

температуры, затем сделать выдержку этой температуры по времени до достижения на каждом этапе равномерного нагрева плиты по толщине, не превышая $\sigma_B=500$ МПа и $\sigma_{02}=250$ МПа [3].

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Демьянушко И.В. и др. Термопрочность деталей машин // М.: Машиностроение. – 1975. – 455 с.
2. Василевич, Ю.В. Выполнение условия равновесия твердого тела с нетонким остаточным клиновидным двойником в случае плоскодеформированного состояния / Ю.В. Василевич, О.М. Остриков // Республиканский межведомственный сборник научных трудов «Машиностроение». Минск, вып. 33, 2021, с. 128-134.
3. Марочник сталей и сплавов. Механические свойства стали 20Х25Н19С2Л.

УДК 621.923.6

АНАЛИЗ ОПЕРАЦИИ ЗАТЫЛОВАНИЯ СТАНДАРТНЫХ ДИСКОВЫХ МОДУЛЬНЫХ ФРЕЗ МЕТОДОМ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ажар А.В., Осадчий Е.Н., Ишкуло П.Ю.

Белорусский национальный технический университет Минск, Республика Беларусь

Дисковые модульные фрезы – это разновидность фасонных дисковых насадных однониточных фрез. Они применяются для чернового и чистового нарезания прямозубых цилиндрических колес, чернового нарезания зубьев косозубых колес, чернового, а иногда чистового нарезания прямозубых конических колес, зубчатых реек, шлицевых валов методом копирования в условиях единичного и мелкосерийного производства. Фрезы затылованные, профиль зуба выполнен по эвольвенте. Теоретически для каждого нарезаемого колеса необходимо иметь свою фрезу. Практически, с некоторой погрешностью, одной фрезой данного модуля можно обрабатывать зубчатые колеса с определенным числом зубьев. Профиль зуба фрезы, входящий в набор, соответствует наименьшему числу зубьев определенного интервала. ГОСТ 10996 — 64 установлено два набора фрез: из 8-ми фрез для нарезания колес с модулем до 8 мм; из 15-ти фрез для колес с модулем свыше 8 мм [1].

Основной способ заточки задней поверхности фасонной фрезы при изготовлении – затылование по кривой в виде спирали Архимеда [2, 3]. Этот метод наиболее простой с точки зрения реализации и имеющегося оборудования. Фрезы перетачиваются при затуплении только по передней поверхности, независимо от вида износа, а затылование по спирали Архимеда позволяет сохранить высоту профиля зуба и обеспечить удовлетворительные задние углы во всех радиальных сечениях зуба на всех конхоидах как у нового, так и восстановленного инструмента. Затылование шлифованием наиболее

трудоёмкая, сложная и ответственная операция на которой достигается требуемая точность и качество изготовления инструмента. Наибольшую производительность операции затылования обеспечивают цилиндрические спрофилированные шлифовальные круги. При этом стремятся выбрать круг наибольшего диаметра. Однако при таком выборе часто не удается получить затылок, прошлифованный по всей длине зуба, т.к. в конце рабочего хода круг может задеть соседний зуб. Недобег круга часто приводит к образованию «седла» на зубе. Решить эту проблему не удастся даже при уменьшении числа зубьев. При этом современное производство нацелено на использование так называемые «многозубых» фрез повышенной производительности.

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

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

где $D_{фр}$ - диаметр фрезы, мм; z - число зубьев; α_{α} - задний угол на зубе.

