

2. Шиманович, Д. Л. Методы формирования алюмооксидных микроструктур для мощных систем электромеханики / Д. Л. Шиманович, В. А. Сокол, Г. В. Литвинович // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2014. – Т. 14. – № 3. – С. 170–173.

3. Сокол, В. А. Технологические приемы формирования Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> микроструктур для мощных электромеханических систем / В. А. Сокол, Д. Л. Шиманович, Г. В. Литвинович // Доклады БГУИР. – 2012. – № 8. – С. 44–49.

4. Шиманович, Д. Л. Формирование пассивной части многокристалльных модулей на базе алюмооксидных оснований и Ni-Cu металлизации / Д. Л. Шиманович // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2013. – Т. 13. – № 3. – С. 178–181.

5. Шиманович, Д. Л. Технологические режимы для снижения внутренних напряжений, улучшения термической устойчивости к образованию трещин и повышения электрической прочности в анодных структурах Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Д. Л. Шиманович // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2015. – Т. 15. – № 3. – С. 79–82.

6. Шиманович, Д. Л. Оптимизация методов формирования толстослойных диэлектрических покрытий на основе анодного оксида алюминия при электрохимическом анодировании широкоформатных Al-подложек и теплопроводящих оснований с радиаторами / Д. Л. Шиманович // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2016. – Т. 16. – № 3. – С. 116–119.

УДК 621.923.6

### 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАТЫЛОВАНИЯ ДИСКОВЫХ ЗУБОРЕЗНЫХ ФРЕЗ

*Ажар А. В., Дулуб А. Д., Кустов С. В., Минасян Г. О.  
Белорусский национальный технический университет  
e-mail azhar.a@bntu.by*

*Summary. 3D modeling was carried out to determine the optimal diameters of grinding wheels for backing the back surface of the tooth of a disk gear cutter with a module  $m = 1...16$  mm. A linear relationship has been established between the height of the tooth, the angle of the flute of the cutter and the diameter of the grinding wheel. It has been proven that the formation of a “saddle” on the tooth during grinding with a wheel obtained by modeling does not affect the overall tool life.*

Затылование шлифованием задней поверхности зуба по кривой в виде спирали Архимеда, наиболее трудоемкая, сложная и ответственная (финишная) операция, на которой достигается требуемая точность и качество изготовления дисковой зуборезной (модульной) фрезы. Наибольшие проблемы при выборе метода затылования связаны с точностью получаемого профиля и производительностью операции, которая лучше всего обеспечивается цилиндрическим спрофилированным шлифовальным кругом. При этом стремятся выбрать круг наибольшего диаметра. При таком выборе часто не удается получить затылок, отшлифованный по всей длине зуба, т. к. в конце рабочего хода круг может задеть соседний зуб. Недобег круга приводит к образованию «седла» на зубе. В результате спинка зуба может выступать над профилирующей режущей кромкой. Этот недостаток зуба с «седлом» часто проявляется при переточке инструмента, сокращая его суммарный срок службы. Решить эту проблему не удастся даже при уменьшении числа зубьев. При этом современное производство нацелено на использование «многозубых» фрез повышенной производительности. Тогда применяется двойное затылование. Нешлифованный участок подвергают затылованию резцом с помощью кулачка со спадом  $K_1$  в 1,5–1,75 раза большим спада кулачка  $K$  для шлифованной части. Эта дополнительная операция или переход приводят к увеличению трудозатрат и стоимость изготовления фрезы.

На практике диаметр дискового шлифовального круга для затылования задних поверхностей рассчитывается по формуле (1):

$$D_{\text{кр.расч.}} = \frac{D_{\text{фр}}}{2} \sin \frac{180}{z} \cdot \frac{1}{\sin \alpha_{\alpha}}, \quad (1)$$

где  $D_{\text{фр}}$  – диаметр фрезы, мм;  $z$  – число зубьев, шт;  $\alpha_{\alpha}$  – задний угол на зубе, град.

