

УДК 621.38**В.П. Ларшин,**

д.т.н., професор,
Одеський
національний
політехнічний
університет
e-mail:
vasilylarshin@gmail.com

**Н.В. Лищенко,**

к.т.н, доцент,
Одесская
национальная
академия
пищевых
технологий
e-mail: odmnv@rabler.ru

**С.В. Рябченко,**

канд. техн. наук, ст.н.с.,
Институт сверхтвердых ма-
териалов им. В. Н. Бакуля
НАН Украины
e-mail:
s.riabchenko@yandex.ru

ПРОФИЛЬНОЕ ШЛИФОВАНИЕ ВЫСОКОПРИСТЫМИ КРУГАМИ

В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, С.В. Рябченко. Профильное шлифование высокопористыми кругами. Приведены методика, результаты и анализ сравнительных экспериментальных исследований обычных и высокопористых шлифовальных кругов на плоско- и зубошлифовальном станках.

V.P. Larshin, N.V. Lishchenko, S.V. Riabchenko. Profile Grinding With High-Porosity Wheels. The technique, results and analysis of the comparative experimental studies of both conventional and high-porosity grinding wheels on surface and gear grinding machines are given.

Введение. Особенностью современного этапа развития станкостроения является производство мехатронных шлифовальных станков, оснащённых не только устройствами ЧПУ и встроенными измерительными системами, но также всеми элементами технологической системы шлифования, включая режущий инструмент (шлифовальные круги), смазочно-охлаждающую жидкость (СОЖ), правящий инструмент (алмазные ролики) и соответствующее программное обеспечение для этапов наладки и обработки. Другой особенностью является применение систем мониторинга, технологической диагностики и адаптивного управления, позволяющих минимизировать потери от брака при максимальной производительности и минимальной себестоимости обработки. Большое внимание разработчики современных технологических систем шлифования уделяют обеспечению и поддержанию на требуемом уровне эксплуатационной ха-

рактистику шліфувального круга – одного з основних елементів технологічної системи шліфування.

Высокопористый шлифовальный круг (open structure grinding wheel) имеет существенные преимущества по сравнению с инструментами нормальной пористости при обработке деталей из высоколегированных сталей и сплавов в тех случаях, когда лимитирующими факторами являются высокие требования к отсутствию шлифовочных прижогов и трещин на обрабатываемых деталях. Такими деталями являются, например, лопатки турбин, зубчатые колеса, червячные фрезы, ходовые винты и т.п.

Особенно наглядно указанные выше тенденции в станкостроении проявляются в технологии зубошлифования, которая оказывает непосредственное влияние на формирование качества поверхности и поверхностного слоя зубьев. Во время этой операции имеется риск получить дефекты в виде шлифовочных прижогов и микротрещин на обрабатываемых поверхностях зубчатой впадины [1]. Для минимизации такого риска были выполнены разноплановые исследования и разработаны многочисленные рекомендации для повышения эффективности зубошлифования, включая применение прерывистых шлифовальных кругов, систем адаптивного управления зубошлифовального станками и встроенных измерительных систем (научная школа профессора Якимова А.В. и другие научные школы).

В последнее время появились эффективные рецептуры и технологии изготовления высокопористого абразивного инструмента [2], изготавливаемого и поставляемого различными фирмами, в том числе фирмой Best-Business a.s. (Чехия), на которой изготовлены исследуемые ниже шлифовальные круги [3]. Отсутствие результатов испытаний этих кругов сдерживает широкое внедрение таких кругов в производственную практику на станках с ЧПУ, поскольку нет методик по выбору режимов зубошлифования и правки высокопористых кругов, нет рекомендаций по рецептурам и характеристикам таких кругов [4].

Целью статьи является разработка и апробация методики проведения сравнительных испытаний обычных и высокопористых шлифовальных кругов на плоско- и зубошлифовальном станке и анализ полученных результатов испытаний.

Материал и результаты исследования. Испытания шлифовальных кругов проводили в заводских условиях в два этапа: на плоскошлифовальном станке мод. 3E711B1 и на зубошлифовальном станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250. Испытания проводили в соответствии с планом и условиями, представленными ниже. На плоскошлифовальном станке испытывались следующие абразивные круги с прямоугольным профилем: производства Волжского абразивного завода (далее ВАЗ, Россия) и фирмы «BEST-BUSINESS a.s.» (далее BEST, Чехия).

Абразивный инструмент

- | | | |
|--------------|--------------|----------------------|
| 1. 250x25x76 | 25A46 L6 V35 | (ВАЗ, цвет белый) |
| 2. 250x25x76 | A9960 Js12V | (BEST, цвет красный) |
| 3. 250x25x76 | A99B60Ks 8V | (BEST, цвет белый) |

Образцы для исследования призматической формы размером 12x12x28 мм. Материал X12M, HRC 58-60.

