

А.А. Якимов, д-р техн. наук, А.Ю. Браилов, д-р техн. наук,
Одесса, Украина

ИЗЫСКАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ НА ЗУБОШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКАХ, РАБОТАЮЩИХ ДВУМЯ ТАРЕЛЬЧАТЫМИ КРУГАМИ

Виявлена можливість збільшення продуктивності обробки на зубошлифувальних верстатах, що працюють тарельчастими кругами. Из всего різноманіття зубошлифувальних верстатів найменш продуктивними є верстати МААГ (Швейцарія), 5А851 (Росія), 5851 (Росія) з 15-градусною робочою рейкою. У статті виявлена й теоретично обґрунтована можливість підвищення продуктивності обробки на цих верстатах без зниження точності обробки за рахунок оптимізації кута установки шлифувальних кругів. Приведені формули для розрахунку довжини поперечного ходу столу і кута развороту тарельчастих кругів і їх розміщенні в одній впадині і в суміжних западинах оброблюваного колеса.

Виявлена возможность увеличения производительности обработки на зубошлифовальных станках, работающих тарельчатыми кругами. Из всего многообразия зубошлифовальных станков наименее производительными являются станки МААГ (Швейцария), 5А851 (Россия), 5851 (Россия) с 15-градусной производящей рейкой. В статье выявлена и теоретически обоснована возможность повышения производительности обработки на этих станках без снижения точности обработки за счет оптимизации угла установки шлифовальных кругов. Приведены формулы для расчета длины поперечного хода стола и угла разворота тарельчатых кругов при их размещении в одной впадине и в смежных впадинах обрабатываемого колеса.

Possibility of increase of the productivity of treatment is exposed on zubo-polishing machine-tools, workings tarel'chatye circles. From everything mnogo-obraziya zuboshlifoval'nykh machine-tools the least productive are machine-tools of Maag (Switzerland), 5А851 (Russia), 5851 (Russia) with a 15-degree productive lath. In the article exposed and in theory grounded voz-mozhnost' increases of the productivity of treatment on these machine-tools without the decline of exactness of treatment due to optimization of corner of setting of shlifo-power circles. Formulas are resulted for the calculation of length of transversal motion of table and corner of once-collar of tarel'chatikh circles at their placing in one cavity and in the contiguous cavities of the processed wheel.

Постановка проблеми. Для устранения коробления зубчатого венца, возникающего при химико-термической обработке, применяют зубошлифование. Среди существующих схем зубошлифования наибольшую точность обеспечивают станки, работающие двумя тарельчатыми кругами по методу обката. Существует два метода обработки тарельчатыми кругами: нуль-градусный и 15-градусный (или 20-градусный). Обработку этими методами осуществляют на станках типа MAAG (Швейцария), 5А851 (Россия), 5851 (Россия).

Из этих двух методов наиболее теплонапряженным является нуль-градусный метод. Это объясняется тем, что при обработке этим методом каждая точка боковой поверхности зуба подвергается многократным тепловым воздействиям.

Несмотря на то, что 15-градусный (или 20-градусный) метод менее теплонапряженный, его редко используют в связи с его низкой производительностью. Проблеме повышения производительности зубошлифования тарельчатыми кругами посвящены работы [1-15] и др. В большинстве из этих работ проблема повышения производительности решается применением тарельчатых шлифовальных кругов из кубического нитрида бора.

В настоящей статье обоснована возможность повышения производительности зубошлифования на станках, работающих двумя тарельчатыми абразивными кругами по методу огибания по 15-20-градусной схеме без снижения точности обработки путем увеличения числа качаний стола и разворота шлифовальных кругов на расчетный угол, при котором уменьшается сила инерции качающихся частей станка и, как следствие, уменьшается величина деформации линии механизма обката.

