

**А.А. АНДИЛАХАЙ**, докт. техн. наук, доц., ГВУЗ “ПГТУ”, Марнуполь

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИНИШНОЙ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ**

В статье разработаны обобщающие эмпирические математические модели параметров абразивной обработки деталей затопленными струями, которые позволяют по критериям наименьшей шероховатости поверхности и наибольшей производительности определить рациональные параметры обработки. Установлено, что в процессе обработки происходит скругление кромок деталей, устраняются заусенцы, следы коррозии и разные неоднородности на обрабатываемых поверхностях, образуется однородная матовая поверхность с шероховатостью в пределах  $R_a = 0,8 - 1,25$  мкм, с упрочняющим наклепом (сжимаемыми напряжениями глубиной 5 – 6 мкм), существенно уменьшается трудоемкость обработки.

**Ключевые слова:** абразивная обработка, абразивные зерна, мелкие детали, сжатый воздух, сопло Лавала, шероховатость поверхности, производительность обработки.

## **О.О. АНДИЛАХАЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІНІШНОЇ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ДРІБНИХ ДЕТАЛЕЙ**

У статті розроблено узагальнюючі емпіричні математичні моделі параметрів абразивної обробки деталей затопленими струменями, які дозволяють за критеріями найменшої шорсткості поверхні та найбільшою продуктивністю визначити раціональні параметри обробки. Встановлено, що в процесі обробки відбувається заокруглення кромek деталей, усуваються задирки, сліди корозії та різні неоднорідності на оброблюваних поверхнях, утворюється однорідна матова поверхня з шорсткістю в межах  $R_a = 0,8 - 1,25$  мкм, зі зміцнювальною наклепом - 6 мкм), суттєво зменшується трудомісткість обробки.

**Ключові слова:** абразивна обробка, абразивні зерна, дрібні деталі, стиснене повітря, сопло Лавала, шорсткість поверхні, продуктивність обробки.

## **A.A. ANDILAHAY INCREASING THE EFFICIENCY OF FINISHING JET AND ABRASIVE PROCESSING OF SMALL PARTS**

The article develops generalizing empirical mathematical models of the parameters of abrasive machining of parts by submerged jets, which allow, according to the criteria of the least surface roughness and the highest productivity, to determine rational processing parameters. It has been established that during processing, the edges of the parts are rounded, burrs, traces of corrosion and various inhomogeneities on the treated surfaces are eliminated, a uniform matte surface is formed with a roughness in the range of  $R_a = 0.8 - 1.25 \mu\text{m}$ , with hardening (compressive stresses of depth 5 – 6  $\mu\text{m}$ ), the complexity of processing is significantly reduced.

**Key words:** abrasive processing, abrasive grains, small parts, compressed air, Laval nozzle, surface roughness, processing performance.

**Введение.** Струйно-абразивная обработка получила применение при обработке деталей сложной конфигурации. Однако интенсивный износ каналов сопел, через которые прокачивается абразивная суспензия, в ряде случаев ограничивает ее эффективное использование.

© А.А. Андилахай, 2021

Поэтому применительно к обработке мелких деталей (массой до 3 г) предложен метод абразивной обработки затопленными струями. Его сущность состоит в том, что через сопла прокачивается только сжатый воздух, а абразивные зерна, находящиеся в абразивной суспензии, присоединяются к струям сжатого воздуха после срезов сопел. Струи сжатого воздуха подаются таким образом, чтобы достигались обработка и равномерное перемешивание деталей, а также обеспечивалась сохранность внутренних поверхностей рабочей камеры. Учитывая недостаточную изученность этого прогрессивного метода обработки, настоящая работа посвящена обоснованию его технологических возможностей с точки зрения повышения качества и производительности обработки, а также разработки практических рекомендаций.

**Анализ основных достижений и литературы.** Проблемам струйно-абразивной обработки посвящены многочисленные исследования [1,2], на основе которых созданы специальные установки и определены оптимальные условия осуществления процесса обработки. При этом установлено, что изготовление сопел из износостойких материалов не решает проблемы их интенсивного износа. Поэтому кардинальным решением проблемы износа сопел стало создание метода абразивной обработки деталей затопленными струями, когда абразивные зерна присоединяются к абразивной струе за пределами сопла. В работах [3,4] определены основные технологические возможности этого метода обработки. Однако для обоснованного выбора рациональных условий обработки необходимо проведение комплекса экспериментальных исследований качества и производительности обработки.

