

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ НЕПЕРЕТАЧИВАЕМЫМИ ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ

В.А. Хоменко, П.О. Черданцев, А.О. Черданцев

Представлена методика определения рациональных режимов резания при зубофрезеровании неперетачиваемыми червячными фрезами.

Ключевые слова: неперетачиваемые червячные фрезы, прогрессивная схема резания, зубофрезерование, режимы резания.

В современных экономических условиях одной из важнейших проблем машиностроения является снижение себестоимости изделий в целом, и операций механической обработки в частности, при условии обеспечения требуемого качества. В то же время на современном этапе развития для машиностроительной отрасли характерно увеличение доли предприятий малого и среднего бизнеса. На таких предприятиях, занимающихся металлообработкой, как правило, отсутствуют заточной и инструментальный участки, требующие наличия дорогостоящего оборудования. С точки зрения снижения себестоимости продукции для них выгоднее приобретать готовый режущий инструмент, работающий без переточек до полного износа.

При зубофрезеровании, наиболее распространённом методе зубонарезания, работа без переточек может быть экономически эффективной только при использовании червячных фрез со значительно большей стойкостью по сравнению со стандартными. Зубья стандартных фрез работают в тяжёлых условиях несвободного резания, срезая Г- или П-образные слои, работа зубьев происходит в неблагоприятных условиях из-за малости задних углов на боковых режущих кромках, что обусловлено условиями сохранения профиля зуба при возможно большем числе переточек. Поэтому характерной тенденцией совершенствования червячных фрез является применение конструкций со схемами резания, обеспечивающими отдельное стружкообразование, в частности, использование наиболее перспективной прогрессивной схемы резания, при которой зубья, завышенные и уменьшенные по толщине, чередуются черед один с зубьями стандартного профиля.

На наш взгляд, перспективной представляется комбинированная конструкция

неперетачиваемых червячных фрез, работающих по прогрессивной схеме резания. За счёт отдельного стружкообразования, уменьшения толщины срезаемых зубьями слоёв и возможности увеличения боковых задних углов, не опасаясь сокращения числа возможных переточек, такая фреза по стойкости должна существенно превосходить стандартную, что, учитывая работу без переточек, особенно актуально. В то же время, за счёт увеличенного числа зубьев по окружности, может быть исключён один из основных недостатков фрез с прогрессивной схемой резания, сдерживающих их широкое применение, – увеличение огранки нарезаемых зубьев.

Экспериментальные исследования показали, что стойкость неперетачиваемых червячных фрез с прогрессивной схемой резания в 3,5 – 3,9 раз выше стойкости стандартных фрез при режимах резания, которые рекомендуются для последних. Однако при этом не ясно, являются ли эти режимы для фрез предлагаемой конструкции наиболее эффективными с точки зрения себестоимости обработки. Поэтому актуальным является вопрос назначения рациональных режимов резания.

Была укрупнённо рассмотрена структура себестоимости зубофрезерной операции. При этом затраты, не зависящие от режимов резания (например, затраты на наладку станка, затраты на амортизационные отчисления, затраты на общецеховые нужды и т. д.) не учитывались, так как от их величины вопрос назначения режимов резания (скорости резания v и подачи на оборот стола S) не зависит. Таким образом, полагаем, что себестоимость (C) операции складывается из затрат на режущий инструмент ($Z_{р/и}$), затрат на оплату труда рабочего ($Z_{з/п}$) и затрат на электроэнергию ($Z_{э/э}$):

$$C_{\text{сб}} = Z_{\text{р/и}} + Z_{\text{з/п}} + Z_{\text{э/э}}$$

Величина затрат на режущий инструмент может быть описана следующей зависимостью:

$$Z_{\text{р/и}} = \frac{t_0}{T} \cdot C_{\text{р/и}},$$

где t_0 – основное время на обработку одной заготовки, мин; T – стойкость червячной фрезы, мин; $C_{\text{р/и}}$ – стоимость режущего инструмента, руб.