Материалы и результаты исследований. На рис. 1 и рис. 2 видно, что угол установки шлифовальных кругов α_n равен сумме углов:

$$\alpha_n = \alpha_1 + \beta. \quad (1)$$

Угол α_1 определяется по формуле

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_{\max} + \text{inv}\alpha_{\max}}{2} - \text{inv} \frac{\text{arctg}\alpha_{\max}}{2}; \quad (2)$$

$$\alpha_{\max} = \arccos \frac{R_{\partial.o} \cdot \cos \alpha}{R_{\partial.o} + 1,2 \cdot m + 2}. \quad (3)$$

Угол β зависит от метода шлифования и определяется по разному:

– при расположении шлифовальных кругов в одной впадине зубчатого колеса (рис. 2) по формуле

$$\beta = \frac{\pi}{2 \cdot z} - (\text{inv}20^\circ - \text{inv}\alpha_1); \quad (4)$$

– при расположении шлифовальных кругов в соседних впадинах зубчатого колеса (рис. 1) по формуле

$$\beta = \frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot z} - (\text{inv}20^\circ - \text{inv}\alpha_1). \quad (5)$$

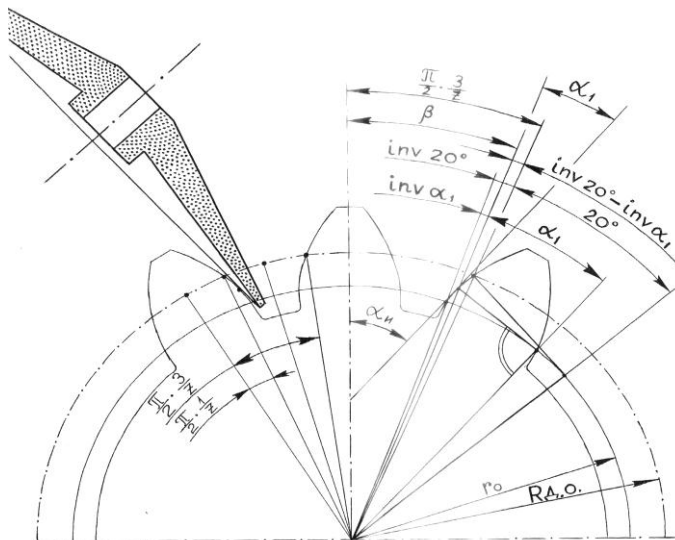


Рисунок 1 – Схема шлифования при расположении кругов в соседних впадинах зубчатого колеса

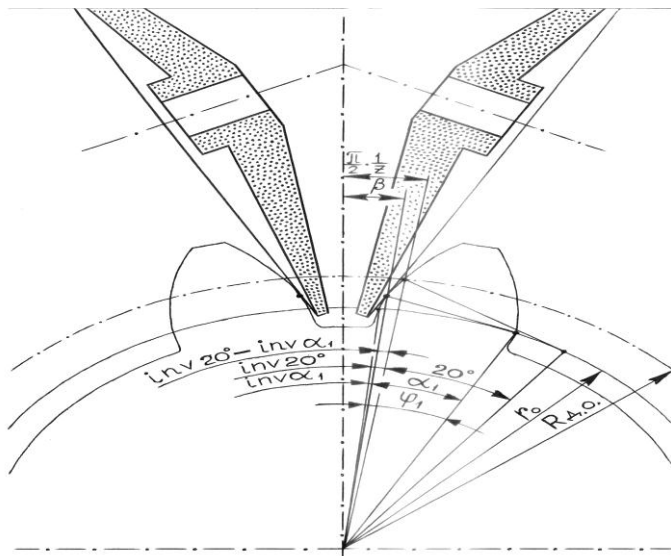


Рисунок 2 – Схема шлифования при расположении кругов в одной впадине зубчатого колеса

От угла установки кругов зависит длина поперечного хода стола $l_{x.c.}$, а от длины поперечного хода стола – машинное время. Предложены аналитические зависимости для расчета длины поперечного хода стола и угла установки шлифовальных кругов при размещении их в одной впадине (6) – (8) и в смежных впадинах обрабатываемого зубчатого колеса (9) – (11).

