

12. Иванов, И. Е. Методы подоби́я физических процессов: учеб. пособие / И. Е. Иванов, В. Е. Ерещенко. – М. : МАДИ. 2015. – 144 с.

12. Кульгейко, М. П. Роль инверсионности способов магнитно-электрической обработки при создании технологических комплексов генерации поверхностей / М. П. Кульгейко, Г. В. Петришин, Н. М. Симанович // Вестник Белорусско-Российского ун-та. 2020. №4(69). – С. 21–30.

14. Акулович Л. М. Упрочняющая магнитно-абразивная обработка поверхностей с управлением процессом резания / Л. М. Акулович, О. Н. Ворошуха // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 1 (181). – С. 3–8.

15. Алифанов, А. В. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // Литье и металлургия. 2012. № 3. – С. 77–82.

Поступила 05.09.2022

УДК 621.923.6

Ажар А. В., Минасян Г. О., Осадчий Е. Н., Ишкуло П. Ю.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЗАТОЧКА ЗУБОРЕЗНЫХ МОДУЛЬНЫХ ФРЕЗ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА 3D-МОДЕЛИ ОПЕРАЦИИ ЗАТЫЛОВАНИЯ

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

Показано, что наибольшую производительность операции затылования профильных (фасонных) фрез обеспечивают цилиндрические спрофилированные шлифовальные круги. Максимальный диаметр шлифовального круга зависит от требуемой длины затылованной части зуба и ограничен условием врезания в соседний зуб. Установлено, что принятый метод расчета диаметра круга не позволяет обеспечить условия оптимального затылования фрезы, и не учитывает ряд ее конструктивных параметров. Предложенный метод 3D моделирования операции затылования дает более широкие возможности по оптимизации технологии заточки фрез и конструкции инструмента на этапе проектирования и подготовки производства.

Введение. Дисковые модульные фрезы – это разновидность профильных (фасонных) насадных фрез для нарезания зубчатых изделий [1]. Они применяются для черного и чистового нарезания прямозубых цилиндрических колес, черного нарезания зубьев косозубых колес, черного, а иногда чистового нарезания прямозубых конических колес, зубчатых реек, шлицевых валов методом копирования в условиях единичного и мелкосерийного производства. Теоретически для каждого нарезаемого колеса необходимо иметь свою фрезу. Практически, с некоторой погрешностью, одной фрезой данного модуля можно обрабатывать зубчатые колеса с числом зубьев определенного интервала. Установлено два набора: из 8-ми фрез для нарезания колес с модулем до 8 мм; из 15-ти фрез для колес с модулем свыше 8 мм [2].

Дисковые фрезы применяются на универсальных и специализированных фрезерных станках, в том числе и с ЧПУ. Уступая по производительности и точности инструментам работающим методом обката (червячные фрезы, долбяки), они обеспечивают достаточно эффективное изготовление небольших партий или единичных экземпляров деталей с зубчатым профилем за счет простой кинематики формообразования при наличии делительных устройств.

При проектировании, изготовлении и восстановлении дисковых зуборезных фрез возникают типовые проблемы характерные большинству профильных фрез. Они связаны с особенностями формирования профиля и задней поверхности зуба инструмента,

которые определяются условиями формообразования после переточки [3]. У профильных фрез работающего методом копирования условия формообразования изменяются независимо от поверхности переточки и обеспечиваются путем восстановления положения исходной инструментальной поверхности относительно обрабатываемой с помощью механизмов станков. Наиболее рационально сьем поврежденного слоя режущей части инструмента осуществлять по поверхности износа. Несмотря на преобладающий износ вдоль задней поверхности, профильные фрезы, перетачиваются по передней поверхности. Процесс переточки по задней поверхности у таких инструментов сложный и дорогой из-за наличия фасонной режущей кромки и необходимости обеспечения задних углов вдоль всей задней поверхности. Минимизировать потерю точности обработки после переточки по передней поверхности можно, придав неперетачиваемой задней поверхности такой формы, которая бы не изменяла или изменяла в минимальной степени форму, размеры профиля и углы заточки профилирующей поверхности инструмента после восстановления режущей способности. Реализовать поставленную задачу для большинства фасонных многозубых инструментов позволяет спиралевидная заточка (затылование) по задней поверхности при изготовлении.

Анализ схем и сравнение методов затылования показал, что наиболее простым, пространственным и достаточно точным методом заточки задних поверхностей фасонных фрез является *затылование по спирали Архимеда* на специализированных затыловочных, токарно-затыловочных или резьбошлифовальных станках [4].

В зависимости от требований к качеству задней затылованной поверхности и высоты профиля зуба процесс затылования осуществляется только резцом, резцом с последующей обработкой шлифовальным кругом или только шлифовальным кругом на станках, имеющих согласованные вращательное движение заготовки и поступательное инструмента в радиальном и при необходимости в осевом направлении. Кроме перечисленных к группе станков способных осуществлять затылование следует отнести токарные и заточные станки с ЧПУ с управляемой осью *C*.

