

2) для максимального значения жесткости детали

$$\tau_{\min} = 1.21 \cdot 10^{-4} + \frac{0.12 - 4.97 \cdot 10^{-5}}{0.5} + 1.06 \cdot 10^{-3} + \frac{0.026 - 5.62 \cdot 10^{-4}}{0.2} + 2.99 \cdot 10^{-3} + \frac{0.004 - 3.46 \cdot 10^{-4}}{0.015} = 0.61486 \text{ мин}$$

**Выводы:** Результаты проведенного исследования позволяют построить оптимальный по производительности цикл круглого наружного врезного шлифования.

Список литературы: 1. Ушаков А.Н., Серховец О.И., Фесенко А.В. Математическое моделирование переходных процессов в цикле круглого наружного врезного шлифования // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні.- Харків: НТУ"ХП".-2007. №1,- 144с, С.26-32.

*Поступила в редколлегию 10.10.07*

**УДК 621.924.5**

*Ю.А. СИЗЫЙ, А.В. ЕВТУХОВ, Е.А. ГЛУЩЕНКО*

## **СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИКЛА КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ**

The algorithm of structural and parametrical optimization of the round external in-feed grinding cycle, a considering temperature condition of process of handling, limitation on exactitude of the shape and a roughness of the treated surface is considered.

Анализ литературы [1] показал главные недостатки существующей методики нормирования процесса круглого наружного врезного шлифования (КНВШ): предусмотрена обработка по двухступенчатой программе изменения скоростей подачи (черновой и чистовой), переходные процессы не учтены в связи с трудоемкостью расчетов; сложность и неточность (усредненность) расчета податливости технологической системы.

В работе [2] представлены усовершенствованные зависимости по расчету фактического съема металла для переходных этапов цикла. Так, фактический съем металла  $x_n$  для этапа врезания может быть рассчитан по формуле

$$x_n = So \cdot [1 - q^n] \quad (1)$$

где  $So$  – подача на оборот;  $n$  – номер оборота изделия с начала этапа врезания;

$$q = Cp / (js + Cp) \quad [3],$$

где  $Cp$  – жесткость процесса шлифования,  $js$  – жесткость технологической системы.

Фактический съем металла на этапе выхаживания:

$$x_n = So \cdot q^n \quad (2)$$

где  $So$  – подача на этапе, предшествующем выхаживанию.

Фактический съем металла на переходном этапе при изменении подачи с  $So1$  на  $So2$ , имеющем место при переходе с чернового на чистовое шлифование:

$$x_n = So2 \cdot [1 - q^n] + So1 \cdot q^n \quad (3)$$

Во всех указанных зависимостях содержится аргумент  $q$ , определяемый как обобщенная идентификационная характеристика динамической системы КНВШ или показатель жесткости системы. Определяемое экспериментально значение  $q$  позволяет учесть жесткость конкретной технологической системы и процесса шлифования наиболее полно и произвести расчет рабочего цикла КНВШ с наибольшей точностью.

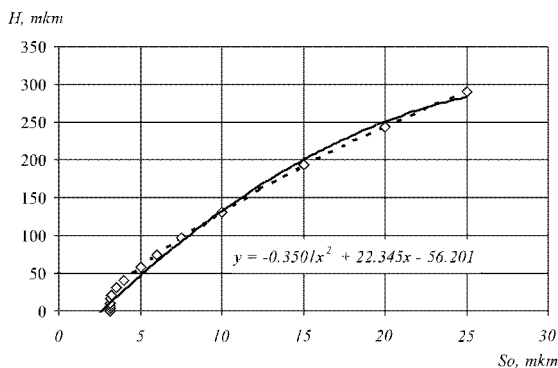


Рис. 1 – Зависимость глубины дефектного слоя  $H$  от величины врезной подачи  $So$  (сталь 40Х, 24А16НСМ1К,  $d = 50$  мм,  $B = 60$  мм,  $n_d = 190$  мин<sup>-1</sup>,  $V_{кр} = 50$  м/с,  $\Theta^* = 445^\circ$ )