Зависимость стойкости от скорости резания и подачи на оборот стола в результате экспериментальных исследований представлена в виде степенной функции:

$$T = C \cdot v^\alpha \cdot S^\beta,$$

а именно

$$T = 15520693 \cdot v^{\alpha-2,5456} \cdot S^{-0,9574}.$$

Основное время, затрачиваемое на обработку одной детали, зависит от подачи на оборот стола (S), частоты вращения стола ($n_{\text{ст}}$), ширины нарезаемого венца (B), числа заготовок в пакете (i), а также глубины врезания фрезы (l) и перебега (l_1), зависящих в свою очередь от наружного диаметра червячной фрезы (D_e) и глубины резания (t). В общем виде эта зависимость может быть представлена в виде:

$$t_0 = \frac{k \cdot B}{S} \cdot \frac{1}{n_{\text{ст}}},$$

где k – коэффициент, учитывающий глубину врезания, перебег и число заготовок в пакете.

Частота вращения стола зависит от частоты вращения фрезы как

$$n_{\text{ст}} = \frac{n_{\text{фр}}}{z},$$

где z – число зубьев нарезаемого колеса.

Частота вращения фрезы связана со скоростью резания выражением:

$$n_{\text{фр}} = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D_e}.$$

Таким образом, частота вращения стола:

$$n_{\text{ст}} = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D_e \cdot z},$$

и следовательно

$$t_0 = \frac{k \cdot B}{S} \cdot \frac{\pi \cdot D_e \cdot z}{1000 \cdot v}.$$

Затраты на режущий инструмент, таким образом, могут быть представлены в виде следующей зависимости:

$$Z_{\text{р/и}} = \frac{k \cdot B}{S} \cdot \frac{\pi \cdot D_e \cdot z}{1000 \cdot v} \cdot \frac{C_{\text{р/и}}}{T},$$

$$Z_{\text{р/и}} = \frac{k \cdot B}{S} \cdot \frac{\pi \cdot D_e \cdot z}{1000 \cdot v} \cdot \frac{C_{\text{р/и}}}{C \cdot v^{\alpha} \cdot S^{\beta}},$$

$$Z_{\text{р/и}} = k \cdot B \cdot \frac{\pi \cdot D_e \cdot z}{1000} \cdot \frac{C_{\text{р/и}}}{C \cdot v^{\alpha+1} \cdot S^{\beta+1}}.$$

Величина затрат на заработную плату рабочего может быть описана следующей зависимостью:

$$Z_{\text{з/п}} = t_0 \cdot C_{\text{рв}},$$

где t_0 – основное время на обработку одной заготовки, мин; $C_{\text{рв}}$ – стоимость рабочего времени, руб/мин.

Таким образом, величина затрат на заработную плату:

$$Z_{\text{з/п}} = \frac{k \cdot B}{S} \cdot \frac{\pi \cdot D_e \cdot z}{1000 \cdot v} \cdot C_{\text{рв}}.$$

При расчёте затрат на электроэнергию полагалось, что электродвигатель станка развивает полную мощность. Таким образом, затраты могут быть представлены в виде следующей зависимости:

$$Z_{\text{э/э}} = P \cdot \frac{t_0}{60} \cdot C_{\text{э/э}},$$

где P – мощность электродвигателя, кВт; t_0 – основное время на обработку одной заготовки, мин; $C_{\text{э/э}}$ – тариф на электроэнергию, руб/(кВт·ч).