Методика испытаний

1. Обычное шлифование с поперечной подачей (глубина 10 мкм) – на каждом круге 1 опыт, т.е. без дублирования.
2. Шлифование на прижог (рис.1, а) при глубине по лимбу 50 мкм – на каждом круге 1 опыт (вид шлифования: встречное по ширине образца 12 мм, скорость детали 3,5 м/мин).
3. Шлифование с накоплением упругих отжатый (10 раз по 10 мкм, т.е. за 10 проходов необходимо удалить 100 мкм) – на каждом круге 3 опыта, т.е. три раза повторяли. Измерение фактического съёма материала – на контрольном приспособлении (рис.1, б)
4. Контроль шероховатости поверхности для всех перечисленных этапов (рис.2).

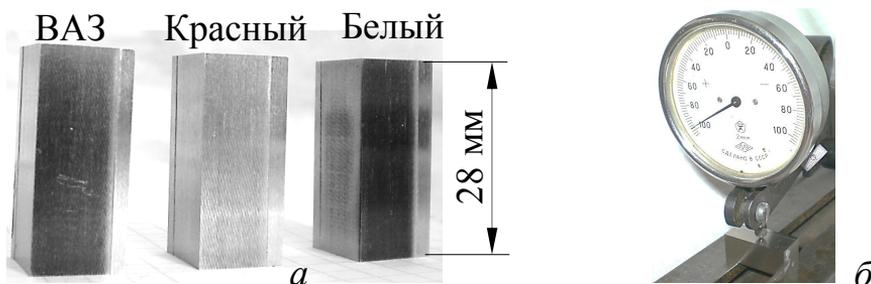


Рис. 1. Вид обработанной поверхности с прижогом (а) и способ измерения фактического съёма материала (б)

Результаты (на прижог). Высокопористый (красный) круг не прижигает при прочих равных условиях (рис.1, а). Шлифовальный круг ВАЗ (образец №2) и белый круг (образец №8) одинаково прижигают. Для указанных кругов фактическая глубина резания составила для ВАЗ (№2), красного (№5) и белого (№8): 46 мкм, 49 мкм и 53 мкм. Разброс значений вызван: 1) неточностью установки лимбовой глубины резания; 2) упругим отжимом шлифовального круга.

Результаты (на накопление). Измерение накопленного съёма производили с помощью контрольного приспособления (рис.1, б). Круг ВАЗ снимает 88 мкм (из 100 мкм), красный – 87 мкм, белый – 92 мкм. Т.е. упругое отжатие

(разность между 100 мкм и фактическим съёмом) для кругов ВА3 и красного – одинаковое. Белый круг снимает (за 10 последовательных проходов) больше (92 мкм из 100 мкм возможных).



Рис. 2. Профилметр для измерения шероховатости поверхности: наладка (а) и измерительная часть (б)

Оценка шероховатости. Шероховатость поверхности измеряли профилметром модели 170621 производства Московского завода «Калибр» (рис. 2).

Результаты на шероховатость (таблицы 1, 2 и 3).

Таблица 1. Шероховатость поверхностей с прижогами

	Наименование шлифовального круга		
	ВА3	Красный	Белый
Номер образца	№2	№5	№8
R_a прод, мкм	0,453	0,5925	0,372
R_a поп, мкм	0,51	0,537	0,408
Примечание: R_a прод, R_a поп – параметры шероховатости в продольном и поперечном направлении образца (рис.2, а).			

Вывод: наименьшая шероховатость наблюдается на поверхности, обработанной белым шлифовальным кругом (образец № 8). Следовательно, белый круг превосходит по эксплуатационному свойству «шероховатость» круг ВА3, но уступает высокопористому красному кругу по теплонапряжённости шлифования.

Таблица 2. Влияние режимов «накопления» на шероховатость поверхности

	Наименование шлифовального круга		
	ВА3	Красный	Белый
Номер образца	№1	№4	№7
R_a прод, мкм	0,543	0,35	0,518
R_a поп, мкм	0,833	0,473	0,865

Номер образца	№3	№6	№8
R_a прод, мкм	0,62	0,411	0,542
R_a поп, мкм	0,66	0,52	0,2
Номер образца	№2	-	№9
R_a прод, мкм	0,716	-	0,4315
R_a поп, мкм	0,65	-	0,544
\check{R}_a прод, мкм	0,626	0,4196	0,497
\check{R}_a поп, мкм	0,714	0,5313	0,53
Примечание: \check{R}_a прод, \check{R}_a поп – усреднённые значения параметров шероховатости при повторении опытов 4 раза (красный) и 6 раз (ВАЗ и белый).			

Вывод по табл.2: наименьшая шероховатость наблюдается при обработке высокопористым красным кругом (образцы № 4 и № 6).

