

**В.Г. Лебедєв¹, Т.В. Чумаченко¹, А.В. Беспалова², Е.І. Омельченко¹,
Т.В. Ніколаєва¹**

Державний університет «Одеська політехніка»¹

Одеська державна академія будівництва і архітектури²

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛ РІЗАННЯ ПІД ЧАС ШЛІФУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ.

Основний обсяг досліджень виконано на сталях Н8К18М12 (мартенситно-старіюча, маловуглецева) і 12Х2Н4А (вуглецева цементована та загартована). В результаті проведених експериментів встановлено, що сили різання при шліфуванні кругами з електрокорунду, кубічного нітриду бора (КНБ) і алмазу досягають значних величин. Встановлено, що сили різання P_y і P_z в діапазоні режимів, які переважно застосовуються при плоскому та круглому шліфуванні можуть досягати величин відповідно $P_y = 30\text{Н}$, $P_z = 20\text{Н}$. При шліфуванні сталі Н8К18М12 сили різання на 20 ... 50% вищі, в порівнянні з силами різання при шліфуванні вуглецевих цементованих і загартованих сталей.

Ключові слова: шліфування, мартенситно-старіюча сталь, сили різання, міцність, пластичність, тріщиностійкість, зварюваність, електрокорунд, кубічний нітрид бору, алмаз.

**В.Г. Лебедев, Т.В. Чумаченко, А.В. Беспалова, Е.И. Омельченко,
Т.В. Николаева**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ.

Основной объем исследований выполнен на сталях Н8К18М12 (мартенситно-старееющая, малоуглеродистая) и 12Х2Н4А (углеродистая цементованная закаленная). В результате проведенных экспериментов установлено, что силы резания при шлифовании кругами из электрокорунда, КНБ и алмаза достигают значительных величин. Установлено, что силы резания P_y и P_z в диапазоне режимов, которые преимущественно применяются при плоском и круглом шлифовании могут достигать величин соответственно $P_y=30\text{Н}$, $P_z=20\text{Н}$. При шлифовании стали Н8К18М12 силы резания на 20...50 % выше, по сравнению с силами резания при шлифовании углеродистых цементованных и закаленных сталей.

Ключевые слова: шлифование, мартенситно-старееющая сталь, силы резания, прочность, пластичность, трещиностойкость, свариваемость, электрокорунд, кубический нитрид бора, алмаз.

**V.G. Lebedev, T.V. Chumachenko, A.V. Bezpalova, E. I. Omelchenko,
T.V. Nikolaeva**

EXPERIMENTAL STUDIES OF CUTTING FORCES DURING GRINDING OF STRUCTURAL HIGH-STRENGTH STEELS.

The bulk of research was carried out on steels Н8К18М12 (maraging, low-carbon) and 12Х2Н4А (carbon carburized hardened). As a result of the experiments carried out, it was found that the cutting forces when grinding with electrocorundum, CBN and diamond wheels reach significant values. It has been established that the cutting forces P_y and P_z in the range of modes that are mainly used for flat and circular grinding can reach the values, respectively, $P_y = 30\text{N}$, $P_z = 20\text{N}$. When grinding Н8К18М12 steel, the cutting forces are 20 ... 50% higher than the cutting forces when grinding carburized and hardened carbon steels.

With a decrease in the grain size of the wheel, the forces increase significantly, which increases the energy consumption of the grinding process.

Compared to the process of grinding with electrocorundum wheels, the cutting forces when using CBN wheels are reduced by 20-25%, and when using diamond wheels, the cutting forces are reduced by 25-30%.

Key words: grinding, maraging steel, cutting forces, strength, plasticity, crack resistance, weldability, electrocorundum, cubic boron nitride, diamond.

Постановка проблеми. Як показано в джерелах [1,2,3] мартенситно-старіючі сталі (МСС)– високолеговані маловуглецеві (0,03% С) конструкційні сталі, на базі систем Fe - Ni і Fe - Cr - Ni, додатково леговані кобальтом, молібденом, титаном і т. п. [1,2]. В результаті особливої термообробки ці сталі стають найбільш перспективними сучасними матеріалами, так як набувають високу міцність при збереженні високої пластичності, корозійну стійкість, працюють в умовах наднизьких та підвищених температур, при високому тиску.

