

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА-ПОЛИРОВАЛЬНИКА И ОБРАБАТЫВАЕМОГО МЕТАЛЛА ПРИ АБРАЗИВНОМ ПОЛИРОВАНИИ

Шкурупий В.Г., канд. техн. наук, доц., **Новиков Ф.В.**, докт. техн. наук, проф.
(Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, Харьков, Украина)

Теоретически определены условия, при которых абразивное зерно не будет перекатываться, а прочно удерживаться в инструменте-полировальнике и осуществлять процесс полирования. Расчетами установлено, что в случае моделирования абразивного зерна в форме двух конусов, которые внедряются в материал инструмента-полировальника и обрабатываемый металл, тангенциальные усилия, возникающие в материале инструмента-полировальника и обрабатываемом металле, будут приблизительно равны. Поэтому абразивные зерна с одинаковой вероятностью могут как перекатываться в зоне обработки, так и удерживаться в материале инструмента-полировальника и совершать полезную работу. Даны практические рекомендации.

Ключевые слова: абразивное полирование, инструмент-полировальник, абразивные зерна, сила резания, прочность на сжатие материала, обрабатываемый материал.

Теоретично визначено умови, за яких абразивне зерно не буде перекочуватися, а утримуватися в інструменті-полірувальнику і здійснювати процес полірування. Розрахунками встановлено, що в разі моделювання абразивного зерна в формі двох конусів, які впроваджуються в матеріал інструмента-полірувальника і оброблюють метал, тангенціальне зусилля, що виникає в матеріалі інструмента-полірувальника і в оброблюваному металі, будуть приблизно рівні. Тому абразивні зерна з однаковою ймовірністю можуть як перекочуватися в зоні обробки, так і утримуватися в матеріалі інструмента-полірувальника і виконувати корисну роботу. Надано практичні рекомендації.

Ключові слова: абразивне полірування, інструмент-полірувальник, абразивні зерна, сила різання, міцність на стиск матеріалу, матеріал, що оброблюється.

In theory, it defines the conditions under which the abrasive grain will not roll, and held firmly in the tool-up pad and carry out polishing process. The calculations revealed that in the case of abrasive grain simulation in the form of two cones that are embedded in the tool, polishing pad material and processed metal, tangential forces occurring in the material and the polishing tool-treated metal will be approximately equal. Therefore, abrasive grains with equal probability may be rolled into a processing zone and be retained in the material of the polishing tool, and perform useful work. Practical recommendations.

Keywords: abrasive polishing, polishing tool, the abrasive grains, cutting force, the compressive strength of the material, the material being processed.

Постановка проблемы. Абразивное полирование является одним из основных методов финишной абразивной обработки. Условием осуществления съема металла и формообразования поверхностей при абразивном полировании следует рассматривать возможность достаточно прочного удержания абразивных зерен в материале инструмента-полировальника. Если материал инструмента характеризуется высокой твердостью, то, очевидно, абразивное зерно не сможет в него внедриться и удержаться в нем в процессе обработки. Оно будет перекатываться, фактически не совершая съем обрабатываемого материала. По-

этому материал инструмента следует выбирать достаточно пластичным, обеспечивающим внедрение (шаржирование) в него абразивного зерна и удержание его с силой, достаточной для осуществления процесса микрорезания. В связи с этим в работе решается задача повышения прочности удержания абразивных зерен в материале инструмента-полировальника.

Физические основы и технологические возможности абразивного полирования рассмотрены в работах [1–3]. Однако в этих работах приведены в основном результаты экспериментальных исследований процесса полирования, что ограничивает возможности его дальнейшего совершенствования с точки зрения повышения производительности и качества обработки. Поэтому необходимо провести теоретический анализ условий обеспечения прочного удержания абразивных зерен в материале инструмента-полировальника и разработать практические рекомендации для их осуществления. Целью работы является обоснование условий обеспечения прочного удержания абразивных зерен в материале инструмента-полировальника для осуществления высокопроизводительного съема материала и высококачественной обработки при абразивном полировании.

Основной материал. Для аналитического описания процесса взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым металлом и материалом инструмента рассмотрена расчетная схема (рис. 1), в которой под действием радиального усилия P_{y0} абразивное зерно внедряется в обрабатываемый металл на глубину a и в материал инструмента на глубину a_1 [4, 5].