**Цель исследования, постановка задачи.** Целью данной работы является обоснование условий повышения качества и производительности абразивной обработки мелких деталей затопленными струями. Для этого необходимо выявить и реализовать основные факторы, определяющие функционирование процесса, разработать математические эмпирические модели шероховатости и производительности обработки и на их основе определить рациональные параметры обработки и размеры конструктивных элементов струйно-абразивных установок при их проектировании.

**Материалы исследования.** Для решения поставленной задачи проведен комплекс экспериментальных исследований основных параметров абразивной обработки деталей затопленными струями на установке, показанной на рис. 1. Экспериментально установлено, что плотность покрытия следами абразивных зерен обрабатываемой поверхности детали (рис. 2) увеличивается от середины к ее кромкам (рис. 3). Следовательно, наибольшая интенсивность съема материала при абразивной обработке затопленными струями достигается на торцовых поверхностях обрабатываемых мелких деталей.

На базе планированного дробного факторного эксперимента  $2 \cdot 10^{-6}$  (1/8 реплики) построены математические модели определения производительности обработки (в качестве критерия оценки выбран

металлосъем  $M$  в мг за 30 минут обработки) и шероховатости поверхности (по критерию  $R_{max}$ , в мкм):

$$M = 39,9 \frac{V_a^{0,313} \cdot D_a^{0,046} \cdot m_d^{0,002} \cdot \Sigma^{0,833} \cdot W_{жс}^{0,16} \cdot d_c^{0,088} \cdot n_c^{0,4} \cdot D_{разм}^{0,074} \cdot \zeta^{0,009}}{\delta^{0,02}}, \quad (1)$$

$$R_{max} = 7,4 \frac{V_a^{0,27} \cdot D_a^{0,083} \cdot m_d^{0,028} \cdot \Sigma^{0,277} \cdot W_{жс}^{0,136} \cdot d_c^{0,09} \cdot n_c^{0,04} \cdot D_{разм}^{0,273} \cdot \zeta^{0,143}}{\delta^{0,054}}, \quad (2)$$

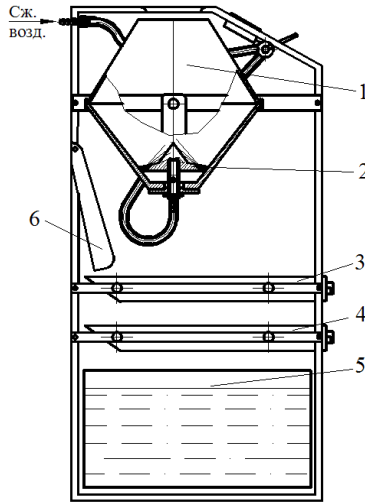


Рис. 1 – Схема лабораторной струйно-абразивной установки с объемом рабочей камеры 30 л: 1 – рабочая камера; 2 – сопловой аппарат (завихритель); 3 – решето для деталей; 4 – решето для абразивного зерна; 5 – бак-отстойник; 6 – желоб для суспензии



Рис. 2 – Образцы из латуни ЛС59.1 в форме диска диаметром 20 мм и толщиной 0,5; 1; 2; 4 и 8 мм: а – до обработки; б – после обработки

где  $V_a$  – объем загружаемого абразива, л;  
 $D_a$  – зернистость абразива, мм;  
 $m_d$  – единичная масса обрабатываемых деталей, г;  
 $\Sigma$  – суммарная масса обрабатываемых деталей, кг;  
 $W_{жс}$  – объем заливаемой жидкости, л;

$d_c$  – диаметр сопел, мм;  $n_c$  – количество сопел;

$D_{разм}$  – диаметр размещения сопел, м;

$\zeta$  – угол оси сопла к горизонту, градус;

$\delta$  – угол между осью сопла и касательной к окружности в точке ее размещения, градус.

