,98
			сплав ЖС-6	0,652	1,72
24А	F100	Стандартное	сталь 50ХН	0,684	1,07
			сплав ЖС-6	0,845	1,05
		Состава по патенту №2672973 [2]	сталь 50ХН	0,539	1,56
			сплав ЖС-6	0,661	1,47
		Импрегнированный по патенту №2620209 [3]	сталь 50ХН	0,496	1,62
			сплав ЖС-6	0,627	1,59
		Импрегнированный по патенту №2703063 [4]	сталь 50ХН	0,435	1,81
			сплав ЖС-6	0,583	1,70

что при выборе эффективного шлифовального круга, его состава и состояния по критерию  $K_{шк}$  важно знать мощность  $N$ , которая определит себестоимость обработки детали. В связи с этим были выполнены исследования зависимости между  $K_{шк}$  и  $N$ . Обработке подвергались образцы выше указанных размеров из сталей 12Х2Н4, 20ХН, 35ХГСА, 50ХН, Х18Н9Т и сплавов 45Х25Н20С2А, ХН62МВКЮ, ХН77ТЮР, ЖС-6, находящиеся как в сыром состоянии, так и после термической обработки. Использовались круги ПП 400×127×60 из электрокорунда нормального 14А и 24А, зернистости F60 и F100, на керамической связке V, среднемягкой твёрдости К7 (ГОСТ Р 52781-2006, ГОСТ Р 52781-2007). При постоянной скорости резания  $V_{кр} = 34,8$  м/с остальные режимы варьировались в пределах:  $V_d = (0,157 - 0,471)$  м/с,  $S_{np} = (0,15 - 0,30)$  м/с,  $S_{вp} = (0,01 - 0,02)$  мм/об. Состояние использованных в экспериментальных исследованиях шлифовальных кругов соответствовало данным табл. 1.

Результаты исследований приведены на рис. 1, из анализа которого следует, что независимо от обрабатываемого материала с увеличением коэффициента  $K_{шк}$  мощность  $N$ , затрачиваемая на процесс шлифования, уменьшается.

Учитывая рекомендации, изложенные в работе [13], была определена следующая последовательность выбора эффективных составов и состояния абразивных инструментов для финишных операций обработки деталей:

- 1) проводится предварительная (пробная) обработка шлифованием деталей кругами, имеющими разное состояние и состав;
- 2) определяются величины  $\mathcal{E}_{уд}$  и  $K_{шк}$ ;

3) принимается тот шлифовальный круг, который в процессе шлифования обеспечивает наибольшее значение коэффициента  $K_{шк}$  и наименьшую величину удельной накопленной энергии деформации  $\mathcal{E}_{y\delta}$  в материале поверхностного слоя обрабатываемой детали с учётом того, что наибольшее значение  $K_{шк}$  определяет минимальную мощность шлифования, а величина  $\mathcal{E}_{y\delta}$  – качественные показатели поверхностного слоя обработанной детали;

4) проводится проверка соответствия полученных показателей качества поверхностного слоя обработанных деталей их заданным значениям.