Выбор круга по формуле (1) позволяет сократить объем опытных испытаний, но не позволяет оптимизировать параметры операции затылования и тем более конструкцию фрезы. Для решения задач выбора оптимального диаметра, профиля и положение шлифовального круга для операции затылования, а также назначения конструктивных параметров фасонной фрезы связанных с особенностями заточки и переточки инструмента ранее была разработана методика. Она основана на применении современных векторных параметрических 3D САПР. Метод апробирован на фасонных многониточных фрезах для обработки статора линейного двигателя ОАО «Планар» и ряде дисковых модульных фрез.

Целью работы является усовершенствование предлагаемого метода моделирования операции затылования, уточнения его возможностей для оптимизации конструкции и технологии изготовления стандартных дисковых фрез модулем  $m = 1 \dots 16$  мм.

Результаты 3D моделирования подтвердили несостоятельность формулы (1) для определения диаметров шлифовальных кругов обеспечивающих затылок зуба на  $2/3$  длины, за исключением фрез модулем  $m = 6$  мм (рис. 1). В остальных случаях диаметр рассчитанного круга больше смоделированного. Разница диаметров достигает 2,5 раз при затыловании фрез модулем  $m = 14$  мм. Длина участка затылования рассчитанным кругом меньше чем смоделированным и разница этих длин достигает 42 % для фрез с  $m = 16$  мм. Увеличение диаметра круга по отношению к оптимальному приводит уменьшению длины затылования, но в меньшей степени. Таким образом, в случае преобладающего влияния стоимости операции затылования на стоимость инструмента и его эксплуатацию диаметр круга необходимо выбирать по расчетным зависимостям. В случае большего влияния на цену эксплуатации фрезы цены восстановления и суммарного ресурса инструмента следует выбирать смоделированные круги. Анализ геометрии шлифовальных кругов подтверждает необходимость учета при выборе диаметра круга не только окружного шага  $\theta$  (числа зубьев  $z$ ) и диаметра затачиваемой фрезы  $D_{\text{фр}}$ , но и высоты профиля зуба  $H$  с углом стружечной канавки  $\theta_2$ . Так дисковые фрезы модулем  $m = 6$  и 7 мм, 8 и 9 мм, 10 и 11 мм, 12 и 14 мм имеют одинаковые диаметры  $D_{\text{фр}}$  и число зубьев  $z$ , но разные диаметры кругов для затылования (рис.1). При проведении дополнительных построений на модели фрезы диаметром  $\varnothing 140$  с числом зубьев  $z = 10$  (аналог фрезы модулем  $m = 10$  мм) установлено, что при увеличении угла стружечной канавки  $\theta_2$  (рис. 2) диаметр смоделированного круга линейно возрастает, при увеличении высоты профиля зуба  $H$  (рис. 3) линейно уменьшается. Остаточная седлообразность при затыловании профиля зуба на  $2/3$  длины не влияет на контакт с деталью рабочего профиля предельно сточенного зуба после восстановления (расстояние  $y$ ) (рис. 4).

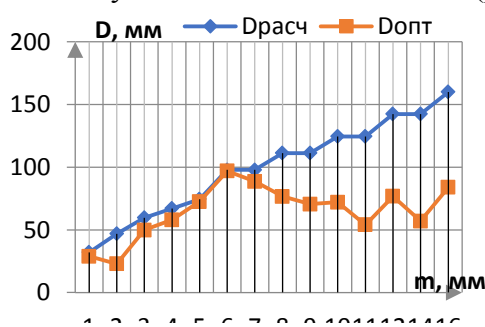


Рисунок 1 – Зависимость диаметра  $D$  шлифовального круга от модуля  $m$  фрезы:  $D_{\text{расч}}$  – рассчитанный диаметр круга;  $D_{\text{опт}}$  смоделированный

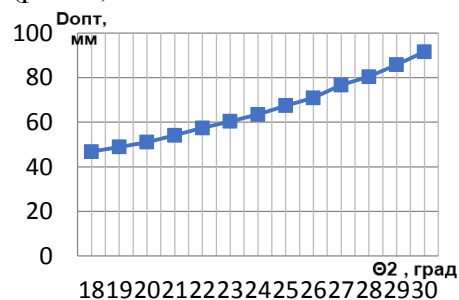


Рисунок 2 – Зависимость диаметра  $D_{\text{опт}}$  смоделированного круга от угла стружечной канавки  $\theta_2$  дисковой фрезы модулем  $m = 10$  мм