При использовании резца зуб фрезы можно затыловать целиком независимо от окружного шага и высоты профиля. В свою очередь шлифовальный круг подбирается так, чтобы при отводе не происходил зарез следующего зуба. При заточке шлифованием обычно ограничиваются затылованием на $1/2-2/3$ длины, из-за малого окружного шага между зубьями. При этом может возникнуть седлообразность, которая бывает допустимой или недопустимой, в зависимости от ее подъема и количества заточек фрезы. Фрезу можно перетачивать по передней поверхности максимум до 35 % от изначальной длины зуба в связи с ограничениями по прочности и точности обработки, окончательно сточенной фрезой.

Основным видом износа фасонных зуборезных затылованных фрез является износ по задней поверхности на величину h_z (рис. 1, *a*). Затачивание фрез после затупления осуществляется по передней поверхности кругами тарельчатого или чашечного типа на универсально-заточных, специализированных заточных или шлицешлифовальных станках, в том числе и с ЧПУ (рис. 1, *б*) [5].

Толщина слоя металла, снимаемого за одно затачивание, мм:

$$h = h_z + \Delta h, \quad (1)$$

где Δh – дополнительный слой на переточку в пределах $(0,1-0,2)$ мм.

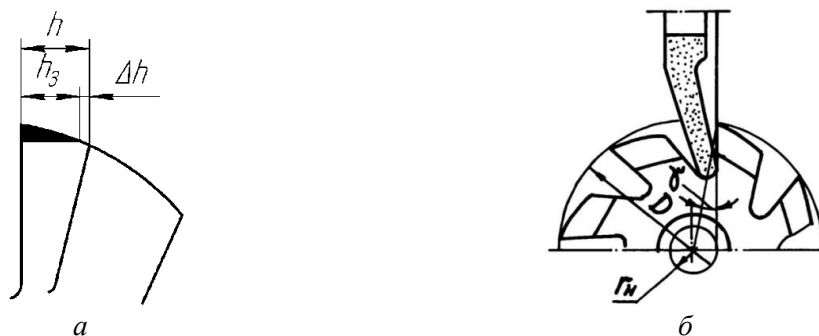


Рис. 1. Схема износа и перетачивания зуба фрезы

Наиболее вероятным является припуск на заточку для черновых фрез от 0,3 до 0,5 мм, для чистовых фрез от 0,15 до 0,20 мм. Хотя для некоторых черновых фрез толщина слоя при затачивании достигает 1 мм.

При изготовлении дисковая фасонная фреза после заточки по передней шлифуется по задней затылованной поверхности. Она обрабатывается последней, а сама операция обеспечивает окончательную размерную точность и биение профиля, остроту режущей кромки и шероховатость задней поверхности инструмента.

В производстве получили применение три метода шлифования затылкапрофильных фрез: чашечным коническим, пальцевым и фасонным дисковым кругом [6]. В двух последних случаях шлифовальные круги заправляют соответственно профилю шлифуемых фрез. Наибольшие проблемы при выборе метода затылования связаны с точностью получаемого профиля и производительностью операции. Наибольшую производительность обеспечивают цилиндрические спрофилированные шлифовальные круги. При этом стремятся выбрать круг наибольшего диаметра. Он требует меньше правок в ходе работы, что повышает точность профиля затылуемого инструмента, увеличивает общий ресурс круга. Для обеспечения заданной скорости резания порядка 25–30 м/с нет необходимости в увеличении частоты вращения шпинделя станка, которая при малом диаметре круга может быть не реализована по техническим причинам. Однако при выборе круга большего диаметра часто не удается получить затылок, протшлифованный по всей длине зуба, т. к. в конце рабочего хода круг может задеть соседний зуб. Недобег круга часто приводит к образованию «седла» на зубе (рис. 2) [6]. Решить эту проблему не удастся даже при уменьшении числа зубьев.

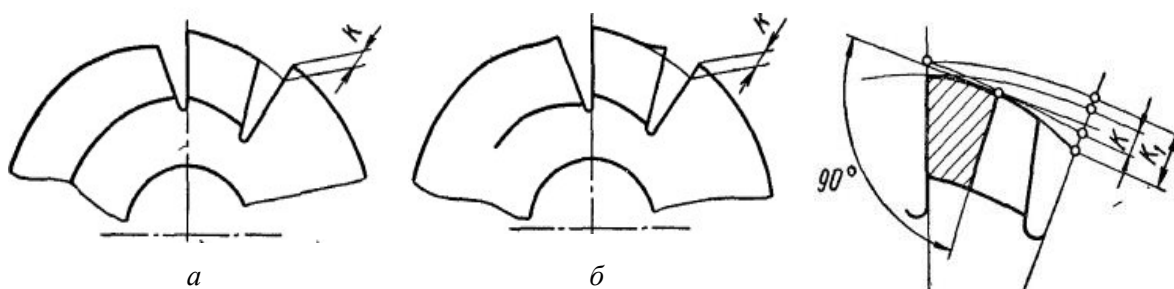


Рис. 2. Правильный (а) и неправильный седлообразный (б) спады затылка у фрез

Рис. 3. Схема зуба при двойном затыловании

При этом современное производство нацелено на использование так называемые «многозубых» фрез повышенной производительности. Применение двойного затылования, устраняет увеличенный по высоте и по сторонам непрошлифованный участок зуба. Нешлифованный участок предварительно затылуют резцом с помощью кулачка, величину