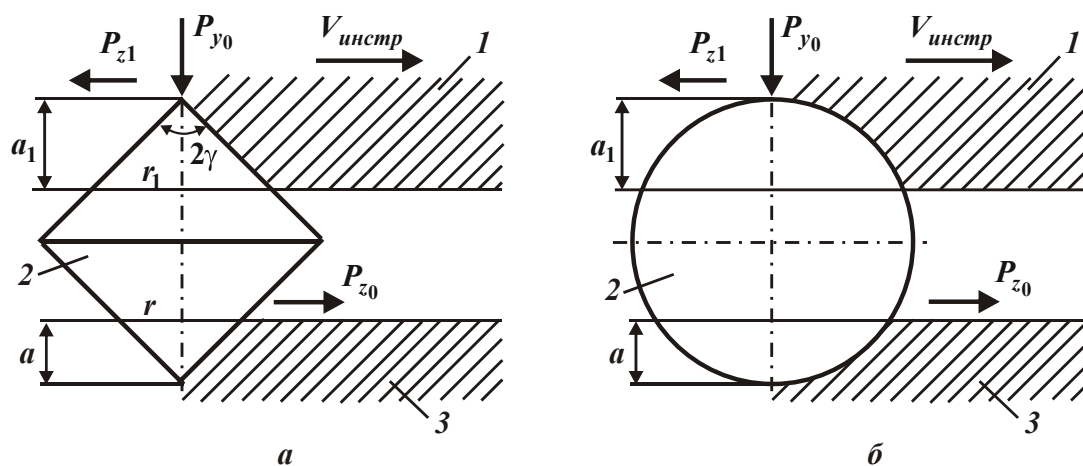


Рис. 1 – Расчетные схемы взаимодействия абразивного зерна 2 в форме двух спаренных конусов (а) и в форме сферы (б) с материалом инструмента-полировальника 1 и с обрабатываемым материалом 3.

Для определения глубин a и a_1 необходимо знать площади контакта абразивного зерна с обрабатываемым металлом $F_{конт}$ и с материалом инструмента $F_{конт1}$. С целью упрощения расчетов первоначально рассмотрено абразивное зерно в форме двух спаренных между собой конусов с углами при вершинах 2γ . Тогда, исходя из рис. 1, получено

$$F_{конт} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot a^2; \quad (1)$$

$$F_{\text{конт1}} = \pi \cdot r_1^2 = \pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot a_1^2, \quad (2)$$

где $r = \text{tg} \gamma \cdot a$; $r_1 = \text{tg} \gamma \cdot a_1$ – радиусы площадей $F_{\text{конт}}$ и $F_{\text{конт1}}$, м.

Твердости обрабатываемого металла HV (по Виккерсу) и материала инструмента HV_1 определяются зависимостями:

$$HV = \frac{P_{y0}}{F_{\text{конт}}} = \frac{P_{y0}}{\pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot a^2}; \quad (3)$$

$$HV_1 = \frac{P_{y0}}{F_{\text{конт1}}} = \frac{P_{y0}}{\pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot a_1^2}. \quad (4)$$

Решая зависимости (3) и (4) относительно глубин a и a_1 , получено:

$$a = \sqrt{\frac{P_{y0}}{\pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot HV}}; \quad (5)$$

$$a_1 = \sqrt{\frac{P_{y0}}{\pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot HV_1}}. \quad (6)$$

Как видно, чем больше угол γ , твердости обрабатываемого металла HV и материала инструмента HV_1 , тем меньше глубины внедрения абразивного зерна в обрабатываемый металл a и в материал инструмента a_1 . Чтобы абразивное зерно глубже внедрилось в материал инструмента и прочнее в нем удерживалось в процессе обработки, необходимо уменьшать твердость материала инструмента HV_1 . Это позволит увеличить тангенциальное усилие P_{z1} , с которым абразивное зерно будет удерживаться в инструменте-полировальнике. Тангенциальное усилие P_{z1} можно выразить:

$$P_{z1} = K_{\text{рез1}} \cdot P_{y0}, \quad (7)$$

где $K_{\text{рез1}}$ – коэффициент, численно равный коэффициенту резания.

Очевидно, чем больше коэффициент $K_{\text{рез1}}$, тем больше тангенциальное усилие P_{z1} и прочнее будет удерживаться абразивное зерно. Принимая условие $HV_1 < HV$ с учетом зависимостей (5) и (6) получено:

$$\frac{a_1}{a} = \sqrt{\frac{HV}{HV_1}}. \quad (8)$$

Из данного соотношения вытекает условие: $a_1 > a$. При перемещении абразивного зерна со скоростью инструмента $V_{\text{инстр}}$ произойдет процесс микрорезания обрабатываемого металла. Возникающая при этом тангенциальная составляющая силы резания P_{z0} будет подчиняться зависимости:

$$P_{z0} = K_{\text{рез0}} \cdot P_{y0}. \quad (9)$$

Коэффициент резания $K_{\text{рез0}}$ с физической точки зрения не должен превышать значение коэффициента $K_{\text{рез1}}$, входящего в зависимость (7). В противном случае будет справедливо условие $P_{z0} > P_{z1}$, в результате чего зерно не сможет прочно удерживаться в материале инструмента, будет перекатываться,

что исключает процесс микрорезания обрабатываемого металла. Иными словами, для осуществления процесса микрорезания обрабатываемого металла должно выполняться условие $P_{z_0} < P_{z_1}$.