$$l_{x.c.расч} = 2 \cdot \left(\alpha_{и.расч} - \frac{\pi}{2 \cdot z} + inv20^\circ \right) \cdot R_{д.о.} \cdot \frac{\cos 20^\circ}{\cos \alpha_{и.расч}}; \quad (6)$$

$$l_{x.c.(15)} = 2 \cdot \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{m \cdot z}{2} + 1,2 \cdot m + 2 \right)^2 - r_o^2}}{r_o} - \left(\frac{15^\circ}{57,32} - \frac{\pi}{2 \cdot z} + inv20^\circ \right) \right] \cdot R_{д.о.} \cdot \frac{\cos 20^\circ}{\cos 15^\circ}; \quad (7)$$

$$\alpha_{и.расч} = \frac{\sqrt{\left(\frac{m \cdot z}{2} + 1,2 \cdot m + 2 \right)^2 - r_o^2}}{2 \cdot r_o} + \frac{\pi}{2 \cdot z} - inv20^\circ; \quad (8)$$

$$l_{x.c.расч} = 2 \cdot \left(\alpha_{и.расч} - \frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot z} + inv20^\circ \right) \cdot R_{д.о.} \cdot \frac{\cos 20^\circ}{\cos \alpha_{и.расч}}; \quad (9)$$

$$l_{x.c.(15)} = 2 \cdot \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{m \cdot z}{2} + 1,2 \cdot m + 2 \right)^2 - r_o^2}}{r_o} - \left(\frac{15^\circ}{57,32} - \frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot z} + inv20^\circ \right) \right] \cdot R_{д.о.} \cdot \frac{\cos 20^\circ}{\cos 15^\circ}; \quad (10)$$

$$\alpha_{и.расч} = \frac{\sqrt{\left(\frac{m \cdot z}{2} + 1,2 \cdot m + 2 \right)^2 - r_o^2}}{2 \cdot r_o} + \frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot z} - inv20^\circ. \quad (11)$$

Анализ приведенных зависимостей показывает, что длина поперечного хода стола зависит от характеристики обрабатываемого зубчатого колеса: модуля, числа зубьев, радиуса делительной окружности. С уменьшением длины поперечного хода стола уменьшается сила инерции качающихся частей станка, уменьшается величина деформации линий механизма обката и, как следствие, повышается точность обработки зубчатого колеса.

Предложена аналитическая формула для расчета числа двойных поперечных ходов стола в минуту

$$n_{\text{расч.}} = \sqrt{\frac{l_{\text{х.с.}(15^\circ)} \cdot n_{(15^\circ)}^2 \cdot R_{\text{р.расч.}}^2 \cdot J_{(15^\circ)}}{l_{\text{х.с.расч.}} \cdot R_{\text{р.}(15^\circ)}^2 \cdot J_{\text{расч.}}}}. \quad (12)$$

С уменьшением длины поперечного хода стола увеличивается число ходов в минуту, а это приводит к уменьшению машинного времени

$$T_{\text{м}} = \frac{L_{\text{х}}}{n \cdot S} \cdot Z \cdot K \cdot M, \quad (13)$$

где $L_{\text{х}}$ – длина продольного хода стола, м; S – продольная подача, мм/мин; M – число проходов; $K=1$ (при двухстороннем разделении); $K=2$ (при одностороннем разделении).

Получена формула для расчета силы инерции P_j качающихся частей станка, анализ которой показывает, что за счет уменьшения длины поперечного хода стола можно увеличить число его качаний n , сохраняя при этом постоянной силу инерции P_j качающихся частей станка и точность обработки

$$P_j = \frac{l_{\text{х.с.}} \cdot J}{R_p^2} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \right)^2, \quad (14)$$

где J – момент инерции качающихся частей станка, Н·м·сек²; n – число двойных поперечных ходов стола в минуту; $R_p = \frac{m \cdot Z \cdot \cos 20^\circ}{\cos \alpha_u}$ – радиус ролика обкатки.

На рис. 3 представлены зависимости длины поперечного хода стола (а) и машинного времени (б) от числа зубьев и модулей обрабатываемых колес.

