

УДК 621.923-5

**В.Г. Лебедев, Н.М. Клименко, Е.А. Луговська, А.В. Овчаренко**  
*Одеський національний політехнічний університет*

### **СИЛЫ РИЗАННЯ ПРИ ШЛІФУВАННЯ ШИЙОК ЦЕЛЬНОКОВАНОГО ВАЛА ГАЗОВОЇ ТУРБИНИ НАПЛАВЛЕНИХ МАРТЕНСИТНО- СТАРІЮЧОЮ СТАЛЛЮ**

*У статті наведено результати досліджень сили різання і шорсткості поверхні при шліфуванні. Кругами з КНБ шийок цільнокovanого вала газової турбіни, що наплавлені мартенситно- старіючою сталлю H18K9M5T. Показана залежність сил і шорсткості від режимів шліфування і від характеристик кругів. Дослідження направлені на створення нормативної бази шліфування мартенситно- старіючих сталей.*

*Ключові слова: сили різання, КНБ, мартенситно- старіюча сталь.*

**V.G. Lebedev, N.N. Klimenko, E.A. Lugovskaya, A.V. Ovcharenko**  
*Odessa National Polytechnic University*

### **СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИЯ ШЕЕК ЦЕЛЬНОКОВАНОГО ВАЛА ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ НАПЛАВЛЕННЫХ МАРТЕНСИТНО- СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛЬЮ**

*В статье приведены результаты исследований силы резания и шероховатости поверхности при шлифовке. Кругами с КНБ шеек цильнокovanого вала газовой турбины, наплавленные мартенситно- стареющей сталью H18K9M5T. Показана зависимость сил и шероховатости от режимов шлифования и от характеристик кругов. Исследования направлены на создание нормативной базы шлифовки мартенситно- стареющих сталей.*

*Ключевые слова: силы резания, КНБ, мартенситно- стареющие стали.*

**V.G. Lebedev, N.N. Klimenko, E.A. Lugovskaya, A.V. Ovcharenko**  
*Odessa National Polytechnic University*

### **CUTTING FORCES WHILE GRINDING NECKS OF ONE-PIECE SHAFT OF GAS TURBINE WELDED WITH MARTENSIT AGING STEELS**

*The article presents the results of research of cutting forces and surface roughness when grinding with wheels of CBN the of one-piece shaft of gas turbine welded with martensit aging steel H18K9M5T.*

*The dependence of the strength and roughness of the grinding conditions and the characteristics of wheels were shown. Research aimed at creating a regulatory framework of grinding of martensite aging steels.*

*Keywords: Keywords: cutting forces, cubic boron nitride, martensite aging steel.*

**Анализ последних исследований и публикаций.** Вал – основная и наиболее нагруженная деталь в газотурбинном двигателе (ГТД). На него действуют следующие силы: крутящий момент, соответствующий передаваемой турбиной мощности, изгибающий момент от собственного веса и веса насаженных на него деталей, силы неуравновешенного давления пара вдоль оси.

Кроме того, если турбинные лопатки работают при температуре порядка 700 – 900<sup>0</sup>С, то сам вал и шейки на которые он опирается, работают в температурном диапазоне 400 – 500<sup>0</sup>С, ввиду чего цельнокovaný вал изготавливается из относительно жаростойких сталей типа 35ХНМА. Значительный вес самого вала, высокая скорость вращения, большая передаваемая мощность и высокая температура эксплуатации вызывают значительный износ шеек вала, которые подлежат восстановлению наплавкой, поскольку восстановление работоспособности вала таким методом обходится в 10 раз дешевле, чем стоимость нового. После наплавки следует механическая обработка, которая завершается шлифованием, поскольку не обходимо обеспечить точность порядка h6 и шероховатость порядка Ra 25 – 16.