Следовательно величина затрат на электроэнергию может быть найдена в следующем виде:

$$Z_{\text{э/э}} = P \cdot \frac{k \cdot B}{S} \cdot \frac{\pi \cdot D_e \cdot z}{1000 \cdot v} \cdot \frac{C_{\text{э/э}}}{60}.$$

С учётом этого зависимость себестоимости обработки одной детали от скорости резания и подачи на оборот стола:

$$C_{\text{сб}} = k \cdot B \cdot \frac{\pi \cdot D_e \cdot z}{1000} \cdot \frac{C_{\text{р/и}}}{C \cdot v^{\alpha+1} \cdot S^{\beta+1}} + \frac{k \cdot B}{S} \cdot \frac{\pi \cdot D_e \cdot z}{1000 \cdot v} \cdot C_{\text{рв}} + P \cdot \frac{k \cdot B}{S} \cdot \frac{\pi \cdot D_e \cdot z}{1000 \cdot v} \cdot \frac{C_{\text{э/э}}}{60},$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ НЕПЕРЕТАЧИВАЕМЫМИ ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ

$$C_{\text{сб}} = k \cdot B \cdot \frac{\pi \cdot D_e \cdot z}{1000} \cdot \left(\frac{C_{\text{р/и}}}{C \cdot v^{\alpha+1} \cdot S^{\beta+1}} + \frac{1}{v \cdot S} \cdot C_{\text{рв}} + P \cdot 1v \cdot S \cdot C_{\text{э/э60}} \right);$$

$$C_{\text{сб}} = k \cdot B \cdot \frac{\pi \cdot D_e \cdot z}{1000} \cdot \left(\frac{C_{\text{р/и}}}{C} \cdot v^{-\alpha-1} \cdot S^{-\beta-1} + v^{-1} \cdot S^{-1} \cdot (C_{\text{рв}} + P \cdot C_{\text{э/э60}}) \right).$$

Как видно из полученного выражения, себестоимость операции является функцией двух переменных: v и S . Вопрос о назначении рациональных режимов резания сводится к определению минимума этой функции, то есть к решению задачи оптимизации. Функция себестоимости является целевой функцией. Критерий оптимизации: $\min C$; аргументы: v и S . В качестве ограничений необходимо учитывать следующие факторы: скорость резания и подача на оборот стола должны не выходить за пределы технологических возможностей станка.

На рисунках 1 и 2 представлены графики, иллюстрирующие зависимость зубофрезерной операции от режимов резания. Они получены при следующих значениях параметров: $k=1$; $B=30$ мм; $D_e=90$ мм; $z=40$; $C_{\text{р/и}}=3000$ руб; $C_{\text{рв}}=3$ руб/мин; $C_{\text{э/э}}=5$ руб/кВт·ч; $P=6$ кВт; $C=15520693$; $\alpha=-2,5456$; $\beta=-0,9574$.

Очевидно, что в зависимости от подачи на оборот стола целевая функция с ростом аргумента монотонно убывает и экстремума не имеет, а в зависимости от скорости – имеет минимум. Таким образом, необходимо определить минимум целевой функции в зависимости от скорости.

Были введены следующие обозначения:

$$A = k \cdot B \cdot \frac{\pi \cdot D_e \cdot z}{1000};$$

$$D = \frac{C_{\text{р/и}}}{C};$$

$$E = C_{\text{рв}} + P \cdot \frac{C_{\text{э/э}}}{60}.$$

Тогда функция, описывающая себестоимость принимает вид

$$C_{\text{сб}} = A \cdot (D \cdot v^{-\alpha-1} \cdot S^{-\beta-1} + E \cdot v^{-1} \cdot S^{-1}).$$

Минимальные значения целевой функции в зависимости от скорости резания v определяется равенством нулю частной производной $\frac{\partial C_{\text{сб}}}{\partial v}$:

$$\frac{\partial C_{\text{сб}}}{\partial v} = A \cdot (D \cdot (-\alpha - 1) \cdot v^{-\alpha-2} \cdot S^{-\beta-1} - E \cdot v^{-2} \cdot S^{-1});$$

$$\frac{\partial C_{\text{сб}}}{\partial v} = -A \cdot v^{-2} \cdot S^{-1} \cdot (D \cdot (\alpha + 1) \cdot v^{-\alpha} \cdot S^{-\beta} + E).$$