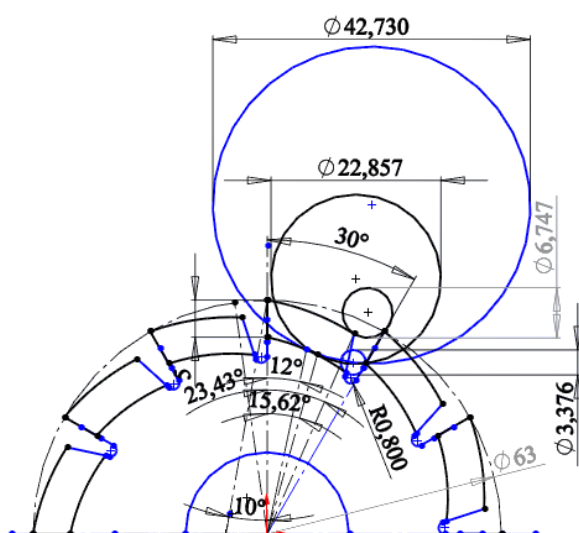
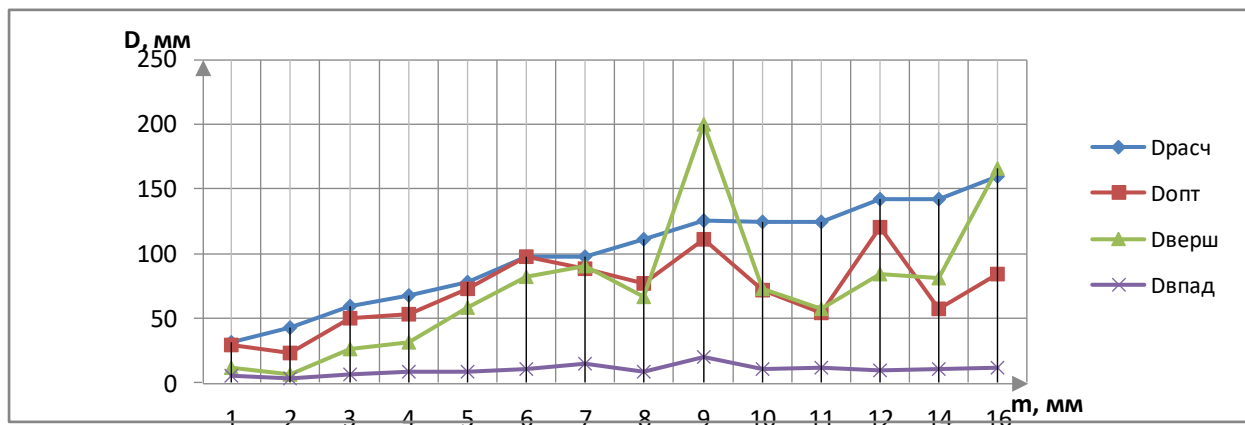


Рис. 1 – Моделирование диаметра круга для затылования фрезы модулем $m=2$ мм

Разработанная методика 3D моделирования операции затылования фасонной фрезы с использованием современных векторных САПР позволяет выбрать оптимальный диаметр, профиль и положение шлифовального круга [4]. Она основана на построении окружности (образующей наружного контура профиля шлифовального круга), касательной к образующей затылка зуба в выбранном радиальном сечении и проходящей через соответствующую точку профиля на передней поверхности соседнего зуба (рис. 1).

Моделирование затылования ряда фасонных фрез показало несостоятельность зависимости (1), т.к. она не учитывает изменяющиеся параметры глубины фасонного профиля зуба и угол впадины стружечной канавки фрезы [5]. С целью определения оптимальных диаметров шлифовальных кругов, обеспечивающих заточку профиля зуба на $2/3$ длины, и сравнения условий заточки зубьев фрез кругами, рассчитанными по формуле (1) проведено моделирование операции затылования стандартных дисковых фрез модулем $m=1...16$ мм (рис. 1). Оценка эффективности применения рассчитанных и смоделированных кругов, осуществляется путем сравнения диаметров кругов и длин (углов) затылования при их использовании (рис. 2, 3).



$D_{расч}$ - диаметр шлифовального круга (ШК) для затылования полученный по формуле (1); $D_{опт}$ - диаметр ШК для затылования 2/3 длины профиля, полученный моделированием; $D_{верш}$ - диаметр ШК для полного затылования по вершине зуба; $D_{впад}$ - диаметр ШК для полного затылования по впадине зуба
 Рис. 2 – График зависимости диаметра шлифовального круга от модуля фрезы