Учитывая то, что абразивное зерно с одинаковой вероятностью может осуществлять процесс микрорезания как обрабатываемого металла, так и материала инструмента-полировальника, то для выполнения условия $P_{z_0} < P_{z_1}$, исходя из зависимостей (7) и (8), необходимо выполнить условие $K_{рез_0} < K_{рез_1}$. В работе [6] показано, что условное напряжение резания σ при микрорезании единичным зерном может быть описано зависимостью:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\operatorname{tg}\left[45^{\circ} - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right]} = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{K_{рез}}, \quad (10)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого металла, Н/м²; ψ – условный угол трения передней поверхности режущего зерна с металлом ($\operatorname{tg}\psi = f$ – коэффициент трения); γ – условный передний угол зерна.

Из зависимости (10) следует, что чем больше углы ψ и γ , тем больше условное напряжение резания σ . Это согласуется с практикой абразивной обработки, согласно которой образование площадок износа на абразивных зернах ($2\gamma \rightarrow 180^{\circ}$) позволяет уменьшить шероховатость поверхности (обеспечивает сглаживание микронеровностей на обрабатываемой поверхности) за счет увеличения условного напряжения резания σ при полировании с фиксированным радиальным усилием P_y .

С другой стороны, чтобы снизить силовую напряженность процесса и повысить производительность обработки, наоборот, необходимо условное напряжение резания σ уменьшать, уменьшая углы ψ и γ . Следовательно, имеют место противоположные требования к параметру σ в зависимости от решаемой задачи: обеспечение уменьшения шероховатости поверхности или повышение производительности обработки. С целью уменьшения шероховатости поверхности параметр σ необходимо увеличивать, а с целью повышения производительности обработки, наоборот, уменьшать за счет обеспечения высокой остроты режущих зерен и снижения интенсивности трения в зоне резания. Очевидно, увеличение параметра σ предполагает увеличение тангенциальной составляющей силы резания P_{z_0} и поэтому для выполнения условия $P_{z_0} < P_{z_1}$ (соответственно условия $K_{рез_0} < K_{рез_1}$) требуется увеличивать силу P_{z_1} , повышая прочность удержания абразивного зерна в материале инструмента-полировальника.

Для анализа условия $K_{рез_0} < K_{рез_1}$ следует разрешить зависимость (10) относительно коэффициента резания $K_{рез}$. В результате получено:

$$K_{рез} = 2 \cdot \operatorname{tg}\left[45^{\circ} - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right]. \quad (11)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (11) значения $K_{рез}$.

Таблица 1

Расчетные значения коэффициента резания $K_{рез}$

$(\psi + \gamma)$, град	30	45	60	70	90
$K_{рез}$	0,577	0,424	0,268	0,184	0

Применительно к процессам микрорезания абразивным зерном обрабатываемого металла и материала инструмента-полировальника, коэффициенты резания $K_{рез0}$ и $K_{рез1}$ аналитически опишутся:

$$K_{рез0} = 2 \cdot \operatorname{tg} \left[45^{\circ} - \frac{(\psi_0 + \gamma)}{2} \right]; \quad (12)$$

$$K_{рез1} = 2 \cdot \operatorname{tg} \left[45^{\circ} - \frac{(\psi_1 + \gamma)}{2} \right], \quad (13)$$

где ψ_0 , ψ_1 – условные углы трения передней поверхности режущего зерна с обрабатываемым металлом и материалом инструмента-полировальника.

Очевидно, для того чтобы выполнить условие $K_{рез0} < K_{рез1}$, необходимо чтобы угол ψ_0 был больше угла ψ_1 . С учетом соотношений $\operatorname{tg} \psi_0 = f_0$; $\operatorname{tg} \psi_1 = f_1$ (где f_0 , f_1 – коэффициенты трения передней поверхности режущего зерна с обрабатываемым металлом и материалом инструмента-полировальника) должно выполняться условие $f_0 > f_1$. Однако, обеспечить выполнение данного условия сложно, поэтому одновременно будут происходить процессы микрорезания абразивным зерном обрабатываемого металла и материала инструмента-полировальника, т.е. фактически с одинаковой интенсивностью будет изнашиваться инструмент и производиться сьем обрабатываемого металла.