Анализ этих зависимостей показывает, что длина поперечного хода стола и машинное время на станках с 15-градусной настройкой кругов больше чем на станках настроенных на расчетный угол производящей рейки. В среднем оптимизация угла установки кругов уменьшает машинное время на 20 %. Если учесть, что общее время обработки равно 6-7 часов, то уменьшение машинного времени на 20 % достигает 40 минут.

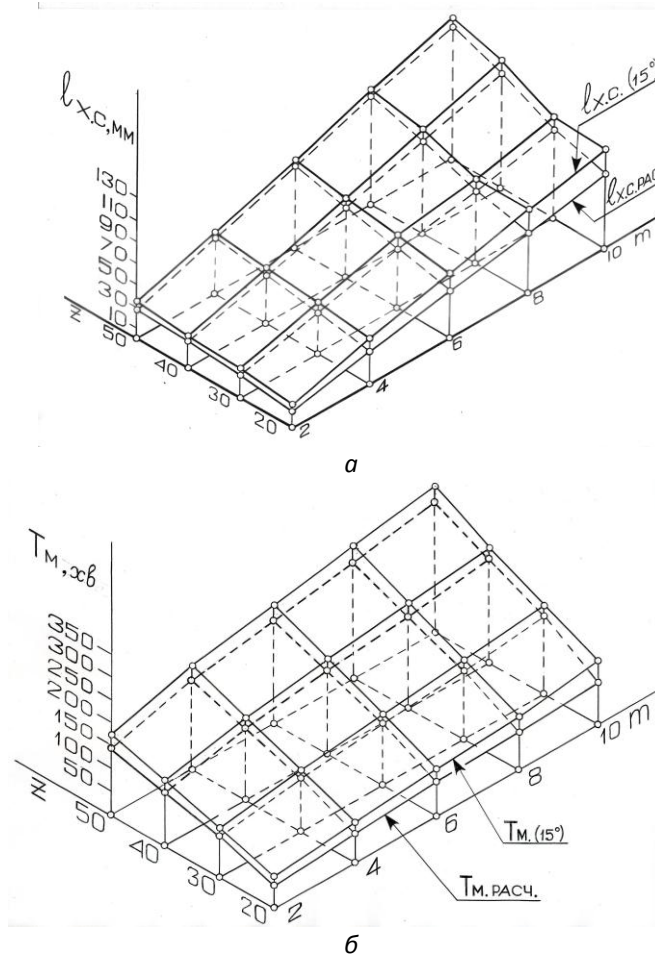


Рисунок 3 – Зависимость длины поперечного хода стола $l_{x.c.}$ на станке МААГ и машинного времени T_M от числа зубьев Z и от модулей m обрабатываемых колес

На рис. 4 показано, что установлено, в случае, если зубчатые колеса отличаются разной комбинацией чисел зубьев и модулей, то для каждого из них существует свой оптимальный угол установки кругов, соответствующий минимальной длине поперечного хода стола. Разработана номограмма, с помощью которой можно для любого колеса выбрать оптимальный угол настройки тарельчатых кругов, при котором машинное время операции зубошлифования будет минимальным.

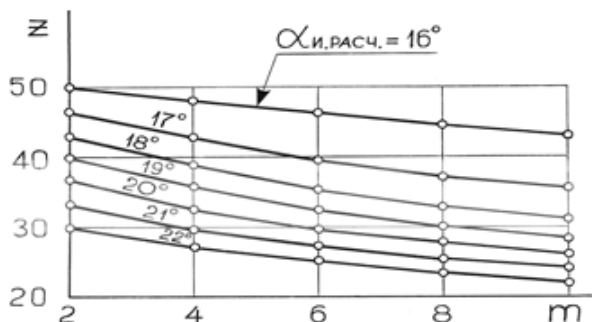


Рисунок 4 – Номограмма для выбора угла установки тарельчатых кругов $\alpha_{и.расч.}$ на станке МААГ (круги размещены в одной впадине), при котором машинное время операции будет минимальным

Выводы. 1. Предложен метод расчета угла разворота тарельчатого шлифовального круга относительно вертикальной плоскости, при котором обеспечивается равенство длин траекторий обкатных движений абразивного инструмента в направлении впадины и в направлении вершины зуба, начинающиеся от линии касания плоскости вращения круга с боковой поверхностью обрабатываемого зуба при настройке станка. При равенстве длин указанных траекторий уменьшается сила инерции качающихся частей станка, что позволяет уменьшить машинное время без снижения точности обработки за счет увеличения числа качаний стола.

