

6. Високопродуктивне шліфування: навчальний посібник / О.В. Якимов, Ф.В. Новіков, Г.В. Новіков, О.О. Якимов. – Київ : ІСДО, 1995. – 180 с.

7. Современные технологии и техническое перевооружение предприятий: монография / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх, А.А. Андилахай, Д.Ф. Новиков, В.И. Полянский. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 400 с.

8. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.

9. Якимов А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов. – К.; О.: Вища школа, 1986. – 175 с.

*Новиков Ф.В., Шкурупий В.Г.*

Харьковский национальный экономический университет  
имени Семена Кузнеця, Харьков, Украина

*Полянский В.И.*

ООО «Империя металлов», Харьков, Украина

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОМ ПОЛИРОВАНИИ**

Снижение трудоемкости и себестоимости изготовления деталей и машин, а также повышение их качества является важнейшей задачей [1]. Многочисленными исследованиями установлено, что определяющую роль в обеспечении эксплуатационных характеристик играет состояние поверхностного слоя, который окончательно формируется на финишных операциях. Известно [1, 2], что эффективность и производительность абразивной обработки зависят от технологической среды, которая включает полировальник, абразивную и неабразивную составляющую технологического состава и материал заготовки. Традиционные подходы [1, 2], обладая развитым аппаратом, не позволяют в явном виде учитывать особенности динамики процесса полирования по отношению к шлифованию. Все это снижает эффективность принятия технологических решений и делает их мало пригодными в практике.

В настоящее время в рекомендациях по применению абразивных материалов для полирования недостаточно информации по времени обработки для достижения наибольшего сглаживания поверхностного слоя. Поэтому задачей исследования является анализ литературных источников, имеющих рекомендации по снижению времени полирования для достижения заданного сглаживания поверхностного слоя, и разработка модели инструмента для абразивного полирования и практических рекомендаций по повышению эффективности абразивного полирования.

Целью работы является разработка модели формирования значений высотных параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании с учетом зернистости абразива, а также получение зависимости для определения времени обработки при достижении заданной шероховатости поверхности и наименьшем количестве циклов обработки.

**Результаты исследований.** Проблеме повышения эксплуатационных характеристик деталей технологическими методами посвящены работы Рыжова Э. В., Ящерицына П. И., Сулимы А. М. Обработке резанием с достижением минимальной шероховатости поверхности посвящены работы Гребенщикова И. В., Орлова П.Н., Федотова А.И. и др. В имеющихся работах изменения оптических свойств авторы связывают с изменением природы неметаллической пленки, а влияние шероховатости не рассматривают. В отдельных работах обращается внимание на необходимость сглаживания поверхностного слоя для повышения отражательной способности [3, 4]. Наиболее эффективно сглаживание достигается при абразивном полировании [5].

При моделировании процесса полирования необходимо учесть скорость и траекторию движения частиц, их размеры и зернистость, механические свойства материала детали. Модель абразивного инструмента при полировании может быть представлена в виде схемы (рис. 1). Абразивное полирование в зависимости от характера применяемых абразивных рабочих сред и технологических жидкостей представляет собой механохимический процесс сглаживания поверхностного слоя путем пластического деформирования микронеровностей, съема окислов с обрабатываемой поверхности.

Процесс полирования сопровождается последовательным нанесением на поверхность обрабатываемых деталей большого числа царапин и следов пластического деформирования при их взаимном наложении и пересечении. Технологическая жидкость обеспечивает удаление продуктов износа (частиц металла и абразивных частиц) с поверхности обрабатываемой детали, способствует охлаждению поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Интенсивность обработки зависит от динамических параметров, определяемых режимами полирования, продолжительностью полирования, характеристиками и размерами частиц абразива, характеристиками механических свойств материала детали.

Режущий инструмент формируется непосредственно в процессе обработки как абразивная среда с особыми свойствами и определенными внутренними связями. Сложная геометрическая форма зерен и их режущей части является одной из важнейших характеристик абразивного инструмента.