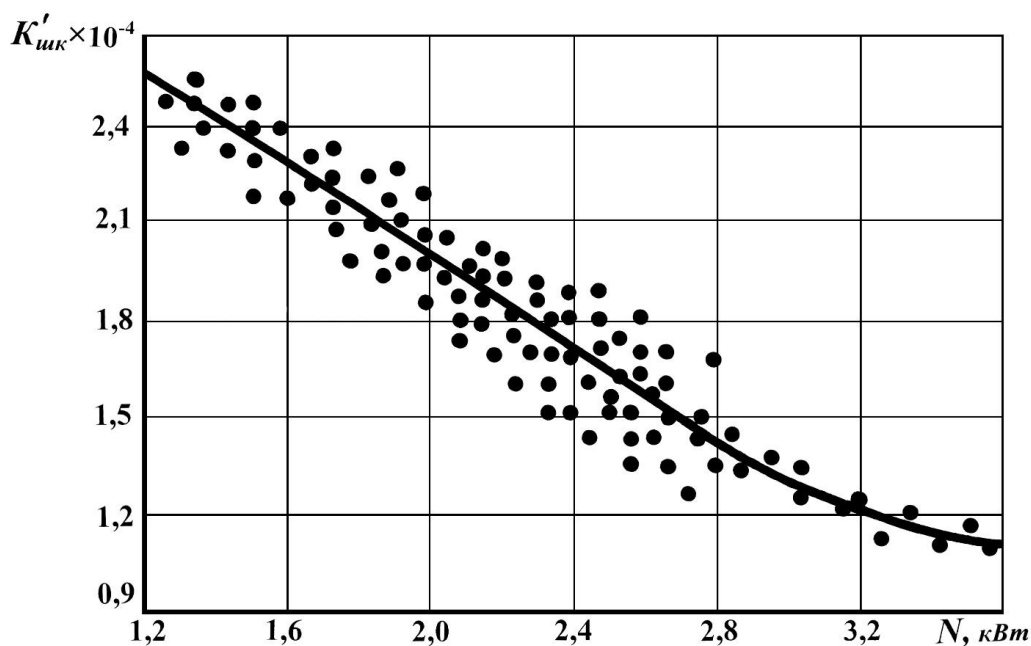


Рисунок 1. Зависимость между коэффициентом  $K_{шк}$  и мощностью шлифования  $N$

Предложенная последовательность выбора эффективных составов и состояния шлифовальных кругов по критериям  $K_{шк}$  и  $\mathcal{E}_{y\delta}$  была использована при разработке технологий механической обработки ступенчатых валов редуктора из стали 35ХГСА и направляющих кареток из стали ШХ15 передвижной сушильной установки, изготавливаемой на ОАО «Майкопский редукторный завод». Было рекомендовано для шлифования шеек валов использовать круги, импрегнированные диоксидом хрома круги [4], а для шлифования плоских поверхностей направляющих кареток использовать круги, содержащие в своём составе древесную золу [2]. В результате стойкость кругов повысилась почти в 2 раза, был исключён брак деталей, на (10 – 15)% снижена себестоимость их обработки и в 1,5 – 1,8 раза увеличен ресурс деталей.

### 3. Заключение

Таким образом, предложенные критерии выбора состава и состояния абразивных инструментов при финишной обработке поверхностей деталей машин позволяют из большой гаммы предлагаемых составов и состояний шлифовальных кругов выбрать тот, который будет наиболее эффективным по работоспособности и стойкости, а также обеспечит требуемое качество поверхностного слоя деталей, изготавливаемых из конкретной стали или сплава.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бутенко, В. И. Бездефектное шлифование поверхностей деталей машин (библиотека технолога) / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 60 с.
2. Бутенко, В. И. Финишная обработка поверхностей деталей: способы, устройства, инструменты / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2016. – 219 с.
3. Патент 2672973 Российская Федерация, МПК В24Д 3/34. Масса для изготовления абразивного инструмента / В.И. Бутенко. – 2017. Бюл. № 33.
4. Патент 2620209 Российская Федерация, МПК В24Д 3/34. Способ импрегнирования абразивных инструментов / В.И. Бутенко. – 2017. Бюл. № 15.
5. Патент 2703063 Российская Федерация, МПК В24Д 3/34. Способ импрегнирования абразивных инструментов. / В. И. Бутенко, К. В. Давыденко. – 2018. Бюл. № 29.
6. Прокофьев, М. А. Методика оптимизации режимов плоского шлифования по заданным параметрам наклёпа поверхностного слоя деталей машин / М. А. Прокофьев // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьёва. – Рыбинск: Изд-во РГАТУ, 2007. – №1(11). – С. 29 – 34.
7. Тимофеев, М. В. Методика и аппаратура измерения накопленной энергии деформации в поверхностном слое деталей машин / М. В. Тимофеев, М. А. Прокофьев // Научно-технические технологии в машиностроении и двигателестроении (ТМ-2012): материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конференции. – Рыбинск: Изд-во РГАТУ, 2012. – Ч. II. – С. 25 – 29.
8. Прокофьев, М. А. Взаимосвязь скрытой энергии деформации с технологическими условиями механической обработки / М. А. Прокофьев, Н.В. Виноградова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №1. – С. 3 – 7.
9. Бутенко, В. И. Физико-технологические основы формирования управляемых структур сталей и сплавов / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 264 с.
10. Бутенко, В. И. Управление нанотрибологическими характеристиками поверхностей тяжело нагруженных опор и подшипников скольжения / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – 385 с.
11. Бутенко, В. И. Электронно-дислокационная теория контактного взаимодействия поверхностей твёрдых тел / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во Технологического ин-та ЮФУ, 2007. – 208 с.
12. Бутенко, В. И. Установка для определения энергетического состояния материала поверхностного слоя детали / В. И. Бутенко, К. В. Давыденко, Т. С. Сосницкая // Инженер. Студенческий науч.-техн. журнал. – № 2(28). – 2019. – С. 24 – 28. <http://tm.donntu.org>.
13. Безъязычный, В. Ф. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей машин при упрочнении в процессе шлифования / В. Ф. Безъязычный, М. А. Прокофьев, А. Н. Сутягин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №1. – С. 3 – 6.

Поступила в редколлегию 14.01.2021г.