Одним из основных ограничивающих производительность процесса шлифования факторов является условие бездефектной обработки  $H \leq [H]$ , где  $[H]$  – допустимая глубина дефектного слоя. Принимаем, что структурные превращения в поверхностном слое детали определяются температурой ее нагрева на протяжении всех фаз рабочего цикла. Для повышения производительности цикла возможно на черновых этапах вести обработку с образованием некоторой величины дефектного слоя так, чтобы она не превышала оставшийся припуск. Так же ясно, что температура нагрева обрабатываемой поверхности на заключающем этапе цикла не должна превышать некоторого критического значения  $\Theta^*$ , что позволит выполнить условие  $H \leq [H]$ . Необходимо учитывать возможность дополнительной отделочной обработки после операции шлифования (например, размерное суперфиниширование по способу двойной осцилляции, который позволяет при достаточно высоком уровне производительности снимать припуск порядка 20...30 мкм при отсут-

ствии, как такового, дефектного слоя [4]), что позволит увеличить величину [Н]: режимы обработки и, соответственно, производительность процесса шлифования могут быть повышены. В работе [5] представлена методика теплофизического анализа цикла КНВШ. Расчет температурного поля в поверхностном слое обрабатываемой заготовки [6, 7] позволяет, при наличии значения критической температуры  $\Theta^*$ , определить зависимость величины дефектного слоя Н от регулируемой по ходу рабочего цикла величины врезной подачи  $S_0$  (см. рис. 1).

Из работы [8] следует, что исходная некруглость шлифуемой поверхности  $\delta$  в процессе обработки стремится к величине  $S_0/2$ , а некруглость поверхности, формируемая самим процессом шлифования – к  $S_0$ . Таким образом, контроль фактического съема металла на заключительном этапе рабочего цикла шлифования, определяющем качественные показатели поверхности детали, позволяет выполнить условие  $\delta \leq [\delta]$ , где  $[\delta]$  - допустимое значение некруглости.

Литературный обзор [9, 10, 11] позволил выявить зависимость шероховатости поверхности от силы шлифования на заключительном этапе цикла. Так, при всех прочих равных условиях, для получения шероховатости  $Ra = 0,8$  мкм удельное значение нормальной составляющей силы шлифования не должно превышать 8...12 Н/мм. Таким образом, контроль силы шлифования на заключительном этапе цикла позволит выполнить условие  $Ra \leq [Ra]$ , где  $[Ra]$  - допустимое значение шероховатости. Сила шлифования может быть определена из эмпирической зависимости [6] для условий обработки среднеуглеродистых конструкционных сталей при скорости шлифования 50 м/с:

$$Pz = 2,254 \frac{\sigma_t^{0,342} \cdot H^{0,258} \cdot V_p^{0,945}}{Z^{0,051} \cdot S^{0,073} \cdot S_{pr}^{0,073} \cdot t_{pr}^{0,026}} \cdot H \quad (4)$$

где  $\sigma_t$  – предел прочности материала заготовки при высоких температурах (600°C), кгс/мм<sup>2</sup>; Н – звуковой индекс; Z – зернистость;  $V_p$  – скорость врезной подачи, мм/мин; S – окружная скорость вращения заготовки, м/мин;  $S_{pr}$  – продольная скорость правки, мм/мин;  $t_{pr}$  – глубина правки, мм.

Формула (4) определяет удельную силу резания (из расчета на 1 мм ширины шлифования). Установлено также, что радиальная составляющая  $P_y$  силы резания в диапазоне скоростей изделия 30...70 м/мин в 2,5 раза больше  $P_z$ . С учетом вышесказанного имеем:

$$P_y = 5,635 \frac{\sigma_t^{0,342} \cdot H^{0,258} \cdot V_p^{0,945}}{Z^{0,051} \cdot S^{0,073} \cdot S_{pr}^{0,073} \cdot t_{pr}^{0,026}} \cdot B, H \quad (5)$$

где B – ширина шлифования, мм.