Рисунок 1 – Схема формирования геометрии и физико-химического состояния поверхностного слоя при обработке свободным абразивом

Параметры режущего профиля абразивной гранулы (скопления абразивных зерен) определяется величиной и расположением абразивных зерен. При единичном взаимодействии абразивной гранулы с поверхностью детали через сечение неровностей обрабатываемой поверхности, перпендикулярное направлению относительного движения гранулы, пройдет несколько слоев определенной толщины. Элементарные режущие профили будут случайным образом накладываться друг на друга, а на поверхности детали будет копироваться их огибающая, представляющая собой эффективный режущий профиль гранулы, который непостоянен и изменяется случайным образом. Профиль шероховатости поверхности детали в поперечном сечении абразивных царапин копирует эффективный режущий профиль гранулы, будет зависеть от глубины внедрения зерен  $h_{\max}$ , от исходной шероховатости поверхности детали и от параметров распределения вершин абразивных зерен по высоте.

Абразивный инструмент в первую очередь будет контактировать с выступами исходной шероховатости поверхности, при этом будет происходить постепенное округление выступов. В процессе полирования высотные параметры профиля исходной шероховатости поверхности будут уменьшаться, а шаговые параметры будут изменяться незначительно. Если прекратить процесс полирования через 30с от начала полирования, то при исходной шероховатости после шлифования сохранится часть исходного микрорельефа, при этом шероховатость поверхности детали будет состоять из сглаженных выступов.

Опорная поверхность обработанной детали на уровнях 10, 20, 30, 40 % будет значительно увеличена по сравнению с исходной, а впадины микрорельефа останутся без изменений. Продолжение процесса полирования приведет к полному удалению выступов исходной шероховатости. Отношение высотных параметров  $R_a / R_{max}$  при этом уменьшится. Это свидетельствует о возникновении большого количества царапин на полированной поверхности, связанных с наличием укрупненной фракции в поставляемых промышленностью абразивных порошках. В дальнейшем процесс полирования стабилизируется. Характерный для процесса полирования рельеф будет постоянно воспроизводиться, его параметры не будут изменяться с течением времени, а будут определяться режимами обработки и зернистостью применяемого абразива.

Нами было изучено влияние зернистости абразива и продолжительности предварительной обработки на значения высотных параметров шероховатости поверхности для образцов из стали 30ХГСА (рис. 2).

Из графика (рис. 2.) видно, что интенсивность изменения  $R_{max}$  не соответствует интенсивности изменения значений  $R_a$ . С увеличением зернистости абразива значение  $R_{max}$  увеличиваются. При увеличении времени обработки интенсивность изменения  $R_{max}$  резко увеличивается, что можно объяснить дроблением зерен в процессе обработки, следовательно, процесс обработки необходимо прекращать до появления интенсивного разрушения зерен. Так как с уменьшением размеров зерен (при неизменной силе прижатия полировальника) контактное давление возрастает и, соответственно, глубина царапания единичным дробленным зерном должна быть больше, т.е.  $R_{max}$  увеличивается при сохранении эффекта сглаживания. Возрастанию контактного давления способствует одновременное соударение множества абразивных зерен, увеличивающих энергию движения дробленого зерна. Из графика видно, что отношение  $R_a / R_{max}$  в начальный период полирования до 90 с уменьшается незначительно, а при увеличении длительности обработки свыше 90 с значение этого отношения уменьшается и составляет 0,087. Значение отношения высотных параметров в зависимости от зернистости абразива ленты изменяется незначительно, однако при полировании алмазными пастами малой зернистости (АСМ 2/1) значения этого отношения резко снижаются.