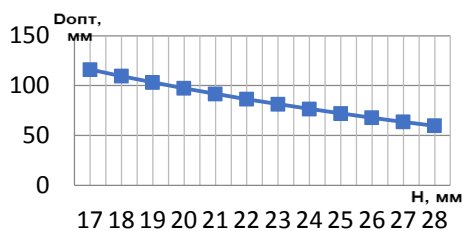


Рисунок 3 – Зависимость диаметра  $D_{\text{опт}}$  смоделированного круга от высоты зуба  $H$  дисковой фрезы модулем  $m = 10$  мм

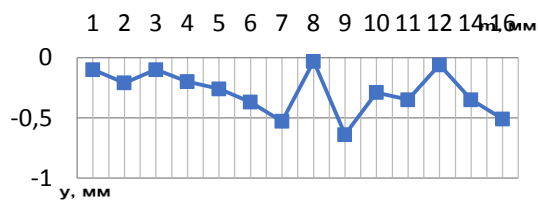


Рисунок 4 – Расстояние  $y$  между вершиной седла и высотой профиля максимально сточенного зуба дисковых фрез модулем  $m = 1 \dots 16$  мм

Формула (1) при выборе шлифовального круга носит приблизительный характер и не позволяют оптимизировать операцию затылования и тем более конструкцию дисковой модульной фрезы. На выбор диаметра круга кроме диаметра фрезы, количества зубьев и заднего угла заточки влияет высота профиля и угол стружечной канавки. Седлообразность возникающая при затыловании фрез смоделированными кругами не влияет на величину предельно сточенного зуба после восстановления, что исключает операцию второго затылования зуба резцом. Выбор оптимального шлифовального круга должен основываться не только на ограничениях, связанных с параметрами станка и применяемой оснастки, но и осуществляться с учетом комплексного показателя операции затылования учитывающего ресурс, как шлифовального круга, так и затачиваемого инструмента.

УДК 621.785

### УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА МОДИФИЦИРОВАНИЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА

Алексеев Ю. Г., Будницкий А. С., Сенченко Г. М.

Белорусский национальный технический университет,

e-mail: budnitskiy@park.bntu.by

**Summary.** A new method is proposed for increasing the hardness, wear resistance and antifriction characteristics of the surface of titanium and titanium alloys, based on electrochemical-thermal treatment, which is performed by electrolytic-plasma heating in a nitrogen- or carbon-containing electrolyte, followed by hardening by turning off the operating voltage. When a voltage in the range of 100–300 V is applied to the electrochemical cell, local boiling of the liquid occurs around the workpiece due to the release of Joule heat. Under these conditions, the electrolyte near the surface of the workpiece is heated to the boiling point, and the workpiece being processed, being separated from the bulk of the electrolyte, is heated to temperatures of 400–1100 °C. The high temperatures of the workpiece will make it possible to saturate the surface with atoms of light elements contained in donor substances dissolved in the electrolyte. The presence of carbon-containing and nitrogen-containing components in the electrolyte determines a certain carbon or nitrogen potential of the gas-vapor shell, as a result of which chemical-thermal treatment becomes possible. Under the conditions of electrolytic-plasma heating, diffusion processes are intensified, which makes it possible to significantly reduce the time of chemical-thermal treatment to 5–10 min.

Благодаря особым свойствам титан и сплавы на его основе получили в настоящее время широкое распространение при производстве ряда ответственных изделий. Эти материалы применяются в самолетостроении, атомной энергетике, космической технике, ультразвуковой технике, а также при производстве изделий медицинского назначения. Причем именно производство изделий медицинского назначения является в последнее время одной из важнейших сфер применения титана и его сплавов.

К важнейшим преимуществами титана и титановых сплавов относятся малая плотность, высокая удельная прочность, высокая жаропрочность и чрезвычайно высокая корро-