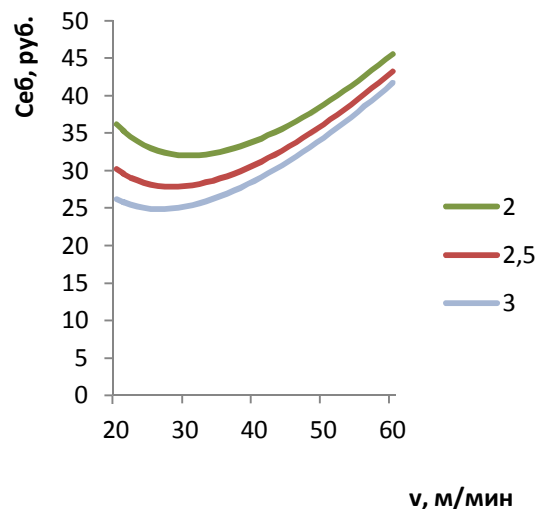


Рисунок 1 – Зависимость себестоимости зубофрезерной операции от скорости резания при значениях подачи на оборот стола 2; 2,5 и 3 мм/об. ст.

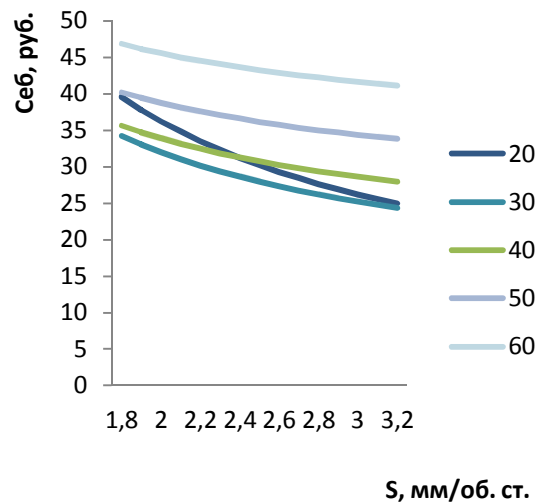


Рисунок 2 – Зависимость себестоимости зубофрезерной операции от подачи на оборот стола при значениях скорости резания 20; 30; 40; 50; 60 м/мин

Таким образом, минимум целевой функции в зависимости от скорости резания v определяется следующим уравнением:

$$-A \cdot v^{-2} \cdot S^{-1} \cdot (D \cdot (\alpha + 1) \cdot v^{-\alpha} \cdot S^{-\beta} + E) = 0.$$

Корень $v=0$ не рассматривается, следовательно, уравнение сводится к следующему виду:

$$D \cdot (\alpha + 1) \cdot v^{-\alpha} \cdot S^{-\beta} + E = 0;$$

$$v^{-\alpha} = \frac{-E \cdot S^{\beta}}{D \cdot (\alpha + 1)};$$

$$v = \left(\frac{-E \cdot S^{\beta}}{D \cdot (\alpha + 1)} \right)^{-\frac{1}{\alpha}}$$

или, с учётом обратных подстановок,

$$v = \left(\frac{-C \cdot (C_{pv} + P \cdot \frac{C_{э/э}}{60}) \cdot S^{\beta}}{C_{p/и} \cdot (\alpha + 1)} \right)^{-\frac{1}{\alpha}}$$

При работе на зуборезных станках с бесступенчатым регулированием подач и скоростей резания без учёта ограничивающих факторов подача должна назначаться максимально возможной, а скорость резания – определяться из выражения, представленного выше.

При назначении режимов резания для станков со ступенчатым регулированием подач и скоростей резания имеется некоторое множество возможных значений скорости резания и подачи на оборот стола станка. Вопрос о назначении режимов резания в этом случае сводится к последовательному расчёту себестоимости зубофрезерной операции при всех возможных комбинациях режимов резания и выбору варианта с наименьшим значением. Это может быть осуществлено по алгоритму, приведённому на рисунке 3.

Таким образом, для работы червячных фрез предлагаемой конструкции рациональные режимы резания без учёта ограничивающих факторов могут быть определены с учётом указанных рекомендаций по зависимости (1) в случае применения станка с бесступенчатым регулированием, либо по алгоритму, приведённому на рисунке 3, в случае применения станка со ступенчатым регулированием (то есть, с гитарами подач и скоростей резания). В этом заключается предлагаемая методика назначения режимов резания.