спада K_l которого делают в 1,3–1,75 раза больше величины спада кулачка K для шлифованной части (рис. 3) [2; 6]. Эта дополнительная операция или переход приводят к увеличению трудозатрат и стоимость изготовления фрезы.

Таким образом, затылование шлифованием наиболее трудоемкая, сложная, точная операция изготовления инструмента. Она характеризуется большим разнообразием методов шлифования, форм и размеров шлифовальных кругов, которые определяют точность и производительность процесса затылования, а также эксплуатационные свойства и долговечность фрез. Технологическая возможность получения затылованной задней поверхности также должна учитываться при конструировании инструментов (выборе диаметра, числа зубьев, угла стружечной канавки). На практике инженеры сталкиваются с проблемой выбора эффективных и технически обоснованных решений при проектировании и изготовлении затылованных фрез. Существующие методы определения характеристик шлифовальных кругов и схем затылования носят приблизительный характер и требуют уточнения путем опытных испытаний, не отражают влияния всех конструктивных параметров затылуемых фрез, а также технико-экономических показателей изготовления и эксплуатации этих инструментов.

Задачи исследований. Для определения оптимальных конструктивных параметров затылованных профильных (зуборезных) фрез и технологических приемов их заточки и переточки необходимо решить следующие задачи:

– создать методику позволяющего быстро и с высокой точностью определять оптимальный диаметр, профиль и положение шлифовального круга для операции затылования на основе цифрового двойника (2D или 3D модели) фрезы;

– проанализировать как саму операцию затылования, так и эксплуатационные характеристики, в том числе проектную долговечность, дисковых зуборезных модульных фрез затылованных шлифовальными кругами новой конструкции;

– установить степень влияния диаметра шлифовального круга на длину затылования, величину возможного зареза смежного зуба и седлообразности на незатылованном участке зуба;

– выявить конструктивные параметры профильной фрезы, неучтенные в применяемой функциональной зависимости по определению диаметра шлифовального круга для затылования. Установить степень их влияния на размеры круга;

– дать рекомендации по выбору конструкции профильной фрезы и технологии ее затылования исходя из технико-экономических характеристик изготовления, эксплуатации и восстановления инструмента.

Методика исследования операции шлифования задней затылованной поверхности профильной фрезы. На практике диаметр дискового шлифовального круга для затылования задних поверхностей рассчитывается по формуле [2]:

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

где $D_{фр}$ – диаметр фрезы, мм;

z – число зубьев;

α_α – задний угол на зубе.

Выбор шлифовального круга по формуле (2) позволяет сократить объем опытных испытаний, но не позволяет оптимизировать параметры операции затылования и тем более конструкции фрезы, как на этапе проектирования инструмента, так и подготовки производства в целом. 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 разработана методика, основанная на применении современных векторных параметрических 3D САПР [7]. Ключевым этапом применения данного метода является построение 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. 4, 5). Моделирование затылования ряда фасонных фрез показало несостоятельность формулы (2), т. к. она не учитывает изменяющиеся параметры глубины фасонного профиля зуба и угол стружечной канавки фрезы [8].