Как следует из зависимости (1), наибольшее влияние на производительность обработки оказывает суммарная масса деталей  $\Sigma$  и в меньшей мере параметры  $n_c$ ,  $V_a$  и  $W_{жс}$ . Установлено также незначительное влияние зернистости абразива  $D_a$  на производительность абразивной обработки затопленными струями (рис. 4, а), тогда как в известных методах струйно-абразивной обработки зернистость абразива является определяющим параметром процесса.

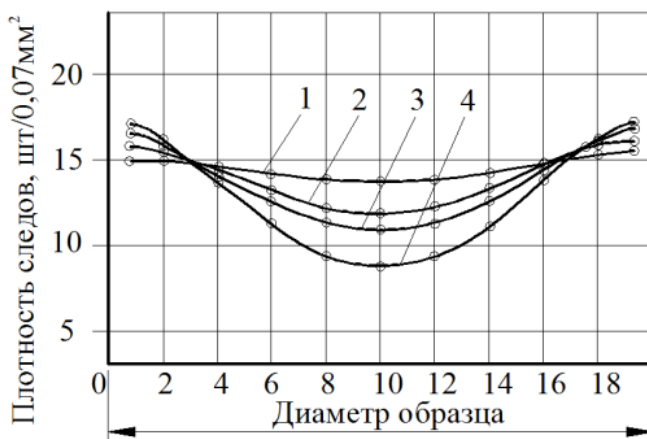


Рис. 3 – Плотность следов абразивных зерен (в поле зрения объектива – 0,07 мм²) в диаметрально направленном направлении образцов в форме диска при толщине диска:  
1 – 4,0 мм; 2 – 2,0 мм; 3 – 1,0 мм; 4 – 0,5 мм

Как следует из зависимости (2), фактически в одинаковой степени основное влияние на максимальную высоту микронеровностей обработанной поверхности  $R_{max}$  оказывают параметры  $\Sigma$ ,  $V_a$  и  $D_{разм}$ . Доказано, что достигаемая высота микронеровностей  $R_{max}$  (рис. 4,б) находится в непосредственной связи с производительностью обработки, представленной съемом металла, и стабилизируется для данных условий обработки при  $R_{max} = 3,4$  мкм.

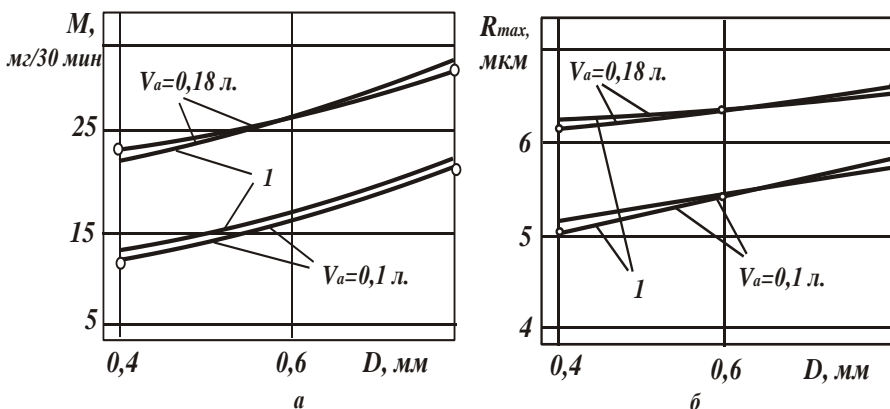


Рис. 4 – Исследуемые параметры механообработки: а – зависимость производительности обработки  $M$  от размера абразивного зерна  $D_a$ ; б – зависимость высоты микронеровностей  $R_{max}$  от размера абразивного зерна; 1 – расчетные кривые