В реальных условиях процесс абразивного полирования осуществляется зернами, имеющими геометрическую форму, близкую к сфере. Поэтому рассмотрены закономерности взаимодействия зерна в форме сферы с обрабатываемым металлом и материалом инструмента-полировальника при условии, что на зерно при полировании действует радиальное усилие P_{y0} (рис. 1). В [6] установлено, что условное напряжение резания σ и коэффициент резания $K_{рез}$ применительно к процессу микрорезания зерном в форме сферы описываются:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\left(\sqrt{\frac{a}{2R}} - \operatorname{tg} \frac{\psi_0}{2} \right)} = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{K_{рез0}}; \quad (14)$$

$$K_{рез0} = 2 \cdot \left(\sqrt{\frac{a}{2R}} - \operatorname{tg} \frac{\psi_0}{2} \right), \quad (15)$$

где a – толщина среза, м; R – радиус абразивного зерна, м.

При таком представлении процесса микрорезания условное напряжение резания σ тем меньше, чем больше отношение a/R и меньше условный угол трения передней поверхности режущего зерна с обрабатываемым металлом ψ_0 .

Коэффициент резания $K_{рез}$, наоборот, тем меньше, чем меньше a/R и больше условный угол трения передней поверхности режущего зерна с обрабатываемым металлом ψ_0 . Зависимости (14) и (15) справедливы при микрорезании обрабатываемого металла. При микрорезании материала инструмента-полировальника зависимость (15) примет вид:

$$K_{рез1} = 2 \cdot \left(\sqrt{\frac{a}{2R}} - \operatorname{tg} \frac{\psi_1}{2} \right). \quad (16)$$

Как видно, зависимости (15) и (16) отличаются условными углами трения ψ_0 и ψ_1 , поскольку коэффициенты трения передней поверхности режущего зерна с обрабатываемым металлом f_0 и материалом инструмента-полировальника f_1 различны. Для того чтобы выполнялось условие $K_{рез0} < K_{рез1}$ необходимо выполнить условие $f_0 > f_1$. Это соответствует приведенному выше решению, полученному при моделировании абразивного зерна в форме двух спаренных между собой конусов (рис. 1,а).

Из зависимостей (15) и (16) вытекает важный вывод, связанный с тем, что чем больше отношение a/R , тем больше коэффициент резания. Учитывая то, что глубина внедрения абразивного зерна в материал инструмента-полировальника больше глубины внедрения зерна в обрабатываемый металл, то, очевидно, выполняется условие $K_{рез0} < K_{рез1}$. Из этого вытекает, что при микрорезании абразивным зерном в форме сферы будет гарантированно выполняться условие $P_{z0} < P_{z1}$, а это обеспечит достаточно прочное удержание зерна в инструменте-полировальнике и позволит осуществить процесс съема обрабатываемого металла.

Выводы. В работе теоретически определены условия, при которых абразивное зерно не будет перекатываться в зоне обработки, а прочно удерживаться в материале инструмента-полировальника и осуществлять процесс резания и съема металла с обрабатываемой поверхности. Расчетами установлено, что в случае моделирования абразивного зерна в форме двух конусов, которые внедряются в материал инструмента-полировальника и обрабатываемый металл, тангенциальные усилия, возникающие в материале инструмента-полировальника и обрабатываемом металле, будут приблизительно равны. Поэтому абразивные зерна с одинаковой вероятностью могут как перекатываться в зоне обработки, так и удерживаться в материале инструмента-полировальника и совершать полезную работу. При моделировании абразивного зерна в форме сферы за счет особенностей процесса резания (стружкообразования) тангенциальное усилие, возникающее в обрабатываемом металле, будет меньше тангенциального усилия, возникающего в материале инструмента-полировальника. Поэтому в данном случае вероятность удержания зерна в инструменте выше и выше эффективность процесса абразивного полирования. При этом доказано, что прочность удержания абразивного зерна в материале инструмента-полировальника зависит от отношения твердости и прочности на сжатие мате-

риала. Это позволяет научно обоснованно подойти к выбору необходимого материала инструмента-полировальника.

Список литературы:1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. проф. *А.Н. Резникова*. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с. 2. *Шубников А. В.* Элементарные механические явления при шлифовании и полировании / *А.В. Шубников* // Качество поверхности деталей машин. – М.: Изд. АН СССР, 1957. – №3. – С. 32–35. 3. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / *Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий*. – Киев: Наук. думка, 1979. – 244 с. 4. *Шкурупий В.Г.* Изучение механизма формирования поверхности при обработке резанием / *В.Г. Шкурупий* // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 5. – Харків: НТУ “ХП”, 2010. – С. 114–121. 5. *Шкурупий В.Г.* Исследование процесса полирования свободным абразивом / *В. Г. Шкурупий* // Вісник НТУ “ХП”. Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ “ХП”. – 2016. – № 5 (1177). – С. 87–89. 6. *Андилахай А.А.* Научные основы эффективной отделочной абразивной обработки деталей затопленными струями: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / *А.А. Андилахай*. – Одесса, 2013. – 47 с.