Сталі досить дорогі, проте, якщо їх використовувати в якості наплавочного матеріалу на робочі поверхні деталей, то їх використання економічно виправдано. Для забезпечення розмірної точності і отримання необхідної шорсткості поверхні, наплавлений шар з цих сталей необхідно шліфувати.

На практиці, як показано в джерелах [1,2] використовуються два основні типу мартенситно-старіючих сталей: конструкційні, на основі нікелю, і другий тип – корозійностійкі мартенситно-старіючі сталі.

Сили різання при шліфуванні визначають енерговитрати процесу обробки. Вони деформують пружну систему шліфувального верстата, що позначається на точності операції. При погрішності геометричної форми деталі виникають змінні сили різання, які викликають коливання і вібрації всієї пружної системи верстата. Тому дослідження та порівняння сил різання при шліфуванні мартенситно-старіючої сталі Н8К18М14 і вуглецевої загартованої сталі 12Х2Н4А є важливе завдання для машинобудування.

Об'єкт дослідження – процес шліфування сталевих поверхонь.

Предмет дослідження – сили різання при шліфуванні поверхонь з мартенситно-старіючих та вуглецевих загартованих сталей.

Мета і завдання дослідження – експериментально, при використанні кругів абразивних, з КНБ і алмазних встановити закономірності зміни сил різання при шліфуванні мартенситно-старіючих та вуглецевих загартованих сталей.

Завдання дослідження:

1. Вибрати методику вимірювання сил різання при шліфуванні.
2. Експериментально встановити залежності сил різання P_z і P_y від параметрів процесу шліфування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В роботі [4] розглянуті питання стану поверхні МСС після шліфування еластичними кругами на органічних зв'язках. Сили різання не розглядаються.

В роботі [5] досліджуються сили різання при шліфуванні МСС, але тільки при шліфуванні кругами з електрокорунду. Сили різання при шліфуванні кругами з КНБ і алмазними кругами не розглядаються.

У джерелі [6] розглядаються сили різання при криогенній обробці поверхні, що шліфується. Питання шліфування кругами з надтвердих матеріалів не розглядаються.

В роботі [7] розглянуті температурні і енергетичні питання при абразивному шліфуванні МСС. Питання сил різання не розглядаються.

В роботі [8] розглядаються залишкові напруження після шліфування МСС кругами з КНБ. Абразивні і алмазні круги не розглядаються.

В роботі [9] розглядаються питання шорсткості поверхні при шліфуванні МСС. Сили різання не розглядаються.

В роботі [10] розглядаються питання мікрорізання при обробці МСС. Сили різання не розглядаються.

В роботі [11] розглядається вплив режимів старіння на властивості МСС. Питання сил різання при шліфуванні не зачеплені.

Таким чином, аналізуючи наявні в літературі дані, можна зробити висновок, що досить добре висвітлені питання поведінки мартенситно-старіючих сталей при експлуатації. Практично немає даних про те, як змінюються характеристики цих сталей після впливу на них сил шліфування, значення яких можуть бути досить суттєвими.

Матеріали і методи досліджень

При дослідженнях використовувалась сталь Н8К18М12 та 12Х2Н4А, абразивні електрокорундові шліфувальні круги, а також круги з кубічного нітриду бору і синтетичного алмазу. Експериментальні дослідження проводились з використанням методики планованого експерименту. Сили різання вимірювались за допомогою динамометра УДМ 50 за стандартною методикою [12].

Результати експериментальних досліджень

В результаті проведених експериментів встановлено, що сили різання при шліфуванні кругами з електрокорунду, КНБ і алмазу досягають значних величин, порядку 20-30 Н (Рис. 1- Рис.3)

Відзначено підвищення сил різання при шліфуванні сталі Н8К18М12, в порівнянні з силами різання при шліфуванні сталі 12Х2Н4А. При шліфуванні мартенситно-старіючих сталей сили різання на 20 ... 50% вище.

