

В. И. Лавриненко, д-р техн. наук, М. Н. Шейко, канд. техн. наук,
О. О. Пасичный, канд. техн. наук, А. П. Максименко, Киев, Украина
В. А. Энгель, Николаев, Украина

АЛМАЗНЫЕ ПРЕЦИЗИОННЫЕ ПРАВЯЩИЕ РОЛИКИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ГТД: ЭКСПРЕСС-МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ СИЛ АЛМАЗНОЙ ПРАВКИ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ

Пропонується методика іспитів сложнофасонних прецизійних правлячих роликів за схемою квазіврізного виправлення, що імітує істинно врізну і не потребує дорогого спеціального устаткування, а дозволяє використовувати універсальне. Названа схема одержує обґрунтування як у плані самоподождженості теоретико-експериментальних підходів до вивчення врізного виправлення, так і в плані ефективності використання абразивного матеріалу в модельних експериментах.

The technique of tests of shaped precision ruling rollers not demanding the expensive special equipment is considered. The developed technique has received experimental acknowledgement and will well be co-ordinated with the theoretical approach to process of precision editing.

В турбостроении особое место среди методов финишной абразивной обработки занимает врезное фасонное шлифование, осуществляемое профильными кругами, и являющееся одним из самых перспективных видов высокопроизводительной прецизионной технологии обработки элементов лопаток турбин. Врезное шлифование профильными кругами с использованием алмазных правящих роликов, работающих в условиях периодической или непрерывной правки, обеспечивает обработку с минимальным припуском не только фасонных, но и координатно-связанных между собой поверхностей. При этом прецизионность обработки преимущественно определяется точностью изготовления алмазных правящих роликов.

Институт сверхтвердых материалов НАН Украины плодотворно сотрудничает в этом направлении с государственным предприятием Государственное предприятие Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Заря-Машпроект», разрабатывая и производя прецизионный алмазный правящий инструмент для операций обработки замочных елочных профилей лопаток турбин широкой номенклатуры (рис. 1). На стадии разработки в Институте проводятся экспериментальные работы по доводке и испытаниям своей продукции. В связи с этим актуальной является разработка экспресс-метода испытаний алмазных роликов, поскольку в процессе отработки их конструкции и технологии нанесения алмазно-абразивного слоя возникает необходимость испытаний лабораторных образцов инструмента в условиях, максимально приближенных к производственным. Однако оборудование, реализующее врезную схему правки фасонными роликами, недопустимо дорого и громоздко для эксплуатации в лабораторных условиях.

В настоящей работе предлагается методика испытаний роликов, не требующая дорогостоящего специального оборудования, а позволяющая использовать универсальное. Обосновывается целесообразность предлагаемой методики, предложен новый метод регистрации сил правки и приводятся результаты их исследования на различных режимах резания, а также сравнение их с расчетными данными [1, 2].



Рис. 1 – Прецизионные алмазные правящие ролики с елочным профилем для замочной части лопаток ГТД

Для моделирования врезной правки на круглошлифовальном станке ЗБ151 был модернизирован автономный привод ролика, устанавливаемый на столе станка и обеспечивающий скорость ролика $n_p = 16,4$ м/с, что при скорости круга $n_k = 29$ м/с соответствовало режимам правки, применяемым в производственных условиях.

Экспериментальный ролик Ø140 имел рабочий профиль с цилиндрической калибрующей средней частью и профильные участки, содержащие фрагменты различной кривизны, по обоим краям. Профильные участки имели занижение $Dt = 10$ мкм по отношению к калибровочной части. Ролику по отношению к кругу, помимо вращения, сообщалась осевая возвратно-поступательная подача S с подачей на глубину t_0 на каждый ход стола. Осевая подача S выбиралась из условия

$$S > L, \quad (1)$$

где L – длина профильного участка, что обеспечивало независимый съем абразива каждым фрагментом этого участка, как это происходит при врезной правке без осевых подач. В этом суть квазиврезной правки, имитирующей врезную. Калибрующий участок, идущий следом за профильным, выбирает на круге многозаходную резьбу, образуемую профильным участком. При обратной осевой подаче вступает в работу профильный участок на другом краю ролика, его подача на глубину меньше (на высоту занижения) фактической подачи t_{ϕ} , установившейся для калибровочного

участка. Доля абразивного круга, диспергированная профильным участком и приходящаяся на единицу его длины, составляет

$$\eta = \left(1 - \frac{\Delta f}{f_0}\right) \frac{1}{S} \quad (2)$$

Для сравнения – доля круга, приходящаяся на единицу длины испытываемого участка ролика, при истинно врезной правке составляет $1/H_{кр}$, где $H_{кр}$ – высота круга, что меньше чем (2). С учетом того, что каждый из профильных участков использует половину круга, эффективность использования абразивного материала при испытании ролика на износ при квазиврезной правке выше, чем при истинно врезной в

$$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\Delta f}{f_0}\right) \frac{H_{кр}}{S} \text{ раз.}$$

Подставляя значения $Dt = 10 \cdot 10^{-3}$ мм, $t_0 = 20 \cdot 10^{-3}$ мм, $H_{кр} = 63$ мм, $S = 1,38$ мм, получаем преимущество в 11,4 раза, то есть в 11,4 раза более эффективно используется диспергируемый круг.