В настоящей работе наплавка осуществлялась сталью из разряда мартенситно- стареющих H18K9M5T. Это малоуглеродистая сталь (C < 0,03%) легированная никелем (8 – 20%), кобальтом и титаном. После наплавки, наплавленный слой закаляют с охлаждением на воздухе от температуры 800 – 850<sup>0</sup>С, В результате закалки сталь состоит из безуглеродистого мартенсита в котором растворены мелкодисперсные, твердые и прочные интерметаллидные соединения системы Ni – Co, Ni – Mo, Ni – Ti. Закаленная таким образом сталь имеет повышенная прочность, пластичность, вязкость и невысокую твердость.

Старение стали осуществляется путем отжига ее в пределах 600<sup>0</sup>С, в результате чего происходит выделением из мартенсита интерметаллидных частиц типа Ni<sub>3</sub>Ti, NiT и Fe<sub>2</sub>Mo.[1], что значительно повышает твердость стали до HRC 60 – 62, прочность до 1200 МПа и значительную теплостойкость 500 – 550<sup>0</sup>С. Иными словами твердый раствор безуглеродистого мартенсита превращается в механическую смесь с мелкодисперсными интерметаллидами. Поверхностный

слой шейки при этом имеет высокую износостойкость, малую чувствительность к концентраторам напряжений, и как следствие этого, высокую эксплуатационную надежность.

Шлифование такого слоя сопряжено с трудностями, которые не свойственны шлифованию нетеплостойких закаленных сталей. Практически нет нормативных материалов, которые позволили бы проектировать процесс шлифования, который бы комплексно обеспечивал все качественные характеристики детали – точность, шероховатость, неизменный структурный состав поверхностного слоя.

Несмотря на высокую твердость такой слой обладает повышенной пластичностью. Это обстоятельство вызывает необходимость применять высокие скорости резания при шлифовании 40 – 50 м/с. Условия резания зерном при этом улучшаются, однако происходит интенсивный износ круга и процесс резания сопровождается повышенными температурами, которые не должны превышать 600 °С, поскольку при более высоких температурах начинается интенсивная коагуляция интерметаллидов, что приводит к потере твердости, прочности и теплостойкости.

Настоящей работе, исходя из условий высокой твердости и прочности наплавленного слоя, шлифования производится кругами из кубического нитрида бора. Торговое наименование: Боразон (США), Кубанит (Украина), Эльбор (РФ).

Для того, чтобы создать нормативную базу для шлифования КНБ таких сталей необходимо провести комплексное исследование зависимостей сил шлифования, температур, шероховатости поверхности, структуры поверхностного слоя и остаточных напряжений в зависимости от характеристик кругов, режимов шлифования и условий применения СОЖ.

В настоящей работе приведены результаты исследований сил резания и шероховатости поверхности.

**Постановка задач.** В работе поставлена цель – исследовать силы резания при шлифовании наплавленного слоя из мартенситно – стареющей стали и шероховатости поверхности поскольку величина сил резания непосредственно влияет на точность обработки и на величину шероховатости поверхности.

**Изложение основного материала.** Измерения сил резания проведены по методике, изложенной в работе [2 с.98].

В результате проведенных экспериментов установлено, что силы резания при шлифовании кругами из КНБ достигают значительных величин и оказывают влияние на процесс обработки.

Замечена некоторая тенденция к повышению сил резания при шлифовании теплостойких материалов, таких как ВТ8 и сталь Н18К9М5Т, 08Х18Н9Т. При шлифовании этих материалов силы резания на 10...14 % выше, чем при шлифовании всех прочих материалов.

Характеристики кругов существенно влияют на силы резания. Так, при изменении зернистости круга от 20 до 5 силы резания возрастают в 2...2,5 раза. Это можно объяснить тем, что при уменьшении зернистости круга значительно увеличивается число режущих зерен в единице поверхности круга, а, следовательно, и в пятне контакта круга с заготовкой. Силовая нагрузка на каждое отдельное зерно при этом уменьшается в меньших пределах и не может компенсировать увеличение числа зерен. Это приводит к значительному росту сил резания. Кроме того, при шлифовании мелкозернистыми кругами увеличивается трение связки о шлифуемую поверхность, в результате чего силы резания возрастают. Рис. 1и Рис. 3.