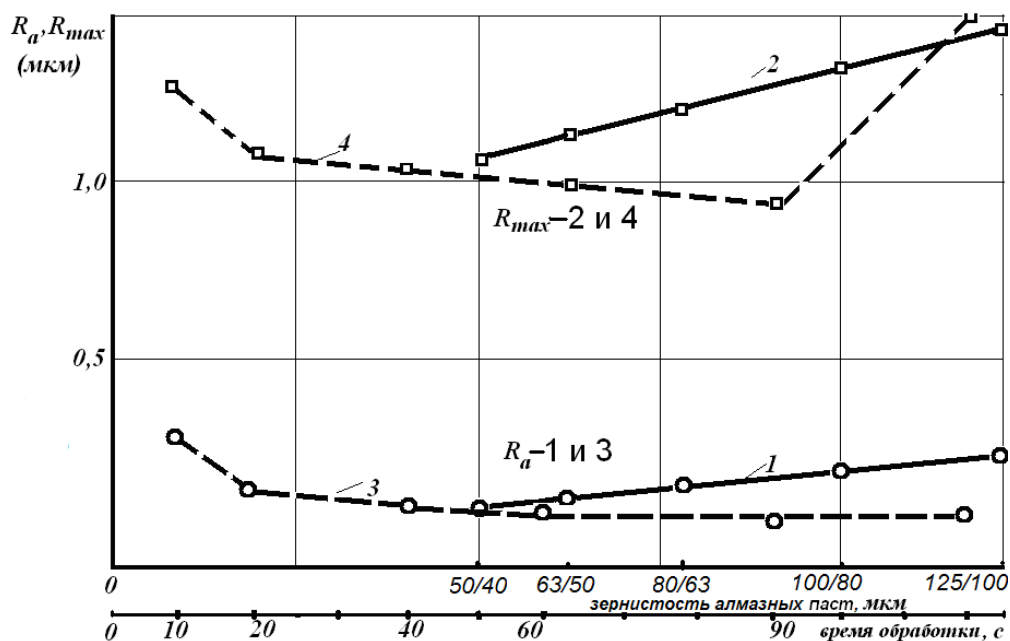


Рисунок 2 – Влияние зернистости алмазных паст (1, 2) и продолжительности обработки (3, 4) на интенсивность изменения значений высотных параметров шероховатости поверхности для образцов из стали 30ХГСА: давление 40 МПа; окружная скорость 30 м/с; время обработки 20 с для 1 и 2; зернистость абразива для 3 и 4 – АСО 50/40

Для решения поставленной задачи воспользуемся работой [1], в которой приведена зависимость скорости съема  $Q$  от параметров процесса полирования:

$$Q = k \cdot V^a \cdot c^{b_1} \cdot e^{b_2 c} \cdot p^{d_1} \cdot e^{d_2 p}, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость резания, м/с;  $p$  – давление, кПа;  $c$  – плотность абразивной суспензии, г/мл;  $k, a, b, d$  – коэффициенты.

Нами получены зависимости, характеризующие изменение съема материала детали от одной переменной при фиксированных значениях двух переменных.

Скорость съема при изменении скорости резания:

$$Q(V) = 2,39 \cdot 10^{-2} \cdot V^{1,15} \quad (\text{при } c = 2 \cdot 10^{-2} \text{ г/мл; } p = 12 \cdot 10^2 \text{ кПа}).$$

Скорость съема при изменении давления:

$$Q(p) = 0,68 \cdot 10^4 \cdot p^{-3,38} \cdot e^{0,0173 p} \quad (\text{при } V = 0,2 \text{ м/с; } c = 2 \cdot 10^{-2} \text{ г/мл}). \quad (2)$$

Скорость съема при изменении концентрации абразивной суспензии:

$$Q(c) = 1,14 \cdot 10^8 \cdot c^{5,64} \cdot e^{1,46 c} \quad (\text{при } V = 0,2 \text{ м/с; } p = 12 \cdot 10^2 \text{ кПа}).$$

На рис. 3 изображены экспериментальные и расчетные точки, полученные по формулам (2). Расхождение расчетных и экспериментальных значений съема материала составляет не более 3 %.