В указанном выражении необходимо выявить подачу «на оборот» и представить ее в виде идентичного с моделью системы врезного шлифования аргумента  $x$  (глубина шлифования). Значение врезной подачи «на оборот»

может быть получено из выражения:  $x = \frac{V_p \cdot p \cdot d}{1000 \cdot S}$ .

В итоге имеем:

$$P_y = 1,244 \times 10^3 \times \frac{\sigma_f^{0,342} \cdot H^{0,258} \cdot S^{0,872} \cdot B}{Z^{0,051} \cdot S_{pr}^{0,073} \cdot t_{pr}^{0,026} \cdot d^{0,945}} \cdot x^{0,945}, \text{ Н} \quad (6)$$

Приведенные зависимости расчета фактического съема металла, а также указанные ограничивающие производительность процесса шлифования факторы, позволили разработать алгоритм структурно-параметрической оптимизации цикла врезного шлифования, который реализуется в три этапа.

Первый этап заключается в экспериментальном определении значения показателя жесткости  $q$ .

Второй этап заключается в выборе исходных данных, описывающих физико-механические и тепловые свойства материала заготовки, характеристики шлифовального круга, режимы правки круга, требования, предъявляемые к обрабатываемой поверхности детали (по чертежу).

Третий этап реализуется программно и заключается в выборе оптимальной структуры и параметров рабочего цикла КНВШ на основе расчета длительности отдельных этапов и суммарного времени рабочего цикла шлифования с учетом указанных условий, ограничивающих производительность шлифования. Укрупненный алгоритм 3-го этапа можно представить в виде блок-схемы, см. рис. 2.

Структурная оптимизация предусматривает выбор одного из трех вариантов рабочего цикла шлифования, см. рис. 3.

Цикл №1 включает этапы врезания на форсированной подаче (OA), черновое шлифование (AB) и выхаживание (DE). Цикл №2 включает этапы врезания (OA), черного шлифования (AB), чистовое шлифование (CD). При этом между этапами черного и чистового шлифования предусмотрен переходной этап (BC), в ходе которого происходит изменение подачи шлифования. Цикл №3 включает этапы врезания (OA), черного шлифования (AB), переходной этап (BC), чистовое шлифование (CD), а так же выхаживание (DE).

Таким образом, при оптимизации цикла круглого врезного шлифования необходимо исходить из следующего. При любом их трех представленных циклов можно добиться требуемого качества поверхности, выбирая соответствующие подачи на различных фазах цикла. Поэтому необходимо рассчитать параметры каждого цикла, обеспечивающие качество поверхности с минимальным временем, а затем, сравнив длительности цикла для всех трех структур – выбрать ту структуру, на реализацию которой затрачивается наименьшее время.