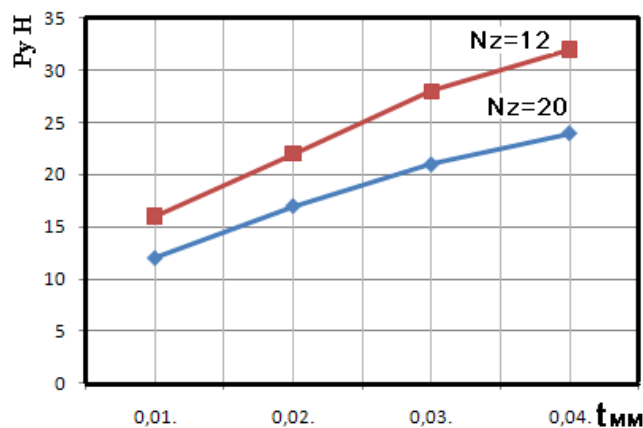


Рис. 1. Зависимость величины силы  $R_u$  от зернистости круга.  
Сталь Н18К9М5Т.  $V_{\text{кр}} = 35$  м/с;  $V_{\text{д}} = 0,1$  м/с. Круги ЛО20С1К; ЛО12С1К - 100%

При изменении связки шлифовального круга также наблюдается изменение сил резания. Так, при шлифовании кругами на бакелитовой связке силы резания на 30% меньше, чем при шлифовании кругами на керамической связке. Это объясняется тем, что бакелитовая связка более эластична, в результате чего она лучше деформируется в процессе резания, что приводит к уменьшению сил трения, и, как следствие, сил резания.

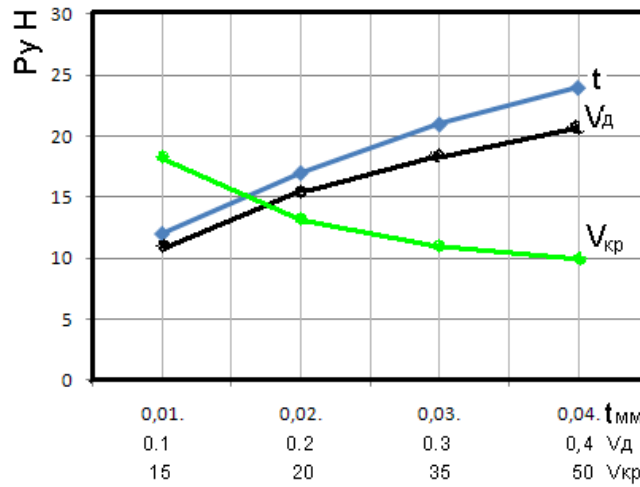


Рис. 2. Зависимость силы  $P_z$  от режимов обработки при шлифовании стали H18K9M5T кругом LO20C1K – 100%.

Режимы обработки также в значительной степени влияют на силы резания при шлифовании кругами из КНБ. Наиболее существенное значение оказывают скорость вращения шлифовального круга, поперечная подача, глубина резания, влияние продольной подачи сказываются меньше. Рис. 2 и Рис. 4. На всех рисунках радиус закругления вершинки зерна КНБ берется по данным работы 2. При этом номер зернистости круга КНБ при водится к номеру зернистости абразивного круга. Например зернистость ЛО 160/100 соответствует абразивному номеру зернистости 16.

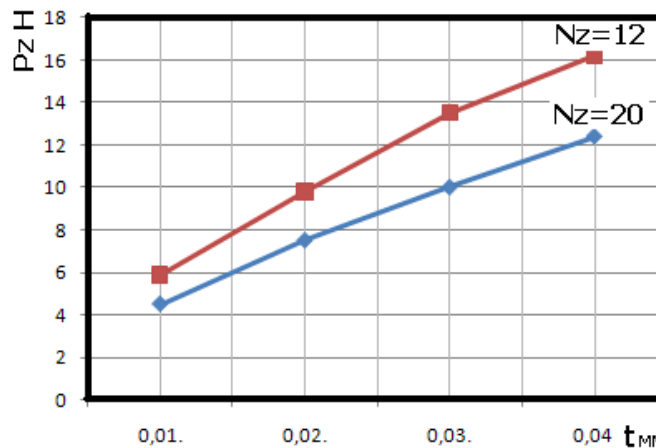


Рис.3. Зависимость величины силы  $P_z$  от зернистости круга. Сталь H18K9M5T.  $V_{кр} = 35$  м/с;  $V_d = 0,1$  м/с. Круги LO20C1K; LO12C1K – 100%