Таблица 3. Влияние режимов шлифования с поперечной подачей 1 мм при лимбовой глубине 10 мкм

	Наименование шлифовального круга		
	ВАЗ	Красный	Белый
Номер образца	3	4	7
R_a прод, мкм	0,234	0,14	0,239
R_a поп, мкм	0,307	0,198	0,259

Вывод: наименьшая шероховатость наблюдается при обработке высокопористым красным кругом (образцы № 4 и № 6).

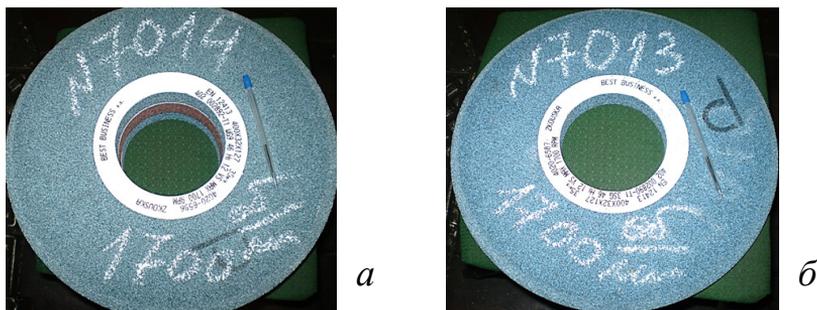


Рис. 3. Высокопористые шлифовальные круги для зубошлифования: монокорундовый (а) и золь-гелевый корунд (б)

На втором этапе испытания высокопористых кругов проведены на зубошлифовальном станке с ЧПУ мод. HÖFLER RAPID 1250. Были испытаны следующие высокопористые абразивные круги производства фирмы «BEST-BUSINESS a.s.» (Чехия): 400x32x127 WG946Hs12VS – монокорунд (рис.3, а) и 400x32x127 3SG46Hs12VS – золь-гелевый корунд (рис.3, б).

Сравнение эксплуатационных характеристик этих кругов производили с соответствующими характеристиками круга 400x40x127 25AF46L6V (обычный белый электрокорунд производства ВАЗ). Шлифование зубчатых колес производилось на зубошлифовальном станке с ЧПУ мод. HÖFLER RAPID 1250.

При испытаниях фиксировали мощность зубошлифования (путём записи отсчётов мощности по индикатору монитора системы ЧПУ станка, табл. 4) и все другие (приведены ниже, табл. 5) замеры параметров точности обработанных зубчатых колёс. Например, испытания золь-гелевого круга 3SG46Hs12Vs проводили при шлифовании двух зубчатых колёс (далее ЗК №1 и ЗК № 2) одного и того же типоразмера (код зубчатого колеса по чертежу В1318В 41.002) со следующими данными. Наружный диаметр $da = 233,4$ мм; число зубьев 29; модуль $m = 7$; угол наклона зубьев $\beta = -18^\circ$; смещение $x = 0,545$; ширина венца $B = 60$ мм.

Припуск на обработку $z = 0,510$ мм. Число этапов обработки – 3 (черновой, получистовой, чистовой).

Припуск на 1 этап (черновой) – $z_1 = 0,24$ мм. Число рабочих ходов $i = 16$. Глубина резания (по нормали к профилю) $t = 0,015$ мм. Радиальная подача (вертикальная глубина шлифования) $S_{\text{рад}} = 0,032$ мм. Осевая подача (скорость детали) на первый рабочий ход $V_{i=1} = 500$ мм/мин, на последующие рабочие хода $V_{i=2\dots16} = 5000$ мм/мин.

Припуск на 2 этап – $z_2 = 0,24$ мм. Другие параметры: $i = 16$; $t = 0,015$ мм; $S_{\text{рад}} = 0,032$ мм; $V_{i=1\dots16} = 5000$ мм/мин.

Припуск на 3 этап – $z_3 = 0,03$ мм, $i = 4$. Глубины резания (по нормали к профилю и вертикальные) на первый и второй рабочие хода $t_{i=1,2} = 0,010$ мм; $S_{\text{рад } i=1,2} = 0,022$ мм. Осевая подача на первый и второй рабочие хода $V_{i=1,2} = 2000$ мм/мин. Для третьего и четвертого рабочих ходов: $t_{i=3,4} = 0,005$ мм; $S_{\text{рад } i=3,4} = 0,011$ мм; $V_{i=3} = 2000$ мм/мин; $V_{i=4} = 1500$ мм/мин.