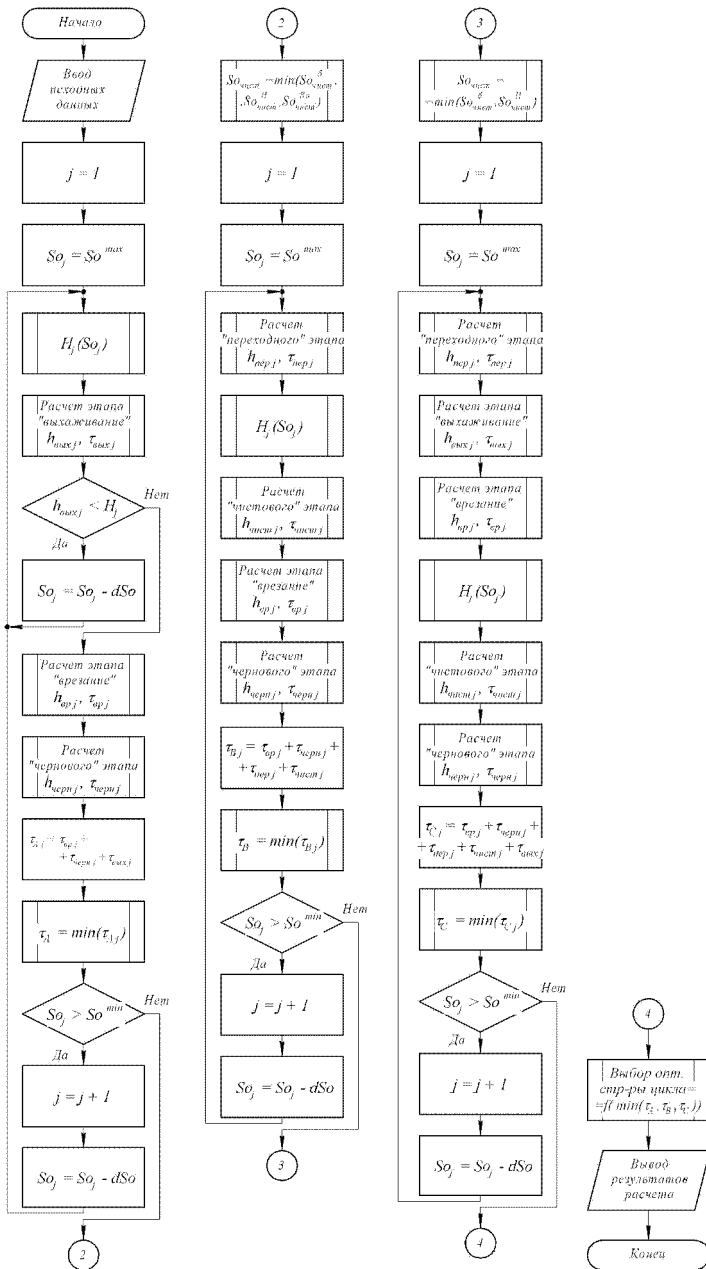


Рис. 2 – Алгоритм расчета рабочего цикла КНВПШ

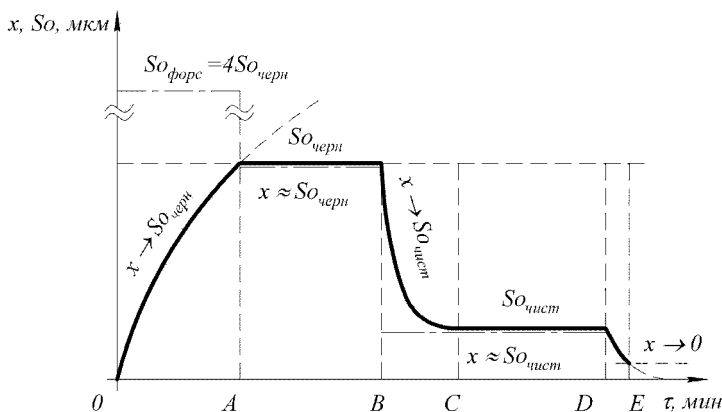


Рис. 3 – Рабочий цикл круглого шлифования

Рассмотрим первый из представленных врезных циклов. Этот цикл применим только если на фазе выхаживания будут достигнуты все требования к качеству: допуск формы поверхности  $\delta$ , устранение дефектного слоя  $H$ , сформированного на предшествующих этапах цикла с учетом допустимого дефектного слоя  $[H]$ , а также обеспечение некоторого допустимого удельного значения нормальной составляющей силы резания  $[Py]$ , которая в свою очередь позволит получить требуемый уровень шероховатости  $Ra$ . Т.к. фактическая величина съема металла  $x_i$  на этапе выхаживания изменяется от подачи  $So$  на предшествующем этапе (для первого цикла – это черновая подача) до нуля, то очевидно, условия  $x_i < \delta$  и  $Py < [Py] = f(Ra)$ , будут выполнены. Остается проверить условие  $(H(So) - [H]) \leq h_{вых}$  обеспечения бездефектного шлифования, при этом  $h_{вых}$  – есть величина суммарного припуска снятого на протяжении этапа выхаживания. Условно допускаем, что по ходу этапа выхаживания образование нового дефектного слоя не наблюдается или его значение не превышает допустимой величины. Значения изменяющихся по ходу переходных этапов врезания и выхаживания фактических величин съема металла рассчитываются по соответствующим формулам (1, 2). Припуски на указанных этапах рассчитываются как накопленные, суммированием глубин шлифования по оборотам детали ( $h_{epk} = h_{epk-1} + x_k, h_{выхи} = h_{выхи-1} + x_i$ ). Припуск на черновое шлифование рассчитывается как разница между общим припуском  $P$  и суммарными припусками на этапах врезания и выхаживания. Длительности переходных этапов рассчитываются как накопленные, суммированием по оборотам ( $\tau_{epk} = \tau_{epk-1} + 1/n_\delta, \tau_{epi} = \tau_{epi-1} + 1/n_\delta$ ). Длительность черногового этапа определим как отношение  $\tau_{чёрн} = h_{чёрн} / So \times n_\delta$ . Для обеспечения максимальной производительности цикла необходимо определить такое максимальное значение  $So$  из диапазона  $So^{\max} \dots So^{\min}$ , при котором все указанные условия были бы выполнены.