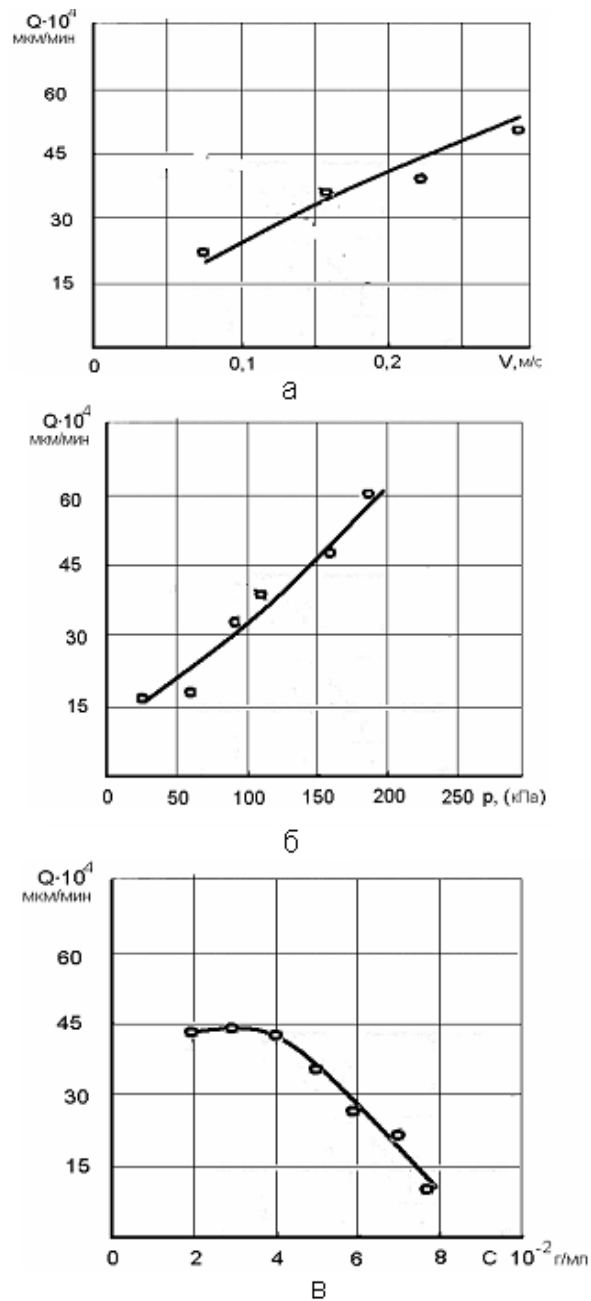


Рисунок 3 – Зависимость скорости съема  $Q$  от технологических параметров процесса абразивной обработки: а – линейной скорости  $V$ ; б – давления  $p$ ; в – плотности суспензии  $c$ .

Для сглаживания поверхностного слоя деталей необходимо установить минимальное количество переходов технологического цикла для получения минимальных значений высотных параметров шероховатости поверхности. В конце первого цикла обработки получаем поверхность, шероховатость которой  $R_1$ , а высотный параметр исходной до обработки шероховатости  $R_0$ . При выполнении  $N$  циклов получим  $N$  поверхностей с промежуточными значениями высотных параметров шероховатости  $R_i$  в соответствии с разными переходами. Количество переходов и промежуточная величина шероховатости поверхности зависит от физико-химических свойств обрабатываемой поверхности, ее формы, времени обработки, свойств и зернистости абразивного материала

При абразивном полировании считаем, что максимальная глубина внедрения зерна равна диаметру абразивной частицы или максимальному ее размеру. В этом случае высотные параметры шероховатости поверхности и скорость съема материала на каждом переходе пропорциональны размерам абразивных частиц:

$$R_{z_i} = \beta \cdot D_i; \quad Q_i = \alpha \cdot D_i. \quad (3)$$

где  $D_i$  – диаметр абразивных частиц на  $i$ -м переходе ( $i=1, 2, \dots, N-1$ );  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты пропорциональности, определяемые эмпирическим путем постоянные для данного процесса обработки.

Из равенства (3) следует, что

$$Q = \frac{\alpha}{\beta} \cdot R_{z_i}. \quad (4)$$

В табл. 1 приведены величины скорости полирования и шероховатости при обработке в течение одного часа деталей из меди различными фракциями алмазных микропорошков

Таблица 1 – Результаты абразивного полирования

Шероховатость поверхности после фрезерной обработки, $R_z$ , мкм	Фракции алмазных микропорошков, АСМ	Скорость полирования, $Q \cdot 10^3$ , мкм/мин	Шероховатость после полирования, $R_z$ , мкм
0,32	5/3	5,325	0,032
0,32	3/2	3,225	0,05
0,32	1/0	1,35	0,020

Величина припуска  $h$ , соответствующая глубине дефектного слоя:

$$h_i = k \cdot R_{z_{i+1}},$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, определяющий количество материала удаляемого за время  $t_i$ ;

$$t_i = \frac{F_i}{Q_i} = \gamma \cdot \frac{R_{z_{i-1}}}{R_{z_i}}, \quad (5)$$

где  $\gamma = \frac{k\beta}{\alpha}$  при  $i=1, 2, \dots, N$ .

