

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ИЗНОСА КРУГА С ПАРАМЕТРАМИ ПЛОСКОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ченин В.В.<sup>1</sup>, Носенко В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Волжский политехнический институт (филиал) ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет», Волжский, Россия (404121, Волгоградская обл., г. Волжский, ул. Энгельса, д. 42а), e-mail: [chenin\\_vladimir@mail.ru](mailto:chenin_vladimir@mail.ru)

В статье рассматривается корреляция между радиальным износом и другими показателями процесса шлифования (шероховатость, составляющие силы шлифования на прямом и обратном проходах, их отношения, коэффициент режущей способности) пяти различных по обрабатываемости материалов кругом из электрокорунда в меняющихся условиях обработки. Исследовано, как изменение скорости шлифовального круга и технологической среды влияет на характер взаимосвязи между параметрами и износом. В результате установлено, что при шлифовании без СОЖ между составляющими силы шлифования и износом усиливается отрицательная корреляция. Замечено, что росту сильной положительной взаимосвязи между шероховатостью и износом способствуют снижение скорости при шлифовании всухую и её увеличение при обработке с СОЖ. Также установлено, что увеличение интенсивности съема металла в процессе шлифования электрокорундовым кругом исследуемых материалов на низкой скорости приводит к возрастанию износа круга. Выявлено и то, что на обратном ходе съема материала меньше, чем на прямом, и процесс приобретает более установившийся характер, что может свидетельствовать о стабильности изнашивания и прикладываемых силовых воздействий.

Ключевые слова: радиальный износ, корреляция, шероховатость, сила шлифования, коэффициент режущей способности, электрокорунд.

## THE RESEARCH OF CORRELATION OF RADIAL WEAR WITH THE PARAMETERS OF THE FLAT PLUNGE GRINDING OF DIFFERENT MATERIALS

Chenin V.V.<sup>1</sup>, Nosenko V.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Volzhsky Polytechnical Institute (branch of) State Educational Institution of Higher Professional Education 'Volgograd State Technical University', Volzhsky, Russia (42a Engelsa Street, Volzhsky, Volgograd region, 404121, Russian Federation), e-mail: [chenin\\_vladimir@mail.ru](mailto:chenin_vladimir@mail.ru)

The article analyzes the correlation between the radial wear and other indicators of the grinding process (the roughness, grinding force components in forward and backward passes, their ratio, the cutting capacity ratio) of five different on the machinability materials by the electrocorundum wheel in varying processing conditions. It's reported how a change of the speed and the technological environment affects to the nature of the relationship between the parameters and the radial wear. As a result, it's established that between the grinding force components and the radial wear the negative correlation increases by grinding without coolant. It's noticed that reduction of the speed when grinding is dry and its increase in the processing of a coolant contributes to the growth of a strong positive relationship between the roughness and the radial wear. Also it's established that increasing of the intensity of metal removal during in the grinding process by the electrocorundum wheel of the materials at low speed leads to increased of the radial wear. It's revealed the fact that on the backward pass, material removal is less than on forward, and the process becomes more established, it may indicate about the stability of the applied force and the wear effects.

Key words: radial wear, correlation, roughness, grinding force, cutting capacity ratio, electrocorundum.

### Введение

В настоящее время проблема эксплуатации шлифовального круга конкретной характеристики в разных технологических условиях стала актуальной. Это вызвано переходом машиностроительного производства в разряд среднесерийного и мелкосерийного. Машиностроительным предприятиям, вынужденным постоянно осваивать выпуск новых

изделий и изготавливать их сравнительно небольшими партиями, не выгодно для каждой партии деталей подбирать новую характеристику круга, как рекомендуют нормативы.

Радиальный износ круга ( $\Delta R$ ) является одним из важнейших параметров процесса шлифования, на который влияет огромное количество внешних факторов. Для оценки обрабатываемости различных металлов и сплавов резанием применяются не только этот параметр, но и такие, как шероховатость  $Ra$ , составляющие силы шлифования, коэффициент режущей способности  $K_p$ . При шлифовании отдельных металлов установлена взаимосвязь между составляющими силы шлифования и износом, которая показана в целом ряде работ [3, 4, 5]. Например, при шлифовании стали Р6М3 с ростом тангенциальных и радиальных составляющих силы шлифования величина  $\Delta R$  имеет тенденцию к уменьшению. Однако однозначной взаимосвязи между износом и коэффициентом режущей способности, составляющими силы шлифования не установлено.

