

УДК 621.923

Г.И. Ищенко, Харьков, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ И РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ШЛИФОВАНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Досліджено вплив режимів шліфування та правки, характеристики абразивного інструменту на вихідні параметри плоского шліфування лопаток турбін в заготовках з титанового сплаву VT9. В результаті проведеного дослідження зроблені висновки про те, що на загальному фоні збільшення складових сили різання відносини P_z/P_y знижується.

Ключові слова: лопатки турбін з титанового сплаву, сили різання, режими обробки, алмазна правка шліфувального круга

Исследовано влияние режимов шлифования и правки, характеристики абразивного инструмента на выходные параметры плоского шлифования лопаток турбин в заготовках из титанового сплава VT9. В результате проведенного исследования сделаны выводы о том, что на общем фоне увеличения составляющих силы резания отношения P_z/P_y снижается.

Ключевые слова: лопатки турбин из титанового сплава, силы резания, режимы обработки, алмазная правка шлифовального круга

The effect of grinding and straightening modes, characteristics of the abrasive tool on the output parameters of flat grinding of turbine blades in blanks from titanium alloy VT9 was investigated. As a result of the study, it was concluded that, against the general background of the increase in the cutting force components, the ratio P_z/P_y decreases.

Keywords: turbine blades made of titanium alloy, cutting forces, processing modes, diamond dressing of the grinding wheel

Введение

Одной из наиболее важных проблем энергетического машиностроения является совершенствование конструкции паровых и гидравлических турбин.

Лопаточный аппарат является самой ответственной и наиболее дорогой частью турбины и составляет 25-30% общей трудоемкости производства турбин. К проектированию пера лопатки предъявляются повышенные требования по точности и качеству. Точность изготовления рабочей части составляет 0,01 мм. При проектировании закладывается точность расчета 0,001 мм. Вторым важным требованием является качество поверхности (шероховатость поверхности Ra 0,32-0,16 мкм – близка к зеркальной поверхности). Малейшая неровность, получившаяся при проектировании геометрии пера, будет многократно усилена при изготовлении лопатки.

Совершенствование технологии изготовления лопаток, изыскание новых более совершенных методов финишной обработки, обеспечение норм точности изготовления частей лопаток, а также снижение шероховатости поверхностей являются весьма актуальными задачами как с точки зрения повышения надежности и экономичности турбин, так и с точки зрения снижения их себестоимости. Для увеличения срока службы лопаток турбин предложен вариант их изготовления из сплава на основе титана.

Состояние вопроса и постановка задачи

Основная причина плохой обрабатываемости шлифованием сплавов на основе титана объясняется высокой адгезионной активностью металла к абразивному материалу [1]. Если в качестве критерия интенсивности адгезионного взаимодействия пары абразивный материал - металл рассматривать количество абразивного материала, перенесенного при шлифовании на поверхность металла [2], то среди d-переходных элементов по данному критерию титановый сплав относится к группе наиболее активных металлов [3]. Именно адгезионная активность титана и сплавов на его основе является причиной интенсивного износа абразивного инструмента, большой силы резания и шероховатости обработанной поверхности [4]. При шлифовании время взаимодействия пары абразив - металл существенно выше, что увеличивает негативное влияние адгезионного взаимодействия на показатели процесса. Использование специального абразивного инструмента, оптимизация режимов обработки и постоянная правка круга позволяют снизить интенсивность контактных процессов при шлифовании [5].

В данной работе рассмотрено влияние режимов шлифования и правки, характеристики абразивного инструмента на выходные параметры плоского шлифования заготовок лопаток турбин из титанового сплава.

Методика исследований

Исследования проведены на станке для плоского шлифования модели ЛШ-232, который оснащен устройством для непрерывной правки и компенсации износа абразивного инструмента. В качестве абразивного инструмента использовали специальные шлифовальные круги типоразмера ПП-200×40×32 из электрокорунда нормального марки 15А зернистости 32 мкм и 16 мкм. Шлифовали образцы из сплава ВТ9. Размеры образцов 100×80×15 мм. Контролируемые параметры процесса плоского шлифования: составляющие силы резания P_y и P_z , режущая способность Q , наличие шлифовочных прижогов, химический состав и состояние рельефа обработанной поверхности.

Силы резания измеряли динамометром УДМ-600 и измерительным комплексом Amti MC36-1000UP с регистрацией данных на ПК с использованием специальной программы.