В случае необходимости при расчётах могут быть учтены и ограничивающие факторы, накладывающие дополнительные условия на выбор режимов резания, как то: шероховатость, мощность резания, стойкость червячной фрезы. Зависимость данных

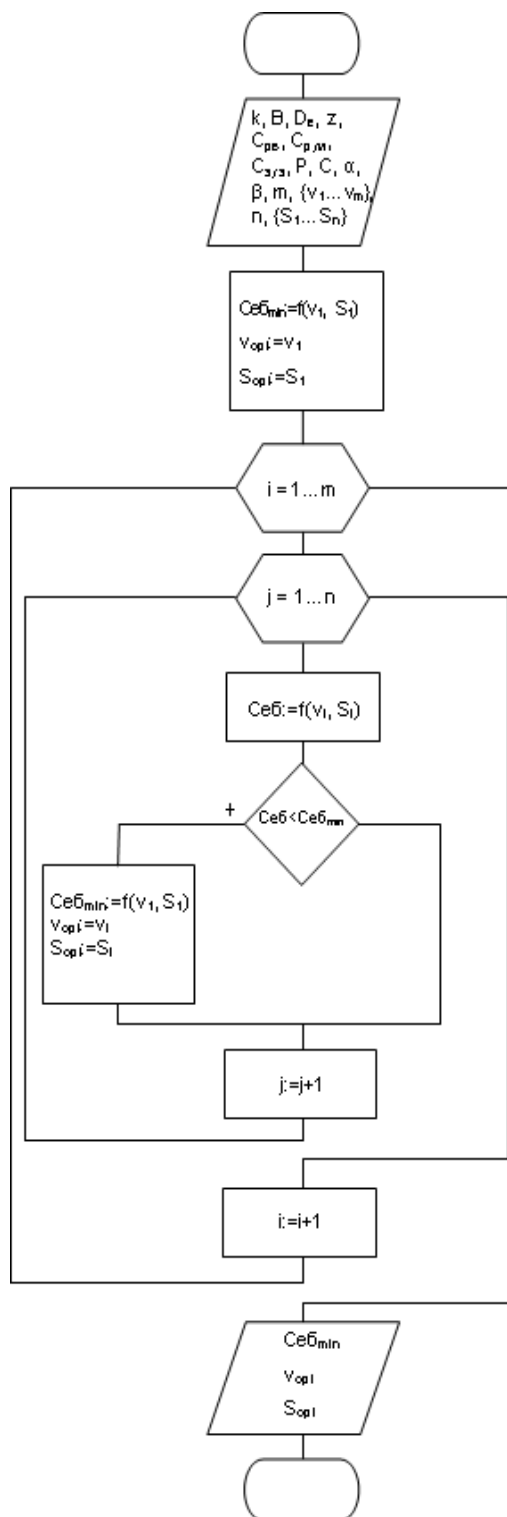


Рисунок 3 – Алгоритм назначения режимов резания для станков со ступенчатым регулированием

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ
НЕПЕРЕТАЧИВАЕМЫМИ ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ

факторов от скорости резания и подачи на оборот стола могут быть определены в результате дополнительных экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производство зубчатых колёс / под ред. Б. А. Тайца. – М.: Машиностроение, 1975. – 708 с.
2. Калашников С. Н. Зубчатые колёса и их изготовление / С. Н. Калашников, А. С. Калашников. – М.: Машиностроение, 1983. – 264 с.

Хоменко Валерий Андреевич, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО «Алтайский госу-

дарственный технический университет им. И.И. Ползунова», tap_otm@mail.ru,

Черданцев Павел Олегович, к.т.н., старший преподаватель кафедры «Теоретическая механика и механика машин» ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», p004092@yandex.ru, с.т. 8-905-928-1952,

Черданцев Алексей Олегович, инженер кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», hipertigr@mail.ru.