**Цель исследования** – проследить наличие (значимость) и изменение корреляции между параметрами, характеризующими обрабатываемость при шлифовании в различных условиях.

### **Материал и методы исследования**

Рассмотрено два фактора, оказывающих влияние на величины показателей, характеризующих процесс шлифования: технологическая среда и скорость главного движения. Обработку производили в двух наиболее контрастных средах: с охлаждением СОЖ [1] (основа  $K_3PO_4$ ) и без охлаждения (всухую). Также шлифование осуществляли на двух скоростях главного движения – 37 и 13,8 м/с. С уменьшением скорости шлифования ( $v_k$ ) пропорционально изменяли скорость подачи стола ( $v_s$ ) таким образом, чтобы сохранить постоянным отношение  $v_k / v_s = 1,85$ . Для  $v_k$  37 и 13,8 м/с скорость подачи стола соответственно 12 и 4,3 м/мин. За период шлифования снимали припуск 0,5 мм, глубина шлифования 0,01 мм/дв. ход.

Исследование проводили для пяти различных по обрабатываемости и физико-механическим свойствам металлов на плоскошлифовальном станке 3Г71: ниобий НБ-1, титановый сплав ВТ3-1, быстрорежущая сталь Р6М3, жаростойкий сплав ЖС6Ф, молибден. Типоразмер и характеристика круга: 1 250×20×76 24AF60M7B.

После измерения шероховатости и радиального износа (рисунок 1), составляющих сил шлифования на прямом ( $P_{zp}$ ,  $P_{yp}$ ) и обратном ( $P_{zo}$ ,  $P_{yo}$ ) проходах стола (рисунок 2) произвели корреляционный анализ. Проанализировали взаимосвязь  $\Delta R$  с  $Ra$ , составляющими силы шлифования, коэффициентом режущей способности  $K_p$  (отношение интенсивности съема металла с заготовки к радиальной составляющей силы шлифования) [3]. Также исследовали корреляцию между износом и отношениями составляющих силы шлифования  $P_z / P_y$  на

прямом и обратном проходах. Все коэффициенты корреляции проверили на значимость по критерию Стьюдента для случая малой выборки (для таблиц 1 – 4:  $k = n - 2 = 5 - 2 = 3$ ;  $\alpha = 0,1$ , для таблицы 5:  $k = n - 2 = 20 - 2 = 18$ ;  $\alpha = 0,05$ ) [2].

### Результаты исследования и их обсуждение

На скорости главного движения 37 м/с при шлифовании в воздушной среде (таблица 1) установлено, что между износом и составляющими силы шлифования наблюдается сильная отрицательная корреляция. Между  $\Delta R$  и  $Ra$  также сильная, но уже положительная взаимосвязь. То есть чем больше значения составляющих силы шлифования, тем меньше износ и шероховатость. Между  $\Delta R$  и  $K_p$  корреляция средняя. То есть, чем выше интенсивность съема металла, тем больше износ круга. Между  $\Delta R$  и отношениями  $P_z / P_y$  на прямом и обратном проходах корреляция незначима.

Таблица 1. Шлифование на скорости 37 м/с в воздушной среде

	$P_{уп}$ , Н/мм	$P_{yo}$ , Н/мм	$P_{zп}$ , Н/мм	$P_{zo}$ , Н/мм	$Ra$ , мкм	$P_{zп} / P_{уп}$	$P_{zo} / P_{yo}$	$K_p$ , мм <sup>3</sup> /(мин·Н )
$\Delta R$ , мкм	<b>-0,69</b>	<b>-0,71</b>	<b>-0,74</b>	<b>-0,81</b>	<b>0,80</b>	0,40	0,27	<b>0,66</b>
Примечание: Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции.								