При зміні зернистості для кругів з електрокорунду, КНБ і алмазних кругів від зернистості 20 до 8 сили різання зростають в 2 ... 2,5 рази. Це можна пояснити тим, що при зменшенні зернистості круга значно збільшується число ріжучих зерен в одиниці його поверхні, а, отже, і в зоні контакту круга із заготовкою. Силоне навантаження на кожне окреме зерно при цьому зменшується в менших межах і не може компенсувати збільшення числа зерен. Це призводить до значного зростання сил різання. Крім того, при шліфуванні дрібнозернистими кругами збільшується тертя зв'язки шліфуємої поверхні, в результаті чого сили різання зростають.

При зміні режимів обробки істотне значення надають швидкість обертання шліфувального круга (Рис.4.), поперечна подача, глибина різання, поздовжня подача.

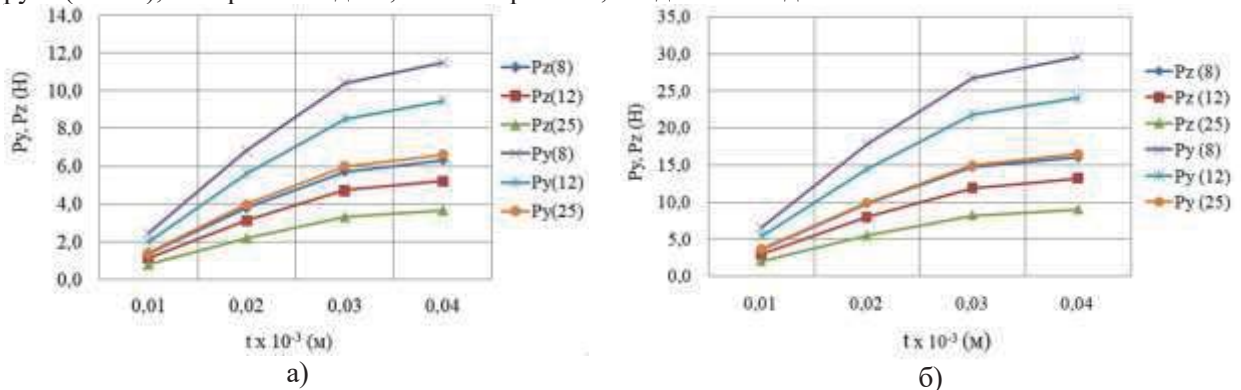


Рис.1. Залежність зміни величини сили P_y і P_z від глибини шліфування при різній зернистості круга.

а) - сталь 12Х2Н4А, б) - сталь Н8К18М14

Режими: $V_{кр}=35$ м/хв; $V_d=0,1$ м/хв; $S=2$ мм/хід.