Проведенные эксперименты позволили установить, что соотношение между силами резания  $P_y$  и  $P_z$  колеблется в довольно широких пределах от 1,31 до 2,2, и в среднем составляет 1,47.

Это происходит потому, что установлены некоторые различия в изменении сил резания  $P_y$  и  $P_z$  в зависимости от режимов обработки. Причины этого заключаются в том, что при изменении режимов обработки несколько изменяется динамика процесса, что приводит к изменению кинематических углов при резании различными зёрнами, что определяет соотношение между силами  $P_y$  и  $P_z$ .

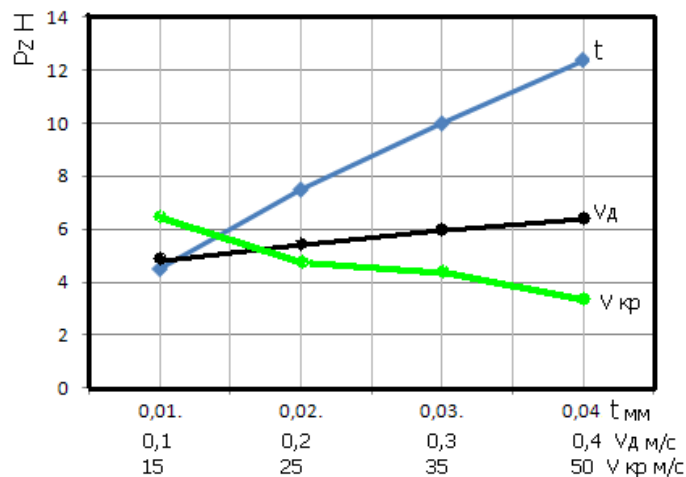


Рис. 4. Залежність сили  $P_z$  від режимів обробки при шлифуванні сталі Н18К9М5Т кругом ЛО20С1К -100%.

Обробка результатів вимірювань показала, що залежність зміни сил  $P_y$  і  $P_z$  може бути описана наступними вираженнями:

$$P_y = \frac{131515 v_d^{0,89} t^{0,52} s^{1,8} \sigma^{0,75} k}{v_{кр}^{0,41} r^{0,48} s^{1,16}}$$

$$P_z = \frac{98732 v_d^{0,26} t^{0,78} s^{0,86} \sigma^{0,75} k}{v_{кр}^{0,41} r^{0,48} s^{1,16}}$$

де  $k$  – коефіцієнт, який має значення при зв'язці Б1 –  $k = 1$ ; при керамічній зв'язці С1 –  $k = 1,3$ .

Як показує досвід, деталі в точному машинобудуванні та приладобудуванні, а також різні деталі гідроапаратури повинні мати низькі значення шорсткості поверхні, що відповідають 0,32...0,050 мкм за  $Ra$ .

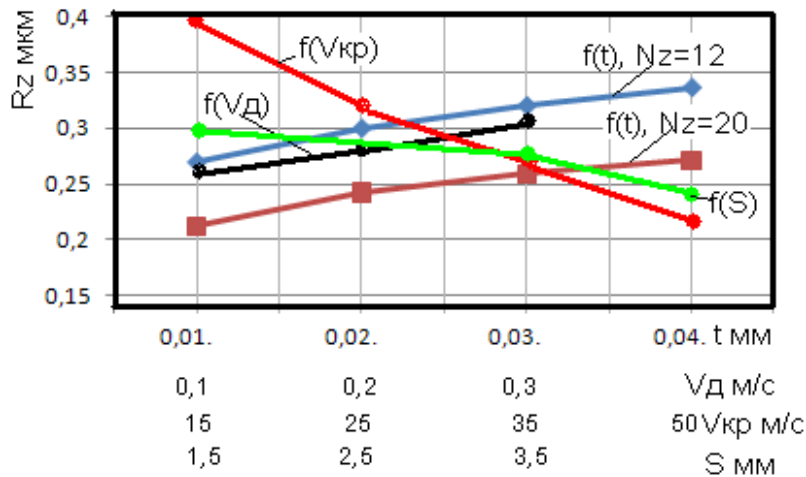
Дана шорсткість при абразивному шлифуванні досягається з великим зусиллям, в результаті чого доводиться вводити додаткові доводочні операції.