При изменении только скорости главного движения на 13,8 м/с (таблица 2) установлено, что коэффициенты отрицательной корреляции возросли по сравнению с предыдущим случаем. Улучшилась корреляция между  $\Delta R$  и  $Ra$  (перешла от сильной к очень сильной, близкой к 1). То есть снижение скорости приводит к тому, что рост составляющих силы шлифования сильнее влияет на уменьшение значений износа и шероховатости по сравнению со шлифованием на высокой скорости. Корреляция между  $\Delta R$  и  $K_p$  стала очень сильной. То есть увеличение интенсивности съема металла в процессе обработки будет свидетельствовать и о возрастании износа круга. Между  $\Delta R$  и отношением  $P_z / P_y$  на прямом проходе корреляция незначима, а на обратном – очень сильная. То есть связь между составляющими силы шлифования и радиальным износом на обратном проходе выше, чем на прямом. Возможно, это связано с тем, что на обратном проходе съем материала уменьшается, и процесс приобретает более установившийся характер, что может свидетельствовать о стабильности изнашивания и прикладываемых силовых воздействий.

Таблица 2. Шлифование на скорости 13,8 м/с в воздушной среде

	$P_{уп}$	$P_{yo}$	$P_{zп}$	$P_{zo}$	$Ra$	$P_{zп} / P_{уп}$	$P_{zo} / P_{yo}$	$K_p$
--	----------	----------	----------	----------	------	-------------------	-------------------	-------

	Н/мм	Н/мм	Н/мм	Н/мм	мкм			мм <sup>3</sup> /(мин·Н)
$\Delta R$ , мкм	<b>-0,78</b>	<b>-0,74</b>	<b>-0,91</b>	<b>-0,82</b>	<b>0,98</b>	0,50	<b>0,99</b>	<b>0,93</b>

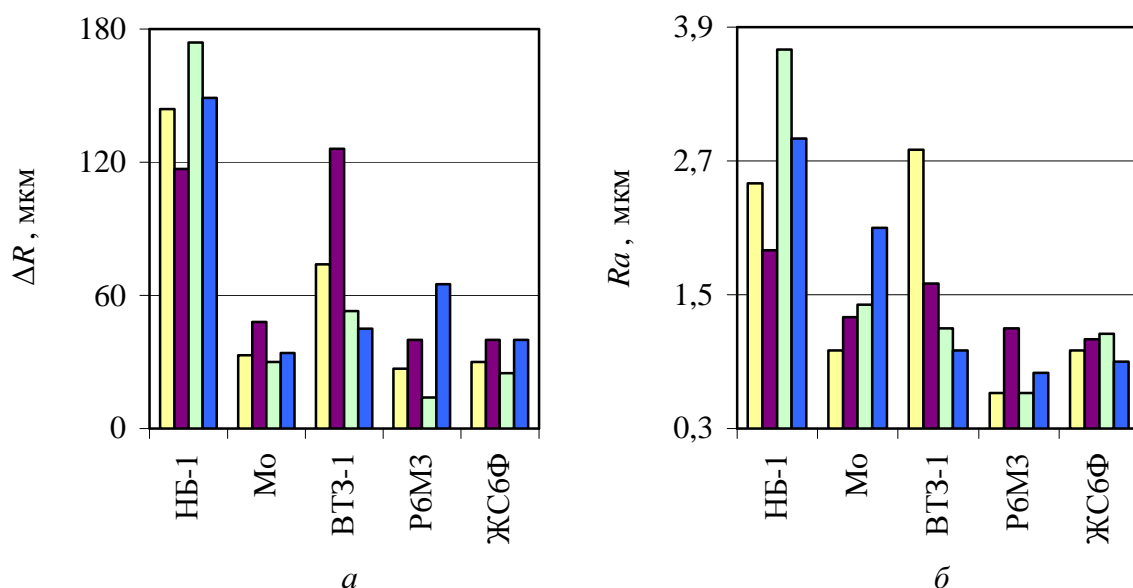


Рисунок 1. Износ круга  $\Delta R$  (а) и шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  (б):