Круг керамічний (електрокорунд): 1 - 25А8 СМІК, 2 - 25А12 СМІК, 3 - 25А25СМІК

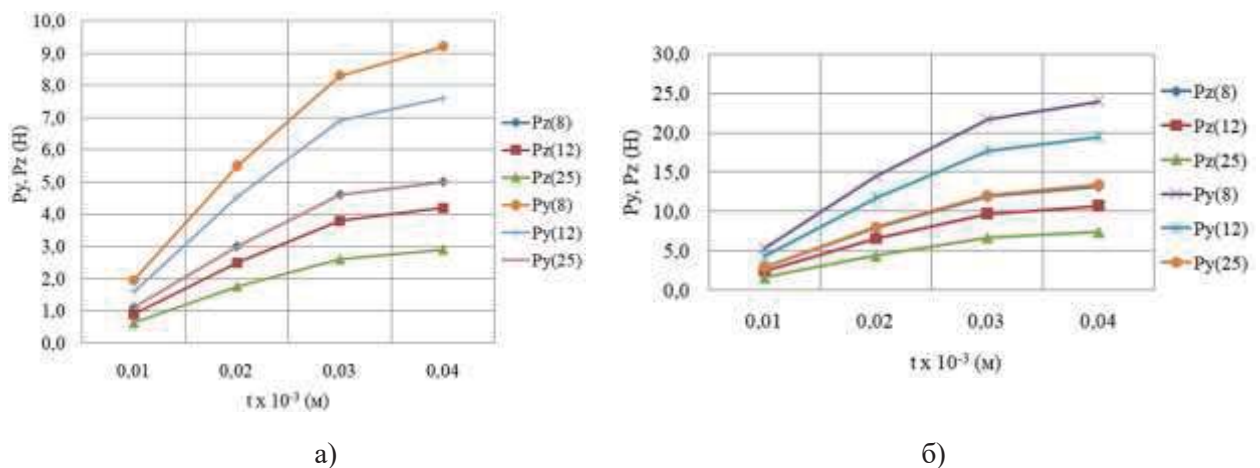


Рис.2. Залежність зміни величини сили P_y і P_z від глибини шліфування при різній зернистості круга.

а) - сталь 12Х2Н4А, б) - сталь Н8К18М14

Режими: $V_{кр}=35$ м/хв; $V_d=0,1$ м/хв; $S=2$ мм/хід.

Круги з КНБ: ЛО 80/60С10 100%; ЛО 120/100 С10 100%;
ЛО 250/200С 10 100%

Закономірності зміни сили P_z такі ж, як і сили P_y для двох сталей при змінних абразивах (Рис.1-3).

Результати дослідів показують, що співвідношення між силами різання P_y і P_z в середньому становить 1,47.

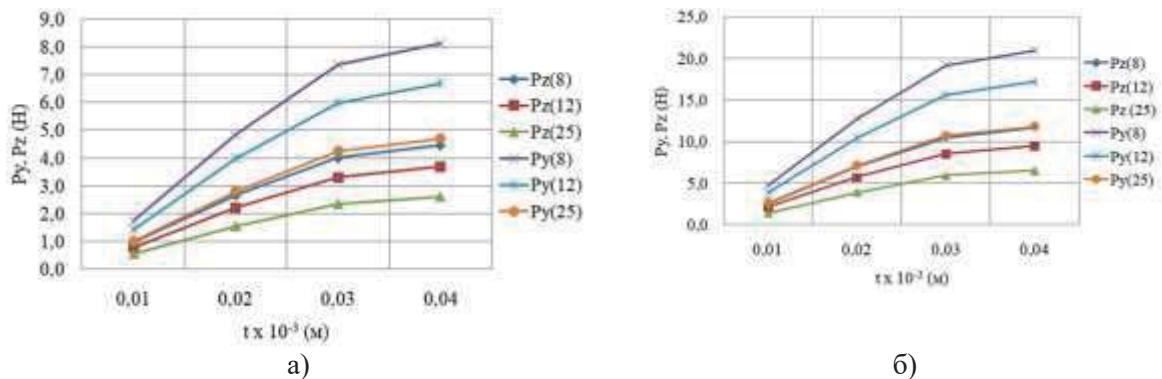


Рис.3. Залежність зміни величини сили P_y і P_z від глибини шліфування при різній зернистості круга

а) - сталь 12X2H4A, - сталь H8K18M14

Режими: $V_{кр}=35$ м/хв; $V_0=0,1$ м/хв; $S=2$ мм/хід..

Круги алмазні: ACO80/60C10 100%; ACO120/100C10 100%; ACO250/200C10 100%.

Результати

Встановлено, що сили різання P_y і P_z в діапазоні режимів, які переважно застосовуються при плоскому та круглому шліфуванні можуть досягати величин відповідно $P_y = 30$ Н, $P_z = 20$ Н.

При зменшенні зернистості круга сили значно зростають, що підвищує енерговитрати процесу шліфування.

У порівнянні з процесом шліфування електрокорундовими кругами сили різання при використанні кругів з КНБ зменшуються на 20-25%, а при використанні алмазних – сили різання зменшуються на 25 - 30%.

Збільшення глибини різання і поздовжньої подачі призводить до значного зростання сил різання, а збільшення швидкості обертання круга призводить до їх зменшення.

Закономірності зміни сил різання аналогічні при шліфуванні вуглецевих і мартенситно-старіючих сталей.

Висновки

При шліфуванні мартенситно-старіючих і вуглецевих гартованих сталей бажано вибирати круги з найбільшою зернистістю, яка можлива для задовільнення вимог по шорсткості поверхні.