2. Разработана номограмма, с помощью которой можно для любого колеса выбрать оптимальный угол настройки тарельчатых кругов, при котором машинное время операции зубошлифования будет минимальным.

Список использованных источников: 1. Рябченко, С.В. Разработка технологии шлифования зубчатых колес тарельчатыми кругами из СТМ. – С.161-168 //Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин: зб. наук. Прац (Серія Г «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти»). – К.: ІНМ ім. Бакуля НАН України, 2006. – 240с. 2. Рябченко В.С. Повышение эффективности шлифования высокоточных зубчатых колес кругами из КНБ //Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем, 2008.Вип.23. – С. 95-101. 3. Мишинаевский, Л.Л. Высокопроизводительное зубошлифование кругами из кубического нитрида бора /Л.Л. Мишинаевский, А.А. Сагарда, В.М. Емельянов и др. // Синтетические алмазы. – 1970. – №5. – С.40-42. 4. Делеви, В.Г. Состояние поверхностного слоя зубчатых колес при шлифовании кругами из КНБ /В.Г. Делеви, Н.Я. Корж, Л.Л. Мишинаевский, Р.К. Ткаченко // Сверхтвердые материалы, – №5. – С.44-48. 5. Гильмутдинов, А.Г. Зубошлифование кругами из кубонита / А.Г. Гильмутдинов, С.И. Белостоцкий, Б.К. Руденко и др. // Синтетические алмазы. – ключ к техническому прогрессу: Сб. трудов – К.: Наукова думка, 1977. – Часть 1. – С.244-248. 6. Байкова, В.Н. Исследование технологических возможностей зубошлифовальных станков, работающих нульградусным методом: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Горький, 1971. 7. Корж, Н.Я. Зубошлифование кругами из кубонита / Н.Я. Корж, Н.П. Дудник // Машиностроитель, 1984. – №7. – С.31. 8. Корж, Н.Я. Опыт зубошлифования

кругами из КНБ на металлической связке / Н.Я. Корж, Н.П. Дудник, М.И. Соляник // Сверхтвердые материалы, 1984. – №3. – С. 56-59. 9. Мишнаевский, Л.Л. Высокоэффективное зубошлифование кругами из КНБ / Л.Л. Мишнаевский, А.Е. Шило // Синтетические сверхтвердые материалы и твердые сплавы, Киев, 1973. – С. 116-120. 10. Чекалина, Н.М. Производительность процесса электрохимического зубошлифования / Н.М. Чекалина // Станки и инструменты. – 1979. – №12. – С.32-36. 11. Рубин, А.Б. Повышение производительности зубошлифования кругами из кубического нитрида бора / А.Б. Рубин, Г.В. Голдин // Алмазно-абразивная обработка: Сб. трудов. – Пермь: ППИ, 1974. – №149. – С. 94-97. 12. Руденко, Б.К. Шлифование зубчатых колес кругами из кубического нитрида бора / Б.К. Руденко, Н.Я. Корж // Сверхтвердые материалы. – 1980. – № 3. – С. 68-71. 13. Фатеев, Г.М. Изыскание путей повышения точности и производительности зубошлифовальных станков, работающих тарельчатыми кругами: Автореф. Дис. канд. техн. наук. – М. 1977. 14. Nakao Hiroshi, Osita Hidzo. Zastosuvannja shlifoval'nyh krugiv z nadtverdih abraziviv // Kikaj to kogu (Tool Eng.). – 1987. – 31, №10. – С.25-32. 15. Kagivada Tadao. Doslidzhennja temperaturi pri shlifuvanni // Kikaj-no kenkyu Sci. Mach. – 1987. – 39, №3. – С. 364-368.