З цієї точки зору, можливості шлифування кругами з КНБ можуть бути використані найбільш повно, так як в загальному випадку шорсткість поверхні при шлифуванні кругами з КНБ нижче, ніж абразивним. Вивчення закономірностей шорсткості поверхні від факторів обробки може дати можливість будувати процес так, щоб стабільно підтримувати потрібне значення шорсткості [3,4].

Результати досліджень показали, що велике вплив на шорсткість має зернистість шліфувального круга. Так, зміна зернистості шліфувального круга з 8 до 20 підвищує шорсткість в 1,5...2 рази. Це пояснюється тим, що при збільшенні зернистості круга збільшуються радіуси закруглення зерен, зростають сили, що діють на зерно, і збільшується глибина заглиблення зерна в метал.

Зв'язка кругів з КНБ також впливає на величину шорсткості. Як показали дослідження, шорсткість поверхні при шлифуванні кругами на органічних зв'язках на 15...10% нижче, ніж при шлифуванні кругами на керамічних зв'язках. Це можна пояснити тим, що органічні зв'язки більш еластичні і при збільшенні сил, що діють на зерно, останнє більше заглиблюється в органічну зв'язку, ніж в керамічну, що відповідно зменшує глибину заглиблення зерна в метал.

Режими обробки також впливають на величину шорсткості Рис.5.



**Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности от режимов обработки и зернистости круга стали Н18К9М5Т кругом ЛО20С1К8-100% ( $v_{кр}=35$  м/с,  $t = 0,010$  мм,  $v_d = 0,1$  м/с,  $S = 1,5$  мм/ход стола)**

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить зависимость шероховатости поверхности в следующем виде:

$$Ra = \frac{2.9 - v_d^{0.14} t^{0.16} r^{0.5}}{s^{0.27} v_{кр}^{0.53}}$$

Так, например, при шлифовании кругом зернистости 12, увеличение скорости вращения шлифовального круга с 22 до 33 м/с, глубины резания 0,015 мм и поперечной подачи 5 мм/ход стола параметр шероховатости  $Ra$  уменьшается со значения 0,3 до 0,22 мкм. Это объясняется тем, что при увеличении скорости вращения круга в съеме металла принимает участие большее число режущих зерен, в результате чего уменьшается сечение стружки, снимаемой КНБ зерном, уменьшается величина углубления зерна в металл.

Увеличение поперечной подачи приводит к некоторому снижению величины шероховатости. Так, при указанных режимах обработки, увеличение поперечной подачи с 1,5 до 5 мм/ход приводит к уменьшению шероховатости на 10...15 %. При увеличении поперечной подачи возрастает площадь пятна контакта круга с заготовкой и растет число зерен, принимающих участие в съеме металла.

Чем больше скорость детали, тем выше величина шероховатости, что объясняется увеличением сечения стружки, снимаемой зерном КНБ.

Как показали исследования, при скорости вращения круга 30...35 м/с и глубине резания 0,010...0,015 мм, величина шероховатости стабильно соответствует  $Ra = 0,160...0,250$  мкм.

При чистовых операциях, увеличивая скорость вращения круга до 40...45 м/с и уменьшая величину глубины резания до 5 мкм, значение шероховатости поверхности стабильно соответствует  $Ra = 0,032...0,025$  мкм, что позволяет полностью отказаться при чистовой обработке деталей от доводочных операций.