Суммарное время обработки по всем циклам равно:

$$T_i = \sum_{i=1}^N t_i = \gamma \cdot \sum_{i=1}^N \frac{R_{z_{i-1}}}{R_{z_i}}. \quad (6)$$

Для оптимизации процесса по критерию минимума суммарное время обработки (5) необходимо определять оптимальные значения промежуточной шероховатости поверхностей  $R_{z_i}$  ( $i=1, 2, \dots, N-1$ ):

$$R_{z_i} = R_{z_{i-1}} = R_{z_{i+1}},$$

При  $i=1, 2, \dots, N-1$ , откуда

$$\frac{R_{z_{i-1}}}{R_{z_i}} = \frac{R_{z_i}}{R_{z_{i+1}}} \quad (7)$$

С учетом формулы (6) из уравнения (5) следует, что при оптимальном процессе обработки время переходов одинаково, т.е.  $t_i = t$ . Это справедливо для обработки поверхностей деталей с одинаковым значением высотных параметров шероховатости исходной поверхности. Однако, это не подтверждается для образцов с различной исходной шероховатостью поверхности, так как с уменьшением исходной шероховатости поверхности время обработки резко уменьшается. Это подтверждают и результаты эксперимента (рис. 4).

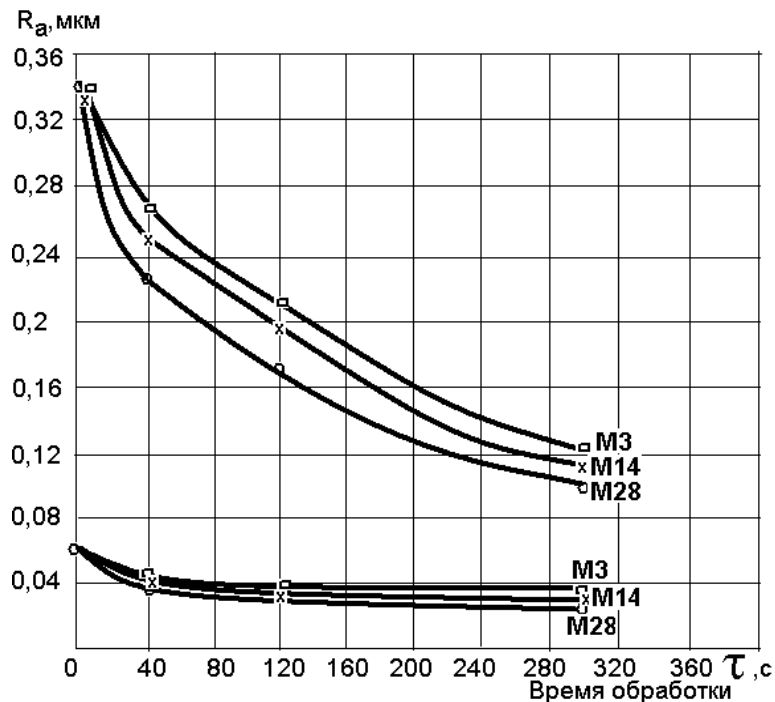


Рисунок 4 – Зависимость высотного параметра шероховатости поверхности от времени полирования абразивными материалами различной зернистости

Анализ зависимостей показывает, что:

- время стабилизации процесса формирования высотного параметра шероховатости поверхности мало зависит от зернистости абразива (от M3 до M28);
- время стабилизации процесса формирования высотного параметра шероховатости поверхности существенно уменьшается с уменьшением высотного параметра исходной шероховатости поверхности до обработки. При уменьшении исходного параметра шероховатости поверхности  $R_a$  в 5,23 раза (от 34 мкм до 0,065 мкм) время стабилизации  $R_a$  обработанной поверхности уменьшается в 8 раз (от 320 с до 40 с). Таким образом, при сглаживании поверхностного слоя детали время цикла последующей финишной операции будет уменьшаться интенсивнее, чем снижение высотного параметра исходной шероховатости до обработки;
- для каждой зернистости абразивного материала существует предел по стабилизации значений высотного параметра шероховатости поверхности, а это



очень важно при назначении последовательности использования рабочих сред при сглаживании поверхностного слоя деталей. Следует отметить, что этот предел будет зависеть от исходного состояния поверхности детали до обработки. Нас интересует наименьшее предельное значение  $R_a$ , достигаемое полированием поверхности в разных условиях обработки.