Bibliography (transliterated): 1. Rjabchenko, S.V. Razrabotka tehnologii shlifovaniya zubchatykh koles tarel'chatymi krugami iz STM. – S.161-168 // Suchasni procesi mehanichnoi obrobki instrumentami z NTM ta jakist' poverhni detalej mashin: zb. nauk. Prac (Serija G «Procesi mehanichnoi obrobki, verstaty ta instrumenty»). – K.: INM im. Bakulja NAN Ukraïni, 2006. – 240s. 2. Rjabchenko V.S. Povyshenie jeffektivnosti shlifovaniya vysokotochnykh zubchatykh koles krugami iz KNB // Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem, 2008.Vyp.23. – S. 95-101. 3. Mishnaevskij, L.L. Vysokoproizvitel'noe zuboshlifovanie krugami iz kubicheskogo nitrída bora / L.L. Mishnaevskij, A.A. Sagarda, V.M. Emel'janov i dr. // Sinteticheskie almazы. – 1970. – №5. – S.40-42. 4. Delevi, V.G. Sostojanie poverhnostnogo sloja zubchatykh koles pri shlifovanii krugami iz KNB / V.G. Delevi, N.Ja. Korzh, L.L. Mishnaevskij, R.K. Tkachenko // Sverhtverdye materialy, – №5. – S.44-48. 5. Gil'mutdinov, A.G. Zuboshlifovanie krugami iz kubonita / A.G. Gil'mutdinov, S.I. Belostockij, B.K. Rudenko i dr. // Sinteticheskie almazы – ključ k tehničeskomu progressu: Sb. trudov – K.: Naukova dumka, 1977. – Chast' 1. – S.244-248. 6. Bajkova, V.N. Issledovanie tehnologicheskikh vozmozhnostej zuboshlifoval'nyh stankov, rabotajushhih nul'gradusnym metodom: Avtoref. dis. kand. tehn. nauk. – Gor'kij, 1971. 7. Korzh, N.Ja. Zuboshlifovanie krugami iz kubonita / N.Ja. Korzh, N.P. Dudnik // Mashinostroitel', 1984. – №7. – S.31. 8. Korzh, N.Ja. Opyt zuboshlifovaniya krugami iz KNB na metallicheskoj svjazke / N.Ja. Korzh, N.P. Dudnik, M.I. Soljanik // Sverhtverdye materialy, 1984. – №3. – S. 56-59. 9. Mishnaevskij, L.L. Vysokojeffektivnoe zuboshlifovanie krugami iz KNB / L.L. Mishnaevskij, A.E. Shilo // Sinteticheskie sverhtverdye materialy i tverdye splavy, Kiev, 1973. – S. 116-120. 10. Chekalina, N.M. Proizvitel'nost' processa jelektrohimicheskogo zuboshlifovaniya / N.M. Chekalina // Stanki i instrumenty. – 1979. – №12. – S.32-36. 11. Rubin, A.B. Povyshenie proizvoditel'nosti zuboshlifovaniya krugami iz kubicheskogo nitrída bora / A.B. Rubin, G.V. Goldin // Almazno-abrazivnaja obrabotka: Sb. trudov. – Perm': PPI, 1974. – №149. – S. 94-97. 12. Rudenko, B.K. Shlifovanie zubchatykh koles krugami iz kubicheskogo nitrída bora / B.K. Rudenko, N.Ja. Korzh // Sverhtverdye materialy. – 1980. – № 3. – S. 68-71. 13. Fateev, G.M. Izyskanie putej povyshenija tochnosti i proizvoditel'nosti zuboshlifoval'nyh stankov, rabotajushhih tarel'chatymi krugami: Avtoref. Dis. kand. tehn. nauk. – M. 1977. 14. Nakao Hiroshi, Osita Hidzo. Zastosuvannja shlifoval'nyh krugiv z nadtverdih abraziviv // Kikaj to kogu (Tool Eng.). – 1987. – 31, №10. – S.25-32. 15. Kagivada Tadao. Doslidzhennja temperaturi pri shlifuvanni // Kikaj-no kenkyu Sci. Mach. – 1987. – 39, №3. – S. 364-368.