Таблица 4. Мощность зубошлифования обычным 25AF46L6V и золь-гелевым кругом 3SG46Hs12VS

Характеристика 2 и 3 этапов зубошлифования	Шлифовальный круг	
	25AF46L6V (Волжский абразивный завод, ВАЗ)	3SG46Hs12VS (Vect-Business a.s.) золь-гелевый
Этап 2 (правка через 6 впадин)	$P_{cp} = 1811,15$ Вт Интервал изменения P (2411,15 – 600) Вт	$P_{cp} = 566,5$ Вт Интервал изменения P (1166,5 – 600) Вт
Этап 3 (правка через 10 впадин)	$P_{cp} = 1333,3$ Вт Интервал изменения P (1933, 3 - 600) Вт	$P_{cp} = 400$ Вт Интервал изменения P (1000 – 600) Вт
Примечание: P, P_{cp} – текущее и среднее значения мощности привода шлифовального круга при мощности холостого хода $P_{xx} = 600$ Вт.		

Таблица 5. Результаты измерений параметров точности зубчатых колес с помощью встроенной измерительной системы на станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250

Контролируемые параметры	Шлифовальный круг			
	400x40x127 25AF46L6V (обычный круг, Волжский абразивный завод)		400x32x127 3SG46Hs12VS (золь-гелевый круг, (Vect-Business a.s.))	
	ЗК №1 (B1318B 41.002)		ЗК №2 (B1318B 41.002)	
	Левая сторона	Правая сторона	Левая сторона	Правая сторона
Параметры профиля				
$F\alpha$, мкм	2,8	4,0	3,5	2,5
ffa , мкм	2,2	2,5	2,0	2,7
fHa , мкмкм	-2,7	2,8	-3,5	-1,2
Параметры линии зуба				
$F\beta$, мкм	5,3	8,5	5,0	3,5
$ff\beta$, мкм	1,8	3,7	1,3	0,8
$fH\beta$, мкм	5,7	-8,7	5,3	-4,7
fp , мкм	3,0	4,0	3	5
Fp , мкм	13	12,5	6,5	10,5
Fr , мкм	9,5		7,5	

Примечание

1. Параметры профиля и параметры линии зуба измеряли на 3-х впадинах, равномерно расположенных по измерительной окружности заготовки (впадины № 1, 10, 20).

2. $F\alpha$ – полная погрешность профиля, ffa – погрешность формы профиля; $fH\alpha$ – погрешность угла профиля; $F\beta$ – полная погрешность линии зуба; $ff\beta$ – погрешность формы линии зуба; $fH\beta$ – погрешность угла наклона зуба; fp – погрешность шага; Fp – накопленная погрешность шага; Fr – радиальное биение.

Выводы

1. Высокопористый круг A9960Js12V (красный) по сравнению с обычными кругами 25A46L6V35 (BA3) и A99B60Ks8V (белый) показывает лучшие эксплуатационные свойства по шероховатости обработанной поверхности как при обычном шлифовании (вывод по табл. 2), так в режиме накопления упругого отжатия (вывод по табл. 3).

2. Высокопористый круг A9960Js12V (красный) по сравнению с обычными кругами показывает лучшие эксплуатационные свойства по критерию отсутствия шлифовочных прижогов на обработанной поверхности.

3. Результаты производственных испытаний позволяют рекомендовать высокопористые шлифовальные круги A9960Js12V (красный) для операции зубошлифования на станке HOFLEER RAPID 1250 с ЧПУ, с учётом обеспечения необходимых габаритных размеров зубошлифовального круга и предварительного его профилирования по имеющимся стандартам.

4. Мощность зубошлифования на этапе обработки 2 на 30,9 % ниже у золь-гелевого круга 3SG46Hs12VS по сравнению с обычным кругом 25AF46L6V (BA3). Мощность зубошлифования на этапе 3 у золь-гелевого круга (по сравнению с обычным кругом BA3) на 72,5 % ниже.

5. По результатам окончательного контроля погрешности профиля и линии зуба преимущество в целом после шлифования у золь-гелевого круга. Индивидуальная погрешность шага fp , накопленная погрешность шага Fp по левой и правой сторонам впадин и радиальное биение Fr более, чем в 3 ниже после шлифования золь-гелевым кругом по сравнению с обычным кругом BA3.

6. Шлифовальные круги из золь-гелевого корунда 3SG46Hs12VS можно рекомендовать для обработки зубчатых колёс, так как они обеспечивают уменьшение мощности зубошлифования и лучшие показатели по точности обработки.

Литература

1. Качество изготовления зубчатых колёс / А.В. Якимов, Л.П. Смирнов, Ю.А. Бояринов и др. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
2. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 2007. – 668 с.
3. Рябченко С.В., Серeda Г.В., Рябченко А.С. Процессы шлифования материалов высокопористыми абразивными кругами / С.В. Рябченко, Г.В. Серeda, А.С. Рябченко // Промышленность в фокусе . - 2014, - № 38, с 58.
4. Лищенко Н.В. Температура при шлифовании прерывистыми и высокопористыми кругами / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – Тольятти, 2015. – №3-1(33-1). – С.75-83.