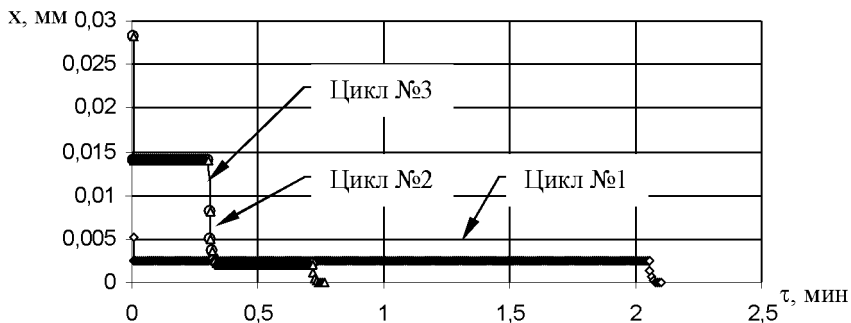


Рис. 4 – Изменение фактического съема металла по ходу цикла

Рассмотрим цикл №2. Установившееся чистовое шлифование должно обеспечить все указанные условия обеспечения требуемого качества поверхности. Поэтому значение чистой подачи  $So_{чист}$  должно быть таковым, чтобы выполнялись условия:

$So_{чист} \leq \delta$ ,  $H(So_{чист}) \leq [H]$ ,  $P_y(So_{чист}) \leq [P_y(Ra)]$ . Остается выбрать минимальное из указанных значений  $So_{чист}$ . По аналогии с циклом №1 рассчитываются соответствующие накопленные припуски и длительности этапов. Припуск на чистовой этап  $h_{чист}$  определим как разность между величиной дефектного слоя, сформировавшегося на черновом этапе с учетом допустимого дефектного слоя ( $H(So) - [H]$ ) и накопленным припуском  $h_{пер}$ . Припуск на черновое шлифование  $h_{черн}$  теперь определяется как разность между общим припуском  $P$ , а также накопленными припусками на врезание  $h_{вр}$ , на переходной этап с уменьшением подачи с черновой на чистовую  $h_{пер}$  и на чистовой этап  $h_{чист}$ . В качестве черновой подачи выбирается максимальное значение  $So$  из диапазона  $So^{max} \dots So^{min}$ .

Цикл №3. Чистовой этап шлифования обеспечивает выполнение требований по допустимой величине дефектного слоя и допуску формы поверхности, этап выхаживания – по шероховатости поверхности. Расчет припусков, длительности отдельных фаз цикла – производим по аналогии с циклами №1 и №2.