Таким образом, разработанные обобщающие эмпирические математические модели параметров процесса абразивной обработки деталей затопленными струями ( $M$  и  $R_{max}$ ) дают достаточно полное представление о технологических возможностях процесса и позволяют по критериям наибольшей производительности и наименьшей шероховатости поверхности определить рациональные параметры обработки. Экспериментально установлено, что реализовать наибольшую производительность обработки, например, для заданной шероховатости поверхности  $R_{max} = 3,4$  мкм можно применением следующих условий обработки: объем загружаемого абразива – 0,18 л.; зернистость абразива – № 40; суммарная масса обрабатываемых деталей – 0,4 кг; объем заливаемой жидкости – 3,0 л.; диаметр сопел – 2 мм; количество сопел – 8; диаметр размещения сопел – 110 мм, угол оси сопла к горизонту –  $25^{\circ}$ ; угол между осью сопла и касательной к окружности в точке ее размещения –  $0...5^{\circ}$ . Полученные эмпирические зависимости для определения производительности обработки и шероховатости поверхности позволяют производить выбор рациональных технологических и конструктивных параметров и научно обоснованно подходить к проектированию оборудования для отделочной абразивной обработки деталей затопленными струями.

На этой основе разработано эффективное оборудование в виде гаммы установок (защищенных авторскими свидетельствами и патентами) для абразивной отделочной обработки мелкоразмерных деталей затопленными струями, позволяющее ликвидировать трудоемкие ручные зачистные операции, повысить качество, производительность и стабильность обработки за счет улучшения товарного вида обработанных деталей при одновременной обработке большого количества деталей с загрузкой в рабочую камеру

«навалом». Разработанные установки обеспечивают высокоэффективную направленную обработку торцовых поверхностей, плоских поверхностей и одновременно торцовых и плоских поверхностей деталей, а также обеспечивают улучшение эргономических показателей обработки за счет ее автоматизации и механизации. Повышение качества и производительности обработки достигается за счет применения сверхзвуковых профилированных сопел Лавала.

Проведенные экспериментальные исследования абразивной обработки деталей затопленными струями на разработанной установке показали возможность увеличения производительности обработки (рис. 5) при обеспечении требуемого качества обработанных поверхностей деталей по сравнению с используемыми базовыми установками. В процессе обработки происходит скругление кромок деталей, устраняются заусенцы, следы коррозии и разные неоднородности на обрабатываемых поверхностях (рис. 6), образуется однородная матовая поверхность с шероховатостью в пределах  $R_a = 0,8 \dots 1,25$  мкм, с упрочняющим наклепом (сжимающими напряжениями глубиной 5–6 мкм).

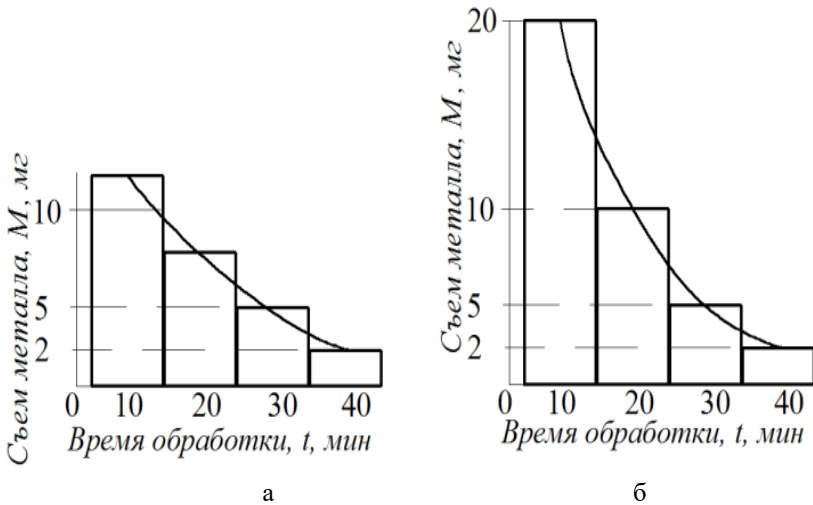


Рис. 5 – Зависимость съема металла  $M$  для различных промежутков времени обработки  $t$  : а – при использовании базовой установки; б – при использовании разработанной установки. Условия обработки: шлифзерно 63С; зернистость абразива 63П (630 мкм); давление сжатого воздуха 0,5 МПа; угол наклона осей сопел к горизонту 10°; сопловой аппарат базовой установки оснащен цилиндрическими соплами диаметром 2 мм, вновь разработанной установки - соплами Лавала с критическим сечением 2 мм

Проведенные испытания разработанных установок показали, что благодаря новым техническим решениям в конечном итоге удалось на 62% повысить производительность обработки при обеспечении высокого качества обрабатываемых поверхностей. При этом установлено, что за счет создания дополнительного источника перемешивания обрабатываемых деталей, обеспечивающего увеличение количества одновременно обрабатываемых деталей, производительность обработки выросла на 10%. Установлено также, что благодаря улучшению качества абразивного материала, за счет очистки от отходов, а также использования чистой воды, достигнуто увеличение производительности обработки в среднем на 5 %.