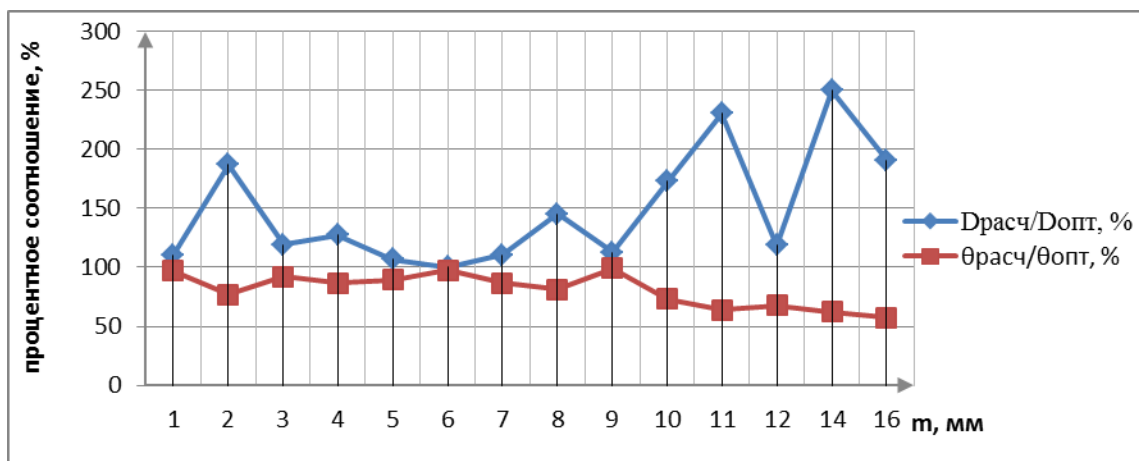


Рис. 3 – Сравнение расчетных и оптимальных диаметров шлифовальных кругов и длин затылования для фрез модулем $m = 1...16$ мм

Так, совпадение диаметра, рассчитанного и смоделированного оптимального круга, как и длины затылования наблюдается только для фрез модулем $m=6$ мм. Для фрез с $m=1$ мм и $m=9$ мм значения диаметров и длин затылования имеют минимальные различия. В остальных случаях диаметр смоделированного круга получается меньше расчетного. Разница между диаметрами кругов достигает 2,5 раз для затылования фрез с $m=14$ мм, а длин затылования 42% для заточки фрез с $m=16$ мм. При этом длина затылования рассчитанным кругом уменьшается по сравнению с оптимальным, но в меньшей степени чем происходит увеличение диаметра круга. Таким образом, в случае преобладающего влияния стоимости операции затылования на стоимость инструмента и его эксплуатации диаметр круга необходимо выбирать по расчётным зависимостям. В случае большего влияния на цену эксплуатации фрезы цены восстановления и суммарного ресурса инструмента

следует выбирать смоделированные круги обеспечивающие оптимальную длину затылования зуба.

Проведенный анализ геометрии шлифовальных кругов для затылования стандартных дисковых модульных фрез подтверждает необходимость учета при выборе диаметра круга не только окружного шага и диаметра затачиваемой фрезы, но и высоты профиля зуба с углом межзубой впадины.

1. Фельдштейн, Е.А. Металлорежущие инструменты: справочник конструктора / Е.А. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – Минск: Новое знание, 2009. – 1039 с.
2. Хайруллин А.В., Шапарев А.В. Особенности затылования режущего клина сложнопрофильного инструмента // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – Т. 39. – С. 1166–1170. – URL: <http://e-koncept.ru/2017/970560.htm>.
3. Палей, М.М. Технология шлифования и заточки режущего инструмента / М.М. Палей, Л.Г. Дибнер, М.Д. Флид. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
4. Ажар А.В., Минасян Г.О., Кошевой А.Н. Оптимизация операции заточки затылованных дисковых фасонных фрез методами компьютерного 3D моделирования. Научное издание «НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ-2020». Сборник материалов VII Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума 17–18 ноября 2020 года. Том 1, г. Минск, БНТУ, 2020. – 252 с.
5. Ажар А.В., Осадчий Е.Н., Ишкуло П.Ю. 3D моделирование оптимального затылования дисковых модульных фрез. Научное издание «НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ-2021». Сборник материалов VIII Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума 11–12 ноября 2021 года. ТОМ 1, г. Минск, БНТУ, 2021. – 188 с.

УДК 621.785

УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА

**Нисс В.С.¹, Алексеев Ю.Г.¹, Королёв А.Ю.¹, Калиниченко А.С.²,
Будницкий А.С.¹, Сенченко Г.М.¹**

1) Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

2) Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Республика Беларусь

В качестве альтернативы существующим методам упрочнения поверхности титана и титановых сплавов предложен метод электрохимико-термической обработки – электролитно-плазменный нагрев в азот- или углеродсодержащем электролите с последующей закалкой путем отключения рабочего напряжения. При подаче напряжения в диапазоне 100–300 В на