Состояние рельефа обработанной поверхности исследовали на растровом двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D LoVac, соединившем в себе последние мировые достижения в области физических методов контроля качества поверхности. Микроскоп позволяет проводить электронномикроскопические исследования состояния рельефа в широком диапазоне увеличений с высокой разрешающей способностью и контрастностью изображения. Поворотный предметный столик позволяет вращать объект в горизонтальной плоскости на 360° и наклонять в вертикальной на угол от -15° до $+90^\circ$ с автоматическим позиционированием анализируемого участка поверхности. Исследование химического состава выполнено на этом же приборе методом локального микрорентгеноспектрального анализа.

Результаты исследований и их обсуждение

Влияние скорости подачи стола V_s и подачи правящего ролика S_p на радиальную P_y и тангенциальную P_z составляющие силы резания показано на рис. 1.

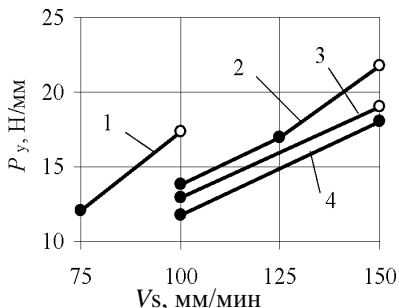


Рисунок 1 – Влияние скорости подачи стола v_s и правящего ролика S_p (указана на графике в мкм/имп) на силу P_y : ● - нет прижога; ○ - прижог

При шлифовании с $V_s=75$ мм/мин, глубиной $t=0,3$ мм и $S_p=1$ мкм/имп шлифовочные прижоги на обработанной поверхности не образуются. С увеличением V_s на 25 мм/мин до 100 мм/мин составляющие силы резания возрастают в среднем в 1,3 - 1,4 раза и на обработанной поверхности после травления обнаружены белые пятна, свидетельствующие о наличии прижогов. С увеличением подачи до 2 мкм/имп на той же V_s силы снижаются более чем на 20 %. После травления обработанной поверхности изменений в структуре не обнаружено.

В связи с тем, что S_p увеличена в два раза, скорость износа круга возросла в такой же пропорции. Режущая способность Q на $V_s = 75$ мм/мин составляет 130 мм³/мин·мм, на $V_s=100$ мм/мин, $Q = 175$ мм³/мин·мм. Коэффициент шлифования $K_{ш}$ на бездефектных режимах снизился на 10 % с 0,29 до 0,26. С целью повышения эксплуатационных показателей скорость стола увеличена до 125 мм/мин. Шлифовочные прижоги на обработанных поверхностях не обнаружены, $Q = 216$ мм³/мин·мм, $K_{ш} = 0,41$.

При увеличении V_s до 150 мм/мин силы P_z и P_y возросли и на обработанной поверхности появились прижоги. Для устранения прижогов увеличили подачу правящего ролика. На $S_p = 3$ мкм/имп интенсивность прижогов снизилась, на $S_p = 4$ мкм/имп прижоги были устранены. $K_{ш}$ на данном режиме в 1,4 раза ниже, чем при $V_s = 125$ мм/мин, а режущая способность возросла всего на 20 %. При шлифовании со скоростью стола 175 мм/мин S_p увеличили до 7 мкм/имп. Но и в этом случае на некоторых образцах обнаружены штриховые прижоги. Прижоги были устранены на $S_p = 8$ мкм/имп.

Оптимальное сочетание производительности и расхода инструмента обеспечивается на режимах $V_s = 125$ мм/мин и $Sp = 2$ мкм/имп, когда $Q = 216$ мм³/мин·мм и $K_{ш} = 0,41$. Снижение на 40 % Q по сравнению с $V_s = 175$ мм/мин компенсируется двукратным сокращением расхода инструмента.

Прижог на обработанной поверхности образуется при достижении некоторого значения силы резания, зависящей от режимов шлифования [5]. Результаты данных исследований так же свидетельствуют о наличии предельного значения силы резания. При этом наблюдается тенденция роста предельного значения силы резания с увеличением скорости подачи стола.

Анализ процесса плоского шлифования необходимо делать с учетом особенностей работы круга на различных этапах, таких как врезание, добор глубины, постоянная длина дуги контакта и выход.

На этапе врезания сила резания изменяется в диапазоне от нуля до своего максимального значения в момент перехода к этапу постоянной длины дуги контакта. По такой же закономерности будет изменяться и нагрузка на кромку круга, то есть радиус кромки будет стремиться к своему минимальному значению в момент, когда подача на правку полностью компенсирует износ круга.