Значительный прирост производительности обработки (на 39 %) получен в результате замены сопел с цилиндрическим каналом на профилированные сверхзвуковые сопла Лаваля. Применение сопла Лаваля стало возможным лишь благодаря использованию принципиально новой схемы струйно-абразивной обработки – абразивной обработки деталей затопленными струями, исключаящей износ каналов сопел потоком абразивных зерен, т.к. при использовании традиционных схем струйно-абразивной обработки “узким” местом (подверженным повышенному износу) в профилированном сопле является его критическое сечение.

Практикой установлено, что эффективной областью применения абразивной обработки затопленными струями является обработка мелких точных деталей малой жесткости и сложной конфигурации радио- и электротехнической промышленности, приборостроения, точной механики, оптико-механического производства, прецизионных деталей, используемых для нанотехнологий, общемашиностроительного назначения и деталей ювелирных изделий и геральдики.

Промышленные испытания разработанных установок показали, что за счет сохранности каналов сопел обеспечивается их надежная и бесперебойная работа, практически не нуждающаяся в техническом обслуживании. Установлено, что за время выполнения операции (приблизительно 40 минут) основное (машинное) время составляет 30 – 35 минут, т.е. оператор занят на обслуживании одной установки 5 – 10 минут. Следовательно, в условиях участка отделочной обработки оператор может одновременно обслуживать три таких установки с последовательным запуском их в работу.

Производительность обработки мелких деталей на разработанных установках по сравнению с их традиционной ручной немеханизированной обработкой может быть увеличена до 66 раз. Все зависит от количества обрабатываемых деталей: с их увеличением производительность резко увеличивается. Это, естественно, позволяет исключить технологические операции на предприятии, связанные с ручной отделочной (зачистной) обработкой данных деталей, и уменьшить число рабочих на этих операциях.