В качестве примера произведем расчет рабочего цикла круглого врезного шлифования для следующих исходных данных: материал детали – сталь 40X, предел прочности при температуре 600°C -  $\sigma_t = 21,5$  кгс/мм<sup>2</sup>, диаметр обрабатываемой поверхности -  $d = 50$  мм, ширина шлифования -  $B = 60$  мм, припуск на сторону -  $P = 1,0$  мм, рекомендуемая частота вращения изделия (по нормативам)  $n_d = 190$  мин<sup>-1</sup>, критическая температура -  $\Theta^* = 445^\circ$ , круг - 24A16HСМ1К,  $V_{кр} = 50$  м/с, звуковой индекс -  $H = 1,38$ , зернистость -  $Z = 16$ , подача при правке круга -  $S_{рг} = 150$  мм/мин; глубина правки -  $tr_g = 0,01$  мм, минимальная и максимальная врезная подача (по паспорту станка) -  $SM_{min} =$

0,1 мм/мин,  $SM_{max} = 4$  мм/мин, дискретность –  $dSo = 0,001$  мм, показатель жесткости ТС -  $q = 0,5$ , допуск на размер  $Td = 0,05$  мм, требуемая шероховатость поверхности –  $Ra = 0,8$  мкм, допуск формы поверхности -  $\delta = 0,005$  мм, допустимая глубина дефектного слоя -  $[H] = 0,008$  мм.

В результате расчета получены следующие данные: общее время цикла №1 составило – 2,10 мин, цикла №2 – 0,72 мин, цикла №3 – 0,76 мин. Таким образом, оптимальным циклом является цикл №2, на реализацию которого затрачивается наименьшее время. Рассчитаны оптимальные значения черновой и чистой подачи цикла №2: Сочерн = 14 мкм/об, Сочист = 2 мкм/об. Так на этапе врезания снимается припуск 0,028 мм, продолжительность этапа – 0,01 мин. На черновом этапе при номинальной установленной подаче 14 мкм/об снимается припуск 0,786 мм, продолжительность этапа – 0,29 мин. На переходном этапе снимается припуск 0,042 мм, время этапа – 0,05 мин. Чистой этап реализуется при номинальной установленной подаче 2 мкм/об, снимается припуск – 0,144 мм, продолжительность этапа – 0,37 мин.

Характер изменения величины фактического съема металла по ходу рабочего цикла представлен на рис. 4. Из рис. 4 видно, что на реализацию цикла №1 затрачивается наибольшее время. Циклы №2 и №3 практически идентичны и менее продолжительны.

Таким образом, представленный алгоритм структурно-параметрической оптимизации цикла КНВШ позволяет уже на этапе технологической подготовки производства прогнозировать технологические показатели операции шлифования.

Список литературы: 1. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Часть II: Нормативы режимов резания. М., Экономика, 1990 г., 473 с. 2. Сизый Ю.А., Евтухов А.В. Расчет глубины круглого врезного шлифования на основе его имитационной модели // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2001. - № 15. – С. 117-126. 3. Сизый Ю.А., Евтухов А.В. Статическая и динамическая характеристики технологической системы круглого врезного шлифования // Резание и инструмент в технологических системах. – Х.: НТУ «ХПИ», 2003. – Вып. 64. – С. 185-192. 4. Савчук В.И. Исследование технологических особенностей отделочной обработки валов способом двойной осцилляции брусков.: Дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / ХПИ. – Харьков, 1979. – 179 с. 5. Сизый Ю.А., Евтухов А.В. Теплофизический анализ цикла круглого врезного шлифования // Вісник Сумського державного університету. – Суми.: СумДУ. – 2004. - № 13(72). – С. 141 – 147. 6. Сизый Ю.А., Степанов М.С. Математическое моделирование температурного поля в шлифуемой заготовке периферией круга. Восточно-европейский журнал передовых технологий. №2, 2004. 7. Сизый Ю.А., Степанов М.С. Тепловой баланс процесса шлифования. Резание и инструмент в технологических системах. Вып. 66., 2004 г. 8. Сизый Ю.А., Евтухов А.В. Некруглость детали, исправляемая и формируемая процессом круглого врезного шлифования // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2003. - № 16. – С. 88 – 93. 9. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М., «Машиностроение», 1974. 10. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием. М., «Машиностроение», 1975. 11. Марчук В.І. Технологічні основи забезпечення якості робочих поверхонь кільця роликопідшипників: Дис. д-ра техн. наук: 05.02.08 / Луцький держ. технічний ун-т. – Луцьк, 2004. – 458 арк.

*Поступила в редколлегию 10.10.07*