Как показало исследование погрешность размеров детали при шлифовании кругами из КНБ зависит от режимов обработки, характеристик шлифовального круга, свойств шлифуемого материала и от жесткости шлифовального станка.

Установлено, что погрешность обработки непосредственно связана с силами резания при шлифовании кругами из КНБ. Так, при жесткости технологической системы плоскошлифовального станка  $0,78 \cdot 10^6$  Н/м, режимах  $v_{кр} = 50$  м/с,  $v_d = 0,083$  м/с,  $S = 1,5$  мм/ход,  $t = 0,002$  мм погрешность обработки составляет величину порядка  $\pm (0,7...1)$  мкм для размера 15 мм. При увеличении таких параметров режима как  $v_d$ ,  $t$ ,  $S$  до величин соответственно 0,25 м/с; 0,015 мм; 5 мм/ход – погрешность обработки составляет 32 мкм, что связано с увеличением силы  $P_y$ .

Определение погрешностей шлифования кругами из КНБ показало, что они не выходят за пределы шестого качества точности даже при самом неблагоприятном сочетании режимов обработки.

Для обычных условий шлифования погрешности обработки укладываются в поля допусков 5...6 квалификаций.

Погрешности обработки, вызванные деформацией технологической системы, под действием сил резания укладываются в допуск 6 качества точности.

Сравнение погрешностей шлифования от сил резания, проведенное в работе, показывает, что при шлифовании кругами из КНБ точность в среднем на один класс выше, чем при абразивном.

#### **Выводы:**

1. Проведенное исследование показало, что при шлифовании кругами из КНБ значение суммарных сил  $P_y$  и  $P_z$  может достигать соответственно до 75 и 40 Н. Наибольшее влияние на увеличение сил резания оказывает поперечная подача, скорость детали и глубина резания. При увеличении скорости вращения шлифовального круга, силы резания значительно уменьшаются. Закономерности изменения сил  $P_y$  и  $P_z$  различны, хотя и имеют одинаковую структуру. Свойства шлифуемого материала незначительно влияют на величину сил.

2. Соотношение между силами  $P_z$  и  $P_y$  не одинаково по всему диапазону исследуемых режимов и изменяется от 1,31 до 2,2 Н в среднем составляет 1,47.

3. Шероховатость поверхности деталей при шлифовании кругами из КНБ зависит от режимов обработки и характеристик этих кругов. Величина шероховатости  $R_a$  находится в пределах 0,050...0,32 мкм, что значительно ниже, чем при абразивной обработке, и в сочетании с малыми погрешностями даст возможность в ряде случаев отказываться от притирочных операций, даже при обработке ответственных деталей гидроаппаратуры.

4. Погрешности обработки, вызванные деформацией технологической системы, под действием сил резания укладываются в допуск 6 качества точности.

#### **Список использованных источников:**

1. Ю.М.Лахтин, В.П.Леонтьева. Материаловедение, Москва, Машиностроение, 1990.
2. Чумаченко Т.В. Технологическое обеспечение качества и производительности обработки поверхностей шеек валов роторов газовых турбин, напыленных минералокерамикой. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Одесса 2011.
3. Аль Аджейлат С.А. Шероховатость поверхности деталей при эльборовом шлифовании направляющих прессов / С.А. Аль Аджейлат, В.Г. Лебедев // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсе и энергосбережении : мат. междунар. науч. — техн. конф., тезисы докл. — Одесса — Киев, АТМ Украины, 2009. — С. 130 — 133.
4. Аль Аджейлат С.А., Лебедев В.Г. Качество поверхности при эльборовом шлифовании валов к гидравлическим насадочным прессам и к прессам для обжима буртов бандажей колес / С.А. Аль Аджейлат, В.Г. Лебедев // : мат. междунар. науч.-техн. конф., тезисы докл. — Одесса — Киев, АТМ Украины, 2006. — С. 51 — 54.

#### **Рецензенты**

**Лищенко Н.В.**, ст. преп., к.т.н., доцент.

**Ларшин В.П.**, преп., д.т.н. проф.

Стаття надійшла до редакції 29.03.2016.