Оптимальные значения суммарного времени обработки можно определить из следующего выражения:

$$T = \gamma \cdot N \cdot \left( \frac{R_{z_0}}{R_{z_N}} \right)^{\frac{1}{N}}. \quad (7)$$

Оптимальное число циклов получим, рассматривая суммарное время  $T$ , как функцию числа циклов  $N$ . Для этого следует определить ее минимум:

$$N_{\min} = \ln \frac{R_{z_0}}{R_{z_N}^{1/N}}.$$

Оптимальное значение диаметров абразивных частиц на каждом переходе:

$$D_i = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{R_{z_N}^{1/N}}{R_{z_0}^{1/N-1}} = \frac{1}{\beta} \cdot R_{z_0} \left( \frac{R_{z_N}}{R_{z_0}} \right)^{1/N}$$

при  $i = 1, 2, \dots, N$ .

Для случаев обработки поверхности с изменяющимися физико-химическими свойствами выражения примут вид:

$$T_{opt} = \gamma \cdot N \cdot \left( x \cdot \frac{R_{z_0}}{R_{z_N}} \right)^{1/N} \quad (8)$$

при

$$N = 2,3 \cdot \ln \left( x \cdot \frac{R_{z_0}}{R_{z_N}} \right). \quad (9)$$

Из вышеизложенного следует, что коэффициенты  $x$  и  $\gamma$  отражают зависимость скорости полирования от микротвердости, плотности обрабатываемого материала и зернистости алмазного микропорошка. Экспериментально установлено, что для алмазных микропорошков соответствующих зернистостей значение  $x$  равно 0,06,  $\gamma$  равно 1,7. Следовательно, оптимальный вариант процесса полирования с точки зрения минимальных переходов при обработке металлической зеркальной поверхности определяется только высотой шероховатости поверхности до и после обработки. Следует заметить, что минимальное число переходов зависит от физико-химических свойств абразива, исходной шероховатости поверхности  $R_{z_0} = D_0 \cdot \beta$ , зернистости алмазных микропорошков  $D_N = \beta \cdot R_{z_N}$ , используемых на последнем переходе. Разработанная методика была использована для оптимизации процесса полирования медной зеркальной

поверхности [6]. За исходное состояние брали образцы с поверхностью, обработанной до  $R_a = 0,5$  мкм, на конечном этапе обработки шероховатость составляла  $R_z = 0,032 \dots 0,025$  мкм.

Тогда оптимальное число циклов равняется 3, а время (усредненное для верхней и нижней границ) составляет  $T = 7,87$  мин. Исследования показали, что расчетное время от экспериментального отличается на 20 % ( $T_{экон} = 9,5$  мин), что соответствует погрешности  $\varepsilon = 0,01$ . Для абразивных составов получили размеры зерен на соответствующих стадиях обработки:  $D_1 = 3,1214 \dots 5$  мкм;  $D_2 = 1,1543 \dots 2,05$  мкм;  $D_3 = 0,425 \dots 0,8$  мкм, что соответствует зернистости абразивов 5/3; 3/2; 1/0.

**Выводы.** 1. В работе теоретически и экспериментально раскрыты закономерности формирования шероховатости поверхности при полировании абразивными материалами различной зернистости деталей из меди и алюминия.

2. Приведено обоснование оптимальных параметров режимов полирования при обработке поверхностей указанных деталей с целью сглаживания их поверхностного слоя.

3. На основе проведенных исследований разработана методика расчета времени всего процесса обработки, количества переходов, времени каждого перехода и зернистости абразива на каждом переходе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.

2. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.

3. Назаров Ю.Ф. Выбор оптимального маршрута обработки деталей с учетом технологической наследственности / Ю.Ф. Назаров, О. Н. Мельников // Вестник машиностроителя. – 1986. – №6 – С. 47-49.

4. Исследование зависимости скорости полирования от технологических факторов обработки / В.М. Рубан, Ю.Ф. Назаров, Г.Б. Лурье, В.И. Романова // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1980. – Вып. 10. – С. 89.

5. Шкурупий В.Г. Сглаживание поверхностного слоя деталей из меди и алюминия при их абразивном полировании / В.Г. Шкурупий, Ю.Ф. Назаров // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь: ПГТУ, 2010. – Вып. 12. – С. 281–286.

6. Цеснек Л.С. Металлические зеркала / Л.С. Цеснек, О.В. Сорокин, А.А. Золотухин. – М.: Машиностроение, 1983. – 353 с.