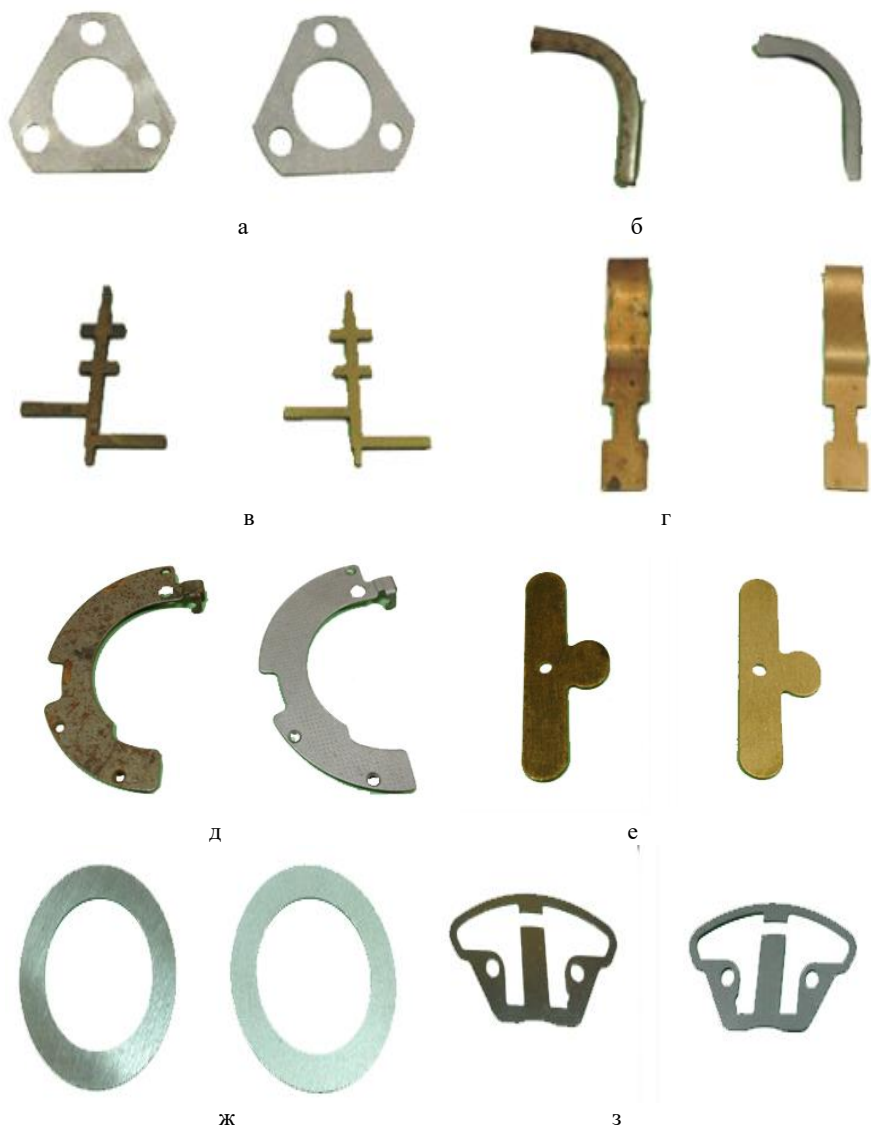


Рис. 6 – Внешний вид деталей из различных материалов до и после обработки:  
а – алюминий; б – сталь-3; в – латунь ЛС59.1; г – бериллиевая бронза БрБ2;  
д – сталь 3; е – титановый сплав ВТ-1; ж – латунь Л63; з – дуралюмин Д16.



**Выводы.** Экспериментально установлено, что наибольшая интенсивность съема материала при абразивной обработке затопленными струями достигается на торцовых поверхностях обрабатываемых мелких деталей, что позволяет в первую очередь рекомендовать предлагаемый метод для обработки торцовых поверхностей мелкогабаритных деталей. Разработаны обобщающие эмпирические математические модели параметров абразивной обработки деталей затопленными струями, которые позволяют по критериям наименьшей шероховатости поверхности и наибольшей производительности определить рациональные параметры обработки и произвести выбор количества и размеров конструктивных элементов установок при их проектировании. Установлено, что в процессе обработки происходит скругление кромок деталей, устраняются заусенцы, следы коррозии и разные неоднородности на обрабатываемых поверхностях, образуется однородная матовая поверхность с шероховатостью в пределах  $R_a = 0,8 - 1,25$  мкм, с упрочняющим наклепом (сжимающими напряжениями глубиной 5 – 6 мкм), существенно уменьшается трудоемкость обработки.

#### Список литературы

1. Кремень З.И. Турбоабразивная обработка деталей сложного профиля / З.И. Кремень, М.Л. Миссарский, В.З. Гузель. – М.: НИИмаш, 1987. – 53 с. 2. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин / А.Е. Проволоцкий – К: Техника, 1989. – 177 с. 3. Андилахай А.А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А.А. Андилахай. – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с. 4. Андилахай А.А. Технологические возможности абразивной обработки деталей затопленными струями / А.А. Андилахай // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2010. – № 49. – С. 140-143.

#### Bibliography (transliterated)

1. Kremen Z.I., Missarskiy M.L., Guzəl V.Z. Turboabrazivnaya obrabotka detaley slozhnogo profilya., – Moscow: NIImach, 1987. – 53 P. 2. Provoloctkiy A.E. Struyno-abrazivnaya obrabotka detaley mashin. – Kiev: Tekhnika, 1989. – 177 P. Andilakhay A.A. Abrazivnaya obrabotka detaley zatoplennymi struyami. – Mariupol: PGTU, 2006. – 190 P. 4. Andilakhay A.A. Tekhnologicheskie vozmozhnosti abrazivnoy obrabotki detaley zatoplennymi struyami. Visnyk NTU “KhPI”. Zbirnyk naukovykh pratP. Tematychnyi vypusk: Tekhnologii v mashynobuduvanni. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2010. – No 49. – P. 140-143.

*Поступила (received) 12.08.2021*