Наиболее нагруженным участком при врезном шлифовании является кромка круга, и износ, который определяли по радиусу образовавшегося закругления кромки, превосходит радиальный износ круга. Поэтому даже при условии обеспечения стабильного рельефа круга, обеспечиваемого непрерывной правкой, износ кромки круга может не компенсироваться правкой, что и происходит на этапе врезания. Рост нагрузки на зерна, и, соответственно, повышенный износ кромки круга являются следствием постоянно увеличивающейся длины дуги контакта и возрастающей силы резания. Скорости правки при подаче 0,3 мкм/об недостаточно для компенсации износа кромки, вследствие чего на этапе врезания радиус закругления кромки возрастает, о чем свидетельствует радиус паза со стороны входа круга.

На этапе выхода с резким падением силы резания снижается нагрузка на инструмент, что приводит к уменьшению износа кромки круга. Скорость износа инструмента в результате постоянной правки начинает превышать скорость износа кромки круга в результате взаимодействия с обрабатываемым материалом, и радиус закругления кромки уменьшается.

С уменьшением зернистости до 16 мкм составляющие силы резания в общем случае возрастают. Например, при шлифовании на $V_s = 125$ мм/мин P_y выше почти в 1,2, а P_z – более чем в 1,3 раза. Различное влияние зернистости на составляющие силы резания приводит к тому, что с уменьшением зернистости изменяется соотношение P_z/P_y . При обработке кругом зернистости Z32 мкм $P_z/P_y = 0,65$, а при зернистости Z16 мкм $P_z/P_y = 0,85$.

Представленные данные позволяют говорить о том, что непрерывная правка оказывает существенное влияние на показатели процесса.

При шлифовании без правки P_z больше P_y , при этом составляющие силы имеют максимальное значение (рис. 2). Постоянная правка, даже при минимальной подаче $S_p=1$ мкм/имп, снижает составляющие силы шлифования в 1,3 - 1,5 раза, в большей степени снижается P_z . С дальнейшим увеличением S_p падение сил замедляется. В диапазоне подач ролика от 1 до 2 мкм/имп силы снижаются на треть, а в интервале от 4 до 6 мкм/имп всего на 5 - 10 %. Так как с увеличением S_p пропорционально возрастает расход инструмента, использование подачи свыше 4 мкм/имп нецелесообразно.

При $S_p = 4$ мкм/имп силы P_y и P_z по сравнению с периодической правкой снизились соответственно в 2,4 и 3,5 раза.

При шлифовании титановых сплавов правка наибольшее влияние оказывает на силу P_z , с ростом S_p изменяется соотношение между составляющими: на $S_p = 0$ мкм/имп $P_z/P_y = 1,16$, с увеличением S_p до 4-6 мкм/имп $P_z/P_y = 0,86 - 0,80$.

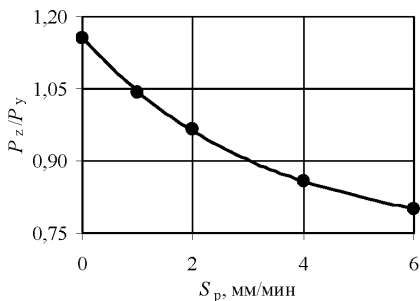


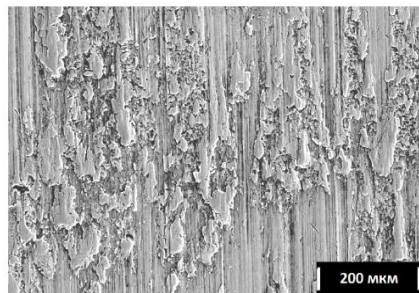
Рисунок 2 – Влияние подачи алмазного ролика S_p на соотношение P_z/P_y

С увеличением глубины шлифования составляющие силы резания также возрастают. Зависимость сил от глубины шлифования аппроксимирована степенной функцией.

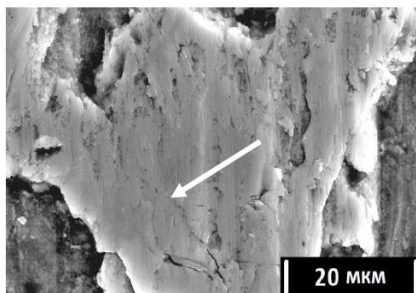
При шлифовании на глубине 0,1 - 0,3 мм дефектов на поверхности образцов не наблюдалось. При шлифовании с глубиной 0,4 мм на образцах обнаружены прижоги в месте контакта заготовок.

Исследования, выполненные на электронном микроскопе Versa 3D, показали, что при шлифовании без правки круга значительная часть обработанной поверхности покрыта слоем неоднородного налипшего металла (рис. 3а). В процессе контакта налипшего металла с вершинами абразивных зерен на его поверхности образуются трещины различных форм (рис. 3б). При наклоне электронной колонны относительно вертикали на угол $\alpha=52^\circ$ при увеличении $\times 50000$ между основной поверхностью и налипшим металлом обнаружена щель с начальным зазором около 1 мкм (рис. 3в).