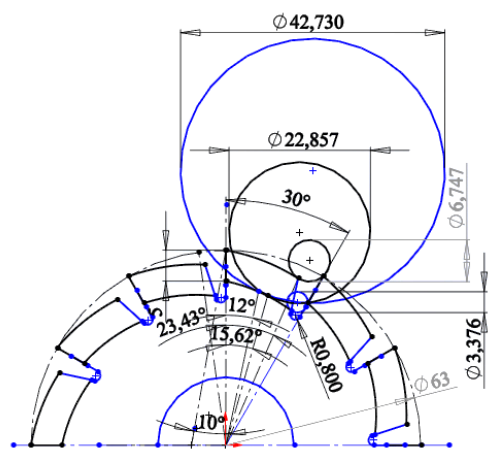


Рис. 4. Моделирование диаметра круга для затылования фрезы модулем $m = 2$ мм

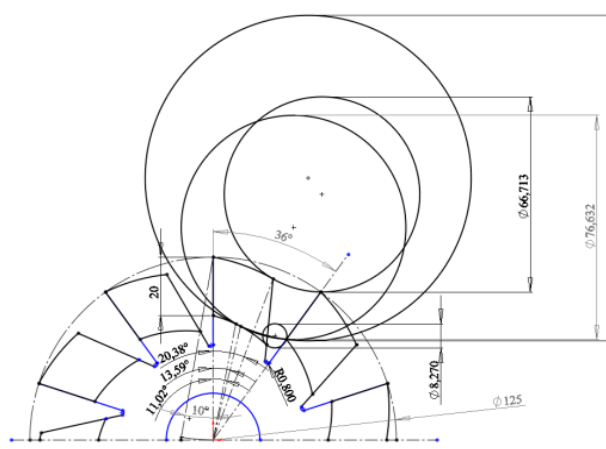


Рис. 5. Моделирование диаметра круга для затылования фрезы модулем $m = 8$ мм

Апробация нового метода оптимизации конструкции и операции затылования профильных фрез. Предложенный метод моделирования апробирован на фасонных многониточных насадных фрезах для обработки пазов в статоре линейного двигателя ОАО «Планар». Благодаря его использованию оптимизирована конструкция фрезы, а именно увеличено числа зубьев z и уменьшен угол стружечной канавки θ . Новая фреза обеспечивает уменьшение машинного времени обработки на 33 % и рост общего ресурс инструмента за счет увеличения числа переточек на 25 % [9].

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 (2) проведено моделирование операции затылования стандартных дисковых фрез модулем $m = 1 \dots 16$ мм [10; 11].

В качестве примера, для фрез модулем $m = 2$ мм (рис. 4) и $m = 8$ мм (рис. 5) построены круги: $\varnothing 3,4$ и $\varnothing 8,2$ – для полного затылования образующей основания зуба без зареза следующего; $\varnothing 6,7$ и $\varnothing 66,7$ – для полного затылование внешней образующей зуба; $\varnothing 22,9$ и $\varnothing 76,6$ – для затылования зуба на $2/3$ без зарезания следующего (оптимальные круги); $\varnothing 42,7$ и $\varnothing 111,2$ – рассчитанные по формуле (2).

Создание 3D модели шлифовального круга для затылования модели дисковой фрезы, позволяет наглядно представить и оценить разработку, проанализировать ее точность, а также рассмотреть варианты ее модернизации (рис. 6, 7).

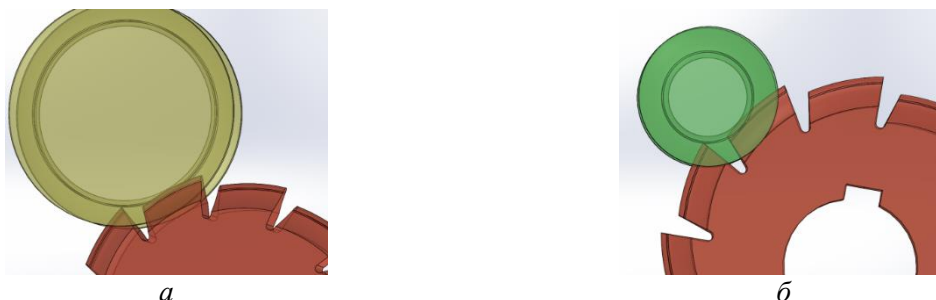


Рис. 6. 3D модель затылования фрезы модулем $m = 2$ мм при условии отсутствия зареза смежного зуба: а – круг $\varnothing 42,7$ (расчетный) в момент шлифования зуба на $1/2$ длины; б – круг $\varnothing 22,9$ (смоделированный) при шлифовании $2/3$ длины зуба



Рис. 7. 3D модель затылования фрезы модулем $m = 2$ мм на всю длину зуба (зарез смежного зуба): а – круг Ø42,7 (расчетный); б – круг Ø22,9 (смоделированный)

Анализ результатов моделирования операции затылования дисковых модульных зуборезных фрез. Оценка эффективности применения рассчитанных и смоделированных кругов, осуществлена путем сравнения диаметров кругов и длин (углов) затылования при их использовании (рис. 8, 9).

Результаты 3D моделирования подтвердили несостоятельность формулы (2) для определения диаметров шлифовальных кругов обеспечивающих затылок зуба на $2/3$ длины, за исключением фрезы модулем $m = 6$ мм, для которой диаметр рассчитанного и смоделированного круга, как и длина затылования совпали (рис. 8).