■ – 37 м/с, всухую; ■ – 37 м/с, СОЖ; ■ – 13,8 м/с, всухую; ■ – 13,8 м/с, СОЖ

При изменении только среды (обработка с применением СОЖ), не меняя скорости главного движения (37 м/с), установлено (таблица 3), что корреляция между составляющими силы шлифования и износом стала незначимой, кроме случая в паре  $\Delta R - P_{yo}$ . Но при этом возросла взаимосвязь между  $\Delta R$  и  $Ra$  по сравнению со шлифованием в воздушной среде. То есть однозначно можно сказать, что увеличение  $P_{yo}$  сопровождается снижением износа и шероховатости, влияние других составляющих на поведение  $\Delta R$  и  $Ra$  при данных условиях установить проблематично. Возросла корреляция между  $\Delta R$  и отношением  $P_{zo} / P_{yo}$ . То есть применение СОЖ способствует тому, что поведение составляющих силы шлифования связано с характером износа сильнее на обратном проходе, чем на прямом. Корреляция между  $\Delta R$  и  $K_p$  ослабела и стала незначимой.

Таблица 3. Шлифование на скорости 37 м/с с применением СОЖ

	$P_{уп}$ , Н/мм	$P_{yo}$ , Н/мм	$P_{зп}$ , Н/мм	$P_{zo}$ , Н/мм	$Ra$ , мкм	$P_{зп} / P_{уп}$	$P_{zo} / P_{yo}$	$K_p$ , мм <sup>3</sup> /(мин·Н)
$\Delta R$ , мкм	-0,51	<b>-0,64</b>	-0,36	-0,43	<b>0,91</b>	0,42	<b>0,76</b>	0,38