Швидкість обертання круга слід вибирати не менше 30 м/хв, або трохи вище, якщо дозволяють умови охорони праці.

При шліфуванні кругами з КНБ сили різання на 20-25% нижче, ніж при шліфуванні електрокорундовими кругами для даних сталей.

При шліфуванні алмазними кругами сили різання на 30% нижче ніж при шліфуванні електрокорундовими кругами.

Список використаних джерел:

1. Гуляев А.П., Гуляев А.А. Металловедение: учебник для вузов. 7-е изд., перераб. и доп. Москва: Альянс, 2011. 643с.
2. Биронт В. С. Теория термической обработки. – СФУ: ИЦМиЗ. – Красноярск, 2007. – 234 с.
3. Биронт В. С., Крушенко Г.Г. Влияние термической и термоциклической обработки на структуру и свойства мартенситно-старееющей стали. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 3 2008 1, С. 247-255. URL: <http://elib.sfu->

https://www.kras.ru/bitstream/handle/2311/860/03_%20%20%20%20%20.pdf;jsessionid=4B6C76F6B5DC05273E91A3602348AA48?sequence=1

4. Shouguo S., Beizhi Li, Weicheng Guo. Surface integrity in grinding of C-250 maraging steel with resin-bonded and electroplated CBN grinding wheels. *The International Journal of Advanced Manufacturing, Technology*. 2019. № 103, P. 1079–1094.

5. Weicheng Guo, Beizhi Li, Shouguo Shen, Qinzhi Zhou. Experimental study on force model in grinding of maraging steel 3J33. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*. 2018. P. 3475-3486. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406218814041>

6. Arunachalam S. S. B., Kannan C., Arun V. K., Hariharan K., Danil Y. P., Khaled G., Krzysztof N. Effect of Cryogenic Grinding on Fatigue Life of Additively Manufactured Maraging Steel. *Materials*. Materials (Basel). 2021 Mar; 14(5): 1245 URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7961498/>

7. Zishan D., Beizhi L., Omar F., Yamin S., Steven Y., Lianga, B. Investigation of Temperature and Energy Partition During Maraging Steel Micro-grinding. *9th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2016 – “Intelligent Manufacturing in the Knowledge Economy Era. 2016. P. 284-288. DOI: 10.1016/j.procir.2016.10.084*

8. Shouguo S., Beizhi Li, Weicheng Guo. Residual Stresses Distributions in Grinding of 3J33 Maraging Steel with Miniature Electroplated CBN Wheel. *The 5th International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering. MATEC Web Conf.* 2019. № 256. DOI: [10.1051/mateconf/201925601002](https://doi.org/10.1051/mateconf/201925601002)

9. Jindrich F., Tomas B., Miroslav Z. Grinding of Maraging Steel 1.2709 with SiC Grinding Wheels and Effect of Grinding Conditions on the surface Roughness and Wear of the Wheels. *Manufacturing Technology*. 2020, 20(1): P.18-22. | DOI: [10.21062/mft.2020.018](https://doi.org/10.21062/mft.2020.018)

10. Zhongpeng Z., Yan Jin Lee, Jiayi Z., Xin Jin, Hao Wang. Ultra-precision micro-cutting of maraging steel 3J33C under the influence of a surface-active medium. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. №292. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2021.117054](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117054)

11. Demir H., Guldibi A. S. Aging Effect on Microstructure and Machinability of Corrax Steel. *Engineering, Technology and Applied Science Research*. 2020. № 10, P. 5168-5174. URL: <https://doi.org/10.48084/etasr.3265>

12. Фроленкова О.В. Забезпечення якісних характеристик напиленого термобар'єрного шару ельборовим шліфуванням: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 Одеса, 2020.– 125 с.

Рецензенти:

Орگیян Олександр Андрійович зав.каф. «Технологія машинобудування» Державного університету «Одеська політехніка», д.т.н., проф.

Дубровський Михайло Павлович зав.каф. «Морські і річкові порти, водні шляхи, та їх технічна експлуатація» Одеського національного морського університету, академік Транспортної академії України, д.т.н., проф.