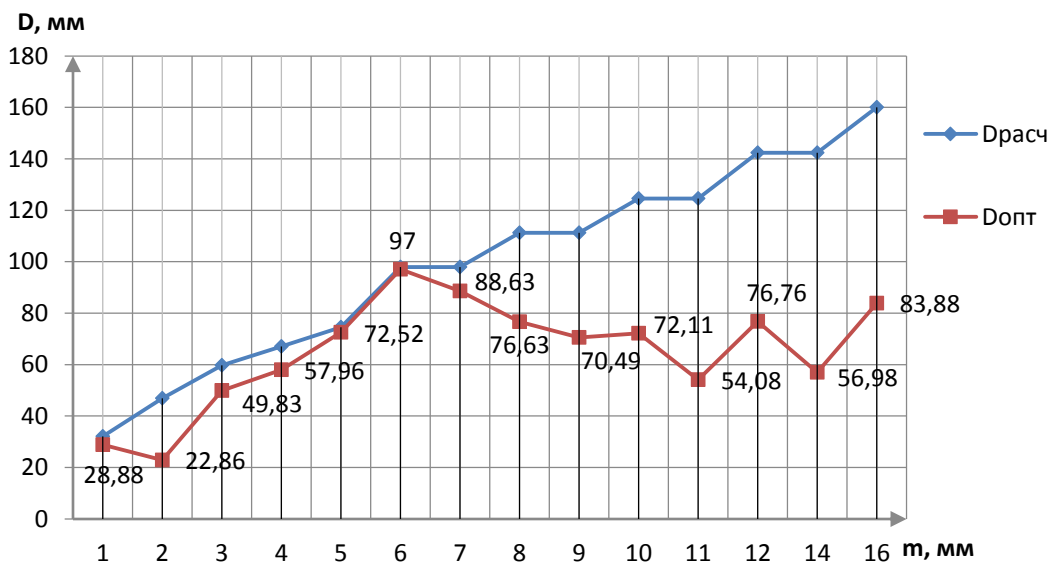


Рис. 8. Зависимость диаметра D шлифовального круга от модуля m фрезы:
 Драсч – диаметр шлифовального круга (ШК) полученный по формуле (2);
 Допт – диаметр смоделированного (оптимального) ШК для затылования на $2/3$ длины зуба

В остальных случаях диаметр рассчитанного круга больше смоделированного. Разница диаметров достигает $2,5$ раз при затыловании фрез модулем $m = 14$ мм. Длина участка затылования смоделированным кругом, больше чем рассчитанным и разница этих длин достигает 75% для фрез с $m = 16$ мм. Увеличение диаметра круга по сравнению с оптимальным (смоделированным) приводит к уменьшению длины затылования, но эта зависимость не прямо пропорциональная (рис. 9).

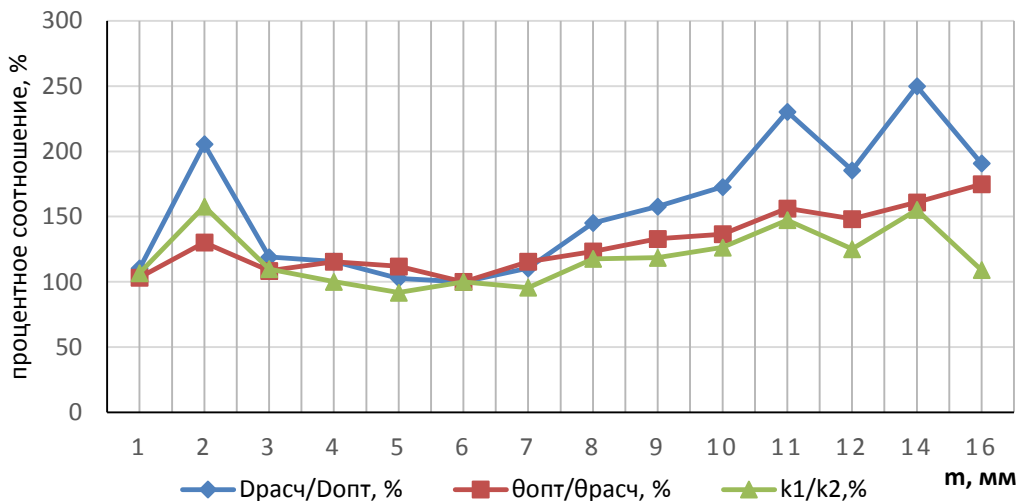


Рис. 9. График отношения диаметров кругов, длин затылования и коэффициента k их относительного влияния на операцию затылования для фрез модулем $m = 1-16$ мм

Анализ коэффициента k отражающего отношения диаметров кругов k_1 и соответствующих им длин затылования k_2 показывает неоднозначный отклик изменения длины затылования на изменение диаметра круга. Наименьший отклик наблюдается у фрез модулем $m = 2$ и 14 мм, наибольший у фрез модулем $m = 5$ и 7 мм.

Прямо пропорциональная связь наблюдается только у фрез модулем $m = 6$ мм.