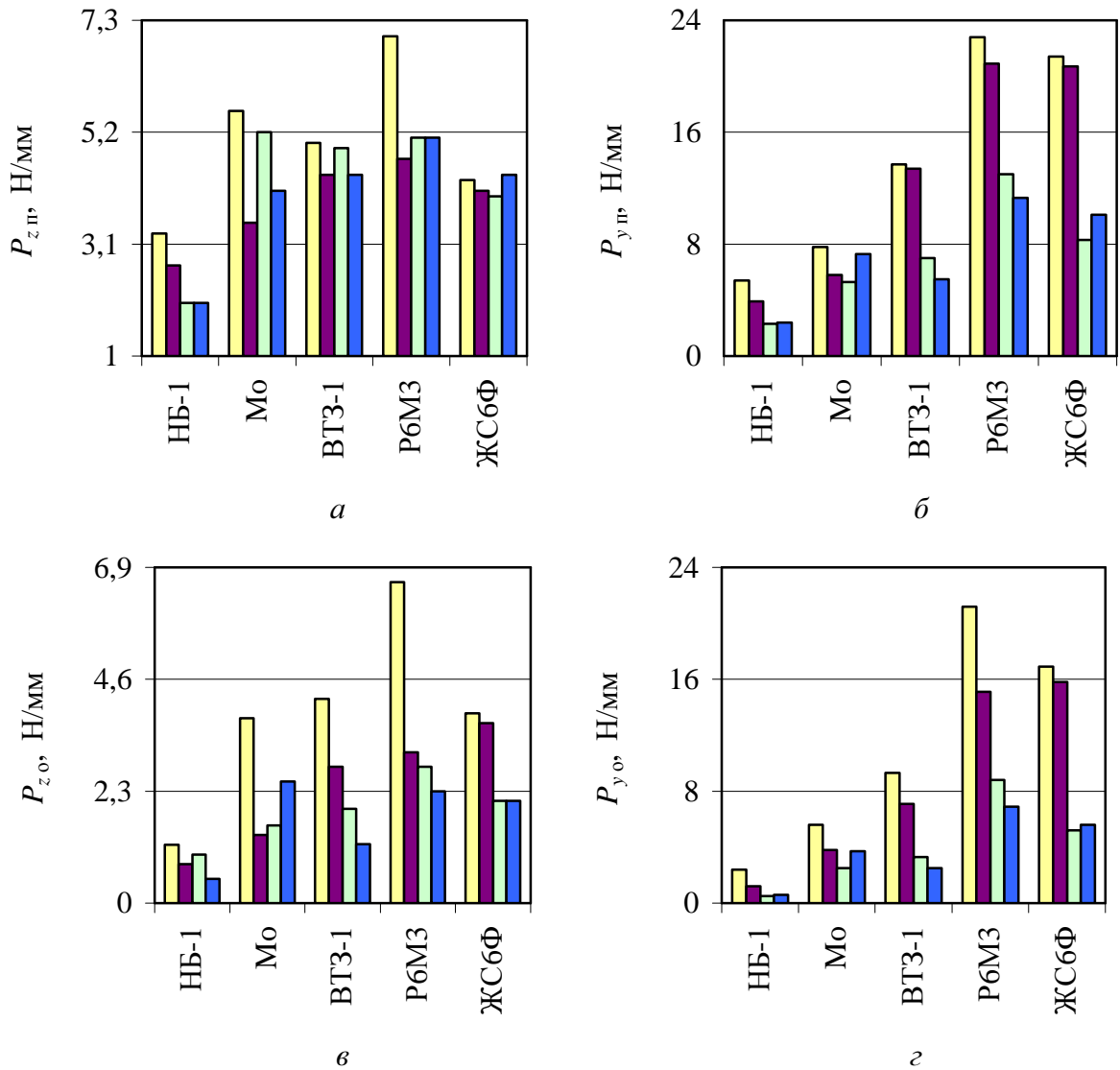


Рисунок 2. Составляющие силы шлифования  $P_z$  (а, в) и  $P_y$  (б, г) на прямом (а, б) и обратном (в, г) ходах стола:

■ – 37 м/с, всухую; ■ – 37 м/с, СОЖ; ■ – 13,8 м/с, всухую; ■ – 13,8 м/с, СОЖ

При изменении среды, и скорости (таблица 4) установлено, что между  $\Delta R$  и  $P_y$  корреляция ослабела (стала средней), между  $\Delta R$  и  $P_z$  на прямом проходе – возросла, на обратном – понизилась. Но при этом взаимосвязь по-прежнему отрицательна и значима. Стала средней корреляция между износом и шероховатостью. То есть, по сравнению со случаем обработки в воздушной среде на скорости 37 м/с, можно сказать, что при данных условиях ухудшилась взаимосвязь между параметрами, но по-прежнему рост составляющих силы шлифования способствует снижению  $\Delta R$  и  $R_a$ . Стала сильной корреляция в паре  $\Delta R - K_p$ . То есть увеличение интенсивности съема металла в процессе обработки будет в большей степени приводить к возрастанию износа круга. Возросла корреляция между  $\Delta R$  и отношением  $P_{z0} / P_{y0}$ . Можно заметить, что по отдельности снижение скорости или применение СОЖ лучше

влияет на взаимосвязь износа с отношением  $P_{z0} / P_{y0}$ . Совместное влияние данных факторов слабее, но отражает ту же взаимосвязь.

Таблица 4. Шлифование на скорости 13,8 м/с с применением СОЖ

	$P_{уп}$ , Н/мм	$P_{y0}$ , Н/мм	$P_{zп}$ , Н/мм	$P_{z0}$ , Н/мм	$Ra$ , мкм	$P_{zп} / P_{уп}$	$P_{z0} / P_{y0}$	$K_p$ , мм <sup>3</sup> /(мин·Н)
$\Delta R$ , мкм	<b>-0,66</b>	<b>-0,60</b>	<b>-0,85</b>	<b>-0,79</b>	<b>0,70</b>	0,58	<b>0,64</b>	<b>0,86</b>

При совместном рассмотрении, то есть, когда всю совокупность полученных значений параметров процесса шлифования объединить и произвести корреляционный анализ, можно говорить о том, как взаимосвязаны между собой износ и остальные показатели, при обработке кругом из электрокорунда (таблица 5). То есть был рассмотрен случай, когда влияние факторов технологической среды и скорости главного движения не учитывается.