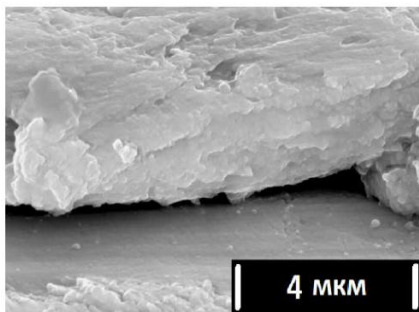
При увеличении $\times 25000$ в месте скола зерен обнаружены включения, поверхность которых может свидетельствовать об их кристаллическом строении (рис. 3г). Результаты микрорентгеноспектрального анализа показали наличие в кристаллах оксида алюминия и углерода, что позволяет считать их кристаллами оксида алюминия.



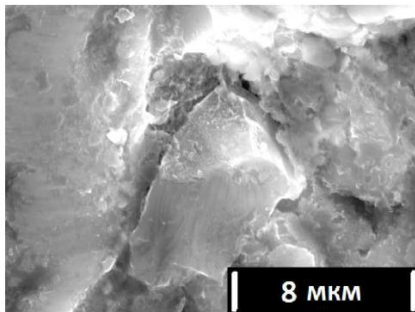
а – $500\times$, $\alpha=0^\circ$



б – $6500\times$, $\alpha=0^\circ$



в – $50000\times$, $\alpha=52^\circ$



г – $25000\times$, $\alpha=0^\circ$

Рисунок 3 – Рельеф обработанной поверхности титанового сплава при шлифовании без постоянной правки круга

При шлифовании с постоянной правкой абразивного инструмента алмазным роликом рельеф обработанной поверхности достаточно чистый, массового налипания металла нет.

Выводы

Образование прижога на обработанной поверхности определяется некоторым предельным значением Pz_{max} и зависит от условий обработки.

Установлено, что предельное значение Pz_{max} возрастает в пропорции приблизительно 3 % на каждые 10 мм/мин роста V_s с увеличением скорости подачи стола; Pz_{max} возрастает в среднем на 35 % с уменьшением зернистости от 32 до 16 мкм.

Определена зависимость отношения сил Pz/P_y от зернистости и увеличения скорости подачи правящего ролика.

При шлифовании без правки круга обработанная поверхность титанового сплава покрыта неоднородным слоем налипшего металла, в отдельных участках которого обнаружены включения, характеризующиеся как кристаллы оксида алюминия.

Список использованных источников литературы 1. Саяутин Г. И., Носенко В. А. Шлифование деталей из сплавов на основе титана. – М.: Машиностроение, 1987. – 80 с. **2.** Силин С.С. Особенности глубинного шлифования титановых сплавов // С.С. Силин, Б.Н. Леонов, В.А. Хрульков, А.В. Лобанов, В.А. Поletaev, Э.Б. Данченко // Вестник машиностроения, 1989, №1. – С. 43-45. **3.** Носенко В.А. Критерий интенсивности взаимодействия обрабатываемого и абразивного материалов при шлифовании / В.А. Носенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2001. – № 5. – С. 85. **4.** Поletaev В.А. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога / В.А. Поletaev, Д.И. Волков. – М.: Машиностроение, 2009. – 272 с. **5.** Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Sayutin G. I., Nosenko V. A. Shlifovanie detaley iz splavov na osnove titana. – М.: Mashinostroenie, 1987. – 80 s. **2.** Silin S.S. Osobennosti glubinnogo shlifovaniya titanovyih splavov // S.S. Silin, B.N. Leonov, V.A. Hrulkov, A.V. Lobanov, V.A. Poletaev, E.B. Danchenko // Vestnik mashinostroeniya, 1989, No 1. S. 43-45. **3.** Nosenko V.A. Kriteriy intensivnosti vzaimodeystviya obrabatyvayemogo i abrazivnogo materialov pri shlifovanii / V.A. Nosenko // Problemyi mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 2001. – No 5. – S. 85. **4.** Poletaev V.A. Glubinnoe shlifovanie lopatok turbin: biblioteka tehnologa / V.A. Poletaev, D.I. Volkov – М.: Mashinostroenie, 2009. – 272 s. **5.** Starkov V.K. Shlifovanie vyisokoporistyimi krugami. – М.: Mashinostroenie, 2007. – 688 s.