При выборе диаметра шлифовального круга для затылования не всегда экономически целесообразным будет круг, обеспечивающий затылование на максимально возможную длину зуба. Эффект от его применения может не перекрыть издержки на операцию затылования из-за неравномерного выкрашивания профиля требующего частой правки и дополнительного времени на настройку станка, а также малого суммарного ресурса шлифовального круга. В ряде случаев, особенно при малом окружном шаге и большой высоте зуба затылуемой фрезы, поиск диаметра круга обеспечивающего максимальную длину затылования, приводит к получению параметров недопустимых с точки зрения конструкции инструмента (глубины профиля и присоединительных размеров) и технических характеристик станка (диаметра оправки для установки круга и максимальной частоты вращения шпинделя). Так исходя из сравнения расчетной глубины профиля и диаметра $Donm$ смоделированного шлифовального круга для фрез модулем $m = 11; 14; 16$ мм реализовать затылование всего профиля невозможно. В этом случае допустимо раздельное шлифование по вершине зуба и боковым сторонам. Таким образом, при выборе диаметра круга необходимо учитывать не только геометрическую оптимизацию диаметра заточного инструмента, но и технико-экономическую составляющую его выбора. Так диаметр круга определяет не только его первичную стоимость, но и общий ресурс через допустимое количество правок и припуск на одну правку, связанную с равномерностью износа по высоте профиля. При этом затыловочные круги характеризуются переменной скоростью резания точек по высоте профиля, что вызывает неравномерный износ. Данные круги отличаются от стандартных, прямого профиля, увеличенным припуском на правку из-за значительного отклонения образующей профиля от оси. Чем меньше исходный диаметр круга, тем интенсивнее его износ и больше его разница в разных точках профиля, что может привести к преждевременной потере точности профиля фрезы при затыловании. Поправку на данные условия изготовления и эксплуатации фасонной фрезы может дать показатель учитывающий отношение диаметров сравниваемых кругов и отношение длин затылования которые эти круги обеспечивают. Первое отношение определяет ресурс шлифовального круга (стойкость и количество правок) на операции затылования, а второе – ресурс затылуемой фрезы (количество переточек). Учет

удельных затрат на изготовление и эксплуатацию инструмента через весовые коэффициенты позволяет дать не только техническую, но и экономическую оценку принимаемых решений при оптимизации конструкции и технологии изготовления фрезы. Таким образом, **комплексный показатель операции затылования:**

$$k_3 = \frac{a \cdot k_1}{b \cdot k_2}, \quad (3)$$

где $k_1 = \frac{D_{расч}}{D_{онт}}$ – отношение диаметров D сравниваемых шлифовальных кругов;

$k_2 = \frac{l_{онт}}{l_{расч}} = \frac{\theta_{онт}}{\theta_{расч}}$ – отношение длин l (углов θ) затылования, полученных сравни-

ваемыми кругами;

a – весовой коэффициент удельных затрат на операции затылования;

b – весовой коэффициент удельных затрат на эксплуатацию затылуемого инструмента:

$$a + b = 1.$$

Так при равенстве весовых коэффициентов a и b выбирая диаметр шлифовального круга, следует ориентироваться на коэффициент k значения, которого для стандартных модульных фрез представлены на рис. 9. В случае преобладающего влияния стоимости операции затылования на стоимость фрезы при низких эксплуатационных расходах на затылуемый инструмент диаметр круга необходимо выбирать по формуле (2). В случае значительно большего влияния на цену эксплуатации фрезы цены восстановления и суммарного ресурса инструмента следует выбирать смоделированные круги, обеспечивающие оптимальную длину затылка зуба.

Анализ геометрии шлифовальных кругов подтверждает необходимость учета при выборе диаметра круга не только окружного шага θ (числа зубьев z) и диаметра затылуемой фрезы $D_{фр}$, но и высоты профиля зуба H с углом стружечной канавки θ_2 . Так дисковые фрезы модулем $t = 6$ и 7 мм, 8 и 9 мм, 10 и 11 мм, 12 и 14 мм имеют одинаковые диаметры $D_{фр}$ и число зубьев z , но разные диаметры кругов для затылования (рис. 8). При проведении дополнительных построений на модели фрезы диаметром $\varnothing 140$ с числом зубьев $z = 10$ (аналог фрезы модулем $t = 10$ мм) установлено, что при увеличении угла стружечной канавки θ_2 (рис. 10) диаметр смоделированного круга линейно возрастает, при увеличении высоты профиля зуба H (рис. 11) линейно уменьшается. Остаточная седлообразность при затыловании зуба на $2/3$ длины не влияет на контакт с деталью рабочего профиля предельно сточенного зуба после восстановления (расстояние y) (рис. 12, 13).

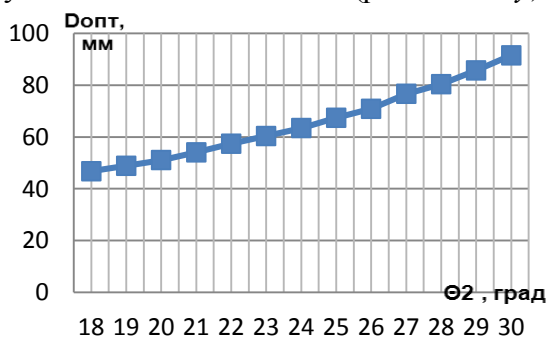


Рис. 10. Зависимость диаметра $D_{онт}$ смоделированного круга от угла стружечной канавки θ_2 дисковой фрезы модулем $t = 10$ мм