Таблица 5. Шлифование электрокорундовым кругом

	$P_{уп}$ , Н/мм	$P_{y0}$ , Н/мм	$P_{zп}$ , Н/мм	$P_{z0}$ , Н/мм	$Ra$ , мкм	$P_{zп} / P_{уп}$	$P_{z0} / P_{y0}$	$K_p$ , мм <sup>3</sup> /(мин·Н)
$\Delta R$ , мкм	<b>-0,48</b>	<b>-0,49</b>	<b>-0,72</b>	<b>-0,51</b>	<b>0,81</b>	0,37	<b>0,63</b>	<b>0,57</b>

Отрицательная значимая корреляция наблюдается между  $\Delta R$  и составляющими силы шлифования. В паре «износ – шероховатость» сильная положительная корреляция. То есть общим для всех рассмотренных случаев при обработке исследуемых материалов остается то, что при их шлифовании кругом из электрокорунда, чем выше составляющие силы шлифования, тем меньше износ и шероховатость. Также средняя корреляция наблюдается в парах  $\Delta R - P_{z0} / P_{y0}$  и  $\Delta R - K_p$ . То есть увеличение интенсивности съема металла в процессе обработки электрокорундовым кругом исследуемых материалов будет приводить к возрастанию износа круга. Поведение составляющих силы шлифования на обратном проходе при шлифовании кругом из электрокорунда связано с характером износа сильнее, чем на прямом проходе.

При шлифовании в воздушной среде корреляция между износом и остальными параметрами улучшается по сравнению со случаем, когда обработка производится с применением СОЖ. При этом для усиления связи между показателями как при обработке без охлаждения, так и с ним необходимо понижать скорость главного движения. При обработке в воздушной среде максимальная корреляция между  $\Delta R$  и составляющими силы шлифования проявляется для тангенциальных составляющих по сравнению с радиальными. Применение СОЖ сохраняет более сильную связь между износом и  $P_{zп}$ ,  $P_{z0}$  по сравнению с  $P_{уп}$ ,  $P_{y0}$  лишь в случае низкой

скорости. Также установлено, что при обработке на скорости главного движения 37 м/с отрицательная корреляция между износом и составляющими силы шлифования сильнее на обратном проходе по сравнению с прямым, при снижении скорости в 2,7 раз – наоборот.

### **Выводы**

Таким образом, установлено, что между износом и составляющими силы шлифования на прямом и обратном проходах наблюдается отрицательная корреляция, которая в наибольшей степени проявляется (более сильная) при шлифовании в воздушной среде. Росту сильной положительной взаимосвязи между износом и шероховатостью способствует снижение скорости при обработке в воздушной среде и применение СОЖ при работе с высокой скоростью. Также установлено, что между  $\Delta R$  и отношением  $P_{zo} / P_{yo}$  корреляция положительна и значима. То есть поведение составляющих силы шлифования на обратном проходе влияет на характер износа сильнее, чем на прямом проходе. Причём наибольшее влияние данного отношения проявляется также при снижении скорости в процессе обработки в воздушной среде и применении СОЖ на высокой скорости главного движения. На низкой скорости между износом и коэффициентом режущей способности проявляется сильная положительная корреляционная связь. Таким образом, увеличение интенсивности съема металла в процессе шлифования электрокорундовым кругом исследуемых материалов на низкой скорости приводит к возрастанию износа круга.

В дальнейшем представляется перспективным продолжить исследование, рассматривая случай использования кругов одинаковых типоразмеров и характеристик, но на различных связках. Это даст возможность проследить, как изменение скорости, технологической среды влияет на взаимосвязь показателей шлифования при обработке кругами на отличающихся по взаимодействию с абразивом и устойчивости к условиям обработки связках. Не стоит забывать и о немаловажном влиянии фактора обрабатываемого материала, различного по физико-механическим свойствам.

### **Список литературы**

1. А.с. 810780 СССР, МКИ С 10 М 3/02. Смазочно-охлаждающая жидкость для шлифования титановых сплавов / Г. И. Саютин, В. А. Носенко, М. И. Ляпунов, К. Н. Бильдинов, Н. И. Егоров // Открытия и изобретения. – 1981. – №9. – С. 64-71.
2. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – Изд. 9-е, стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.
3. Маслов, Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

4. Резников, А. Н. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / Под ред. д-ра техн. наук проф. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.: ил.
5. Худобин, Л. В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л. В. Худобин, А. Н. Унянин; под ред. Л. В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с.

**Рецензенты:**

Санинский Владимир Андреевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств» Волжского политехнического института (филиал) ГОУ ВПО ВолГТУ, г. Волжский.

Тишин Олег Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование» Волжского политехнического института (филиал) ГОУ ВПО ВолГТУ, г. Волжский.