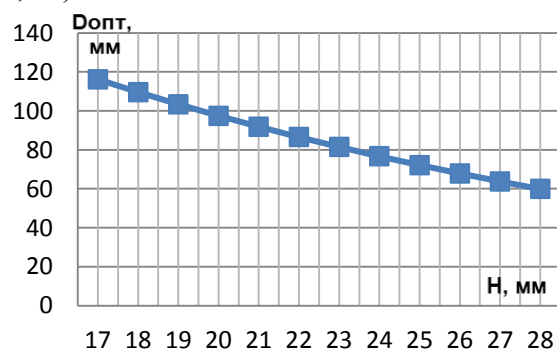


Рис. 11. Зависимость диаметра $D_{онт}$ смоделированного круга от высоты зуба H фрезы с $D_{фр} = 140$ мм и $z = 10$



Рис. 12. Расчетная схема для определения влияния седлообразности на работу максимально сточенной фрезы:
 1 – траектория движения точки В при фрезеровании;
 А – точка профиля максимально сточенного зуба; В – наиболее выступающая точка остаточной седлообразности;
 у – расстояние между точками А и В в процессе фрезерования

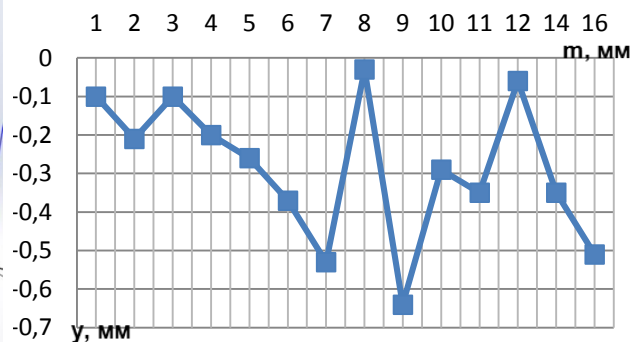


Рис. 13. Расстояние у между вершиной седла и высотой профиля максимально сточенного зуба дисковых фрез модулем $m = 1 \dots 16$ мм

Расчет допустимого количества переточек фрезы по передней поверхности при ее затыловании кругом оптимального диаметра можно осуществить на основе критерия затупления – износа чистовой фрезы по задней поверхности: $h_3 = 0,2$ мм.

Исходя из формулы (1) толщина слоя металла, снимаемого за одну переточку:

$$h = 0,2 + (0,1 \dots 0,2) = (0,3 \dots 0,4) \text{ мм.}$$

Максимальное значение припуска на переточку, мм:

$$l_{пер} = \frac{2}{3} L, \tag{4}$$

где L – длина зуба фрезы, мм.

Таким образом, количество переточек зуба фрезы определяется по формуле:

$$n = \frac{l_{пер}}{h}. \tag{5}$$

Так для фрезы модулем $m = 2$ мм с длиной зуба $L = 11,66$ мм, максимальное значение припуска на переточку $l_{пер} = 7,77$ мм, а количество переточек зуба $n = 26$ шт.

В результате проведенного анализа моделей затылования получена зависимость количества допустимых переточек n от модуля фрезы m (рис. 14). Рост числа переточек с увеличением модуля фрезы предопределен увеличением длины зуба. Уменьшение числа переточек наблюдается только у фрез модулем $m = 9$ мм, что связано с уменьшением длины зуба вызванным увеличением высоты профиля при сохранении диаметра и числа зубьев. Немонотонность кривой числа переточек вызвана отсутствием линейной связи между высотой зуба (модулем), диаметром, числом зубьев, углом стружечной канавки и как следствие длиной зуба фрезы. Здесь прослеживается скрытый резерв увеличения общего ресурса инструмента, реализовать который можно путем оптимизации конструкции.

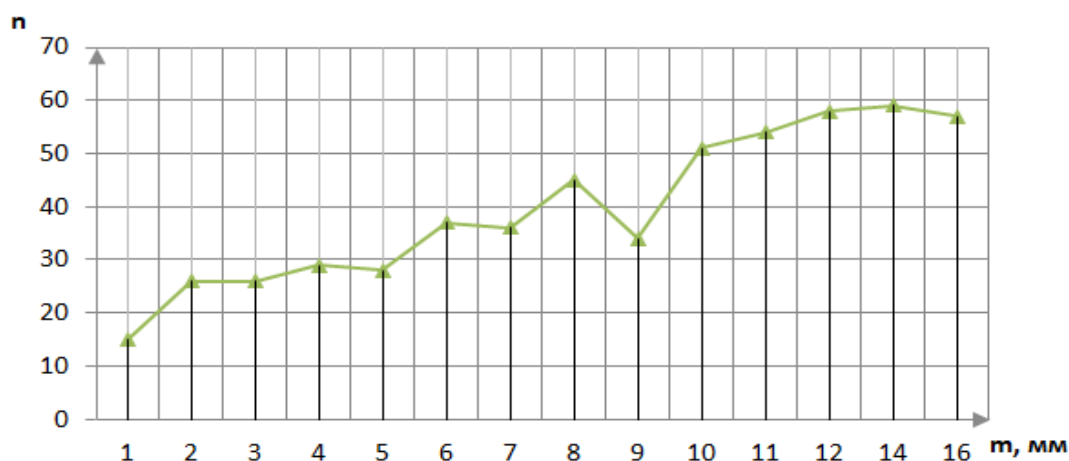


Рис. 14. Зависимость количества допустимых переточек n от модуля фрезы m

Выводы. Применяемая функциональная зависимость (2) при выборе шлифовального круга для затылования дисковых модульных фрез носит приблизительный характер и не позволяют оптимизировать параметры операции затылования и тем более конструкцию фрезы.

Анализ результатов моделирования показывает, что на выбор диаметра круга для затылования влияет кроме диаметра фрезы, количества зубьев и заднего угла заточки, высота профиля, зависящая от модуля фрезы и угол стружечной канавки.

Седлообразность, возникающая при затыловании фрез смоделированными кругами не влияет на величину предельно сточенного зуба при восстановлении работоспособности, что исключает операцию второго затылования зуба резцом.

Выбор оптимального шлифовального круга должен основываться не только на ограничениях связанных с параметрами затыловочного станка и применяемой оснастки, но и с учетом комплексного показателя операции затылования k_z , рассчитываемого по формуле (3), учитывающего ресурс, как шлифовального круга, так и затачиваемого инструмента. Этот показатель позволит принимать компромиссные решения в случае неопределенности при выборе размеров шлифовальных кругов.

Замена опытных испытаний виртуальными по предложенному методу при решении проблем конструирования и изготовления фасонных фрез позволит снизить их стоимость и общие затраты на подготовку производства.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 25751–83 (СТ СЭВ 6506–88) «Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий».
- Фельдштейн, Е. А. Металлорежущие инструменты: справочник конструктора / Е. А. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Минск: Новое знание, 2009. – 1039 с.
- Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов: Учебник. – К.: Віщашк., 1990. – 424 с.
- 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>.
- Палей, М. М. Технология шлифования и заточки режущего инструмента / М. М. Палей, Л. Г. Дибнер, М. Д. Флид. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
- Барсов А. И. Технология инструментального производства / А. И. Барсов. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.

7. 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. (с. 87 – 89).

8. Ажар А. В., Минасян Г. О. Оптимизация заточки затылованных насадных фасонных фрез методами 3D моделирования. Научное издание «II КИТАЙСКО-БЕЛОРУССКИЙ МОЛОДЕЖНЫЙ КОНКУРС НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ». Сборник материалов конкурса 20–21 мая 2021 года. г. Минск, БНТУ, 2021. – 240 с. (с. 98).

9. Минасян Г. О. Использование методов компьютерного 3D моделирования для оптимизации операции затылования сложнопрофильной фрезы. НИРС МСФ–2021. Сборник материалов 77-й студенческой научно-технической конференции / сост.: О. К. Яцкевич и др. – Минск: БНТУ, 2021. – 46 с. (с. 4–8).

10. 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. (с. 20–22).

11. Ажар А. В., Осадчий Е. Н., Ишкуло П. Ю. Анализ операции затылования стандартных дисковых модульных фрез методом 3D –моделирования. «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» «Технология – Оборудование – Инструмент – Качество»: тезисы докл. междуна. науч.-техн. конф. (Минск, 7 апреля 2022 г.) / редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2022. – 115 с. (с.104–107).

Поступила 17.10.2022

УДК 674.059:621.793

Веремейчик А. И., Онысько С. Р., Хвисевич В. М.

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДРОБИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ

*Брестский государственный технический университет,
Брест, Беларусь*

В работе рассмотрен процесс поверхностного плазменного упрочнения режущей части ножей дробильной установки, проведено его моделирование с использованием вычислительного комплекса ANSYS Workbench и подобраны оптимальные режимы обработки. Проведены натурные производственные испытания износостойкости ножей, определен их относительный износ после объемной и поверхностной плазменной закалки при помощи пакетов программ компьютерного моделирования AutoCAD и SolidWorks, а также комплекса с лазерным сканированием поверхности Mistral 070705 фирмы Brown&Sharpe.

При использовании установок для дробления и переработки древесных отходов деревообрабатывающей промышленности в качестве дробильного инструмента применяются детали (ножи) в виде усеченной пирамиды из конструкционной легированной стали 40X (рис. 1), подвергнутые термообработке в виде объемной закалки. В процессе эксплуатации эти детали подвергаются интенсивному механическому изнашиванию и воздействию динамических нагрузок. Визуальный осмотр деталей выявил ряд типичных для такого рода инструмента дефектов – затупление, растрескивание и выламывание режущей кромки, разрушение части полотна детали, скалывание металла размерами до 2 см в периферийной зоне [1]. Такой вид разрушения характерен при упрочнении деталей объемной закалкой и обусловлен возникновением в металле значительных механических напряжений и охрупчивания стали.