В серии экспериментов для регистрации сил резания правился круг Ø600 марки 24A25CM1K5 при указанных скоростях ролика и круга и подачах $t_0 = 0,020 \dots 0,030$ мм, $S = 1,38$ мм ($U = 26$ мм/с). Кроме того, направление вращения ролика изменялось, осуществляя встречную ($q = -1,77$, где $q = n_r/n_p$) и попутную ($q = +1,77$) правку. Условное напряжение резания-царапания абразива круга указанной марки составляло [3]:

$$\sigma_{\text{рез}} = 237 \left\{ 0,20 \exp \left\{ -0,173 \left(v_{\text{рез}} - 15 \right) \right\} + 0,80 \right\}, \text{ Н/мм}^2,$$

где $n_{\text{рез}}$ – скорость резания, м/с. Характеристики рабочего слоя калибрующего пояса, вносящего исключительный вклад в суммарную силу правки, были следующие: алмазный порошок AC125T 630/500, $n_c = 2,4 \text{ мм}^{-2}$, $a = 1,587$, $b = 0,5$, $h_{\text{пс}} = 0 \dots 0,02$ [4].

Идея регистрации сил правки заключалась в регистрации падения частоты вращения вала асинхронного электродвигателя автономного привода ролика. Как известно [5], механическая характеристика асинхронного двигателя, то есть зависимость крутящего момента M на валу от скольжения s двигателя описывается выражением

$$M = \frac{2M_{\text{к}}}{\frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s}}, \quad (3)$$

где $M_{\text{к}}$ – максимальный момент двигателя, $s_{\text{к}}$ – критическое скольжение. Откуда зависимость мощности от скольжения

$$N = M\omega = \frac{2M_{\text{к}}}{\frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s}} \omega_0 (1-s)$$

где ω – угловая скорость, ω_0 – синхронная угловая скорость двигателя. При малых абсолютных значениях s , меньших значения номинального скольжения $s_{\text{ном}}$, мощность линейна скольжению

$$N = \frac{2M_{\text{к}}\omega_0}{s_{\text{к}}} s. \quad (4)$$

Поэтому легко рассчитать мощность, снимаемую с вала (расходуемую на резание и потери в приводе ролика) и приходящуюся на единицу падения частоты вращения двигателя n , мин⁻¹. С учетом $s = 1 - n/n_0$, $n_0 = 60\omega_0/2\pi$ имеем

$$\left| \frac{\Delta N}{\Delta n} \right| = \frac{\Delta N}{\Delta s} \left| \frac{\Delta s}{\Delta n} \right| = \frac{2M_{\text{к}}\omega_0}{s_{\text{к}}} \frac{1}{n_0} = \frac{\pi}{15} \frac{M_{\text{к}}}{s_{\text{к}}}.$$

Подставляя в последнем выражении $M_{\text{к}} = |M_{\text{ном}}|$ и $s_{\text{к}} = \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) s_{\text{ном}}$ [5], где $M_{\text{ном}}$ и $s_{\text{ном}}$ – номинальный момент и скольжение двигателя соответственно, окончательно имеем

$$\left| \frac{\Delta N}{\Delta n} \right| = \frac{\pi}{15} \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \lambda^2}} \frac{M_{\text{ном}}}{s_{\text{ном}}}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{об/мин}} \quad (5)$$

В нашем случае номинальная мощность и обороты двигателя $N_{\text{ном}} = 1,1 \text{ кВт}$ и $n_{\text{ном}} = 940 \text{ об/мин}$ соответственно,

чему отвечают значения $M_{\text{ном}} = \frac{60 \cdot 1100}{2\pi \cdot 940} = 11,17 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и $s_{\text{ном}} = 1 - \frac{940}{1000} = 0,06$. Кратность максимального момента для данного

класса двигателей лежит в пределах $\lambda = 2,3 \dots 3,4$. Для этих значений получаем $\left| \frac{\Delta N}{\Delta n} \right| = 19,9 \dots 20,5 \frac{\text{Вт}}{\text{об/мин}}$ и принимаем $20 \frac{\text{Вт}}{\text{об/мин}}$.

Силовые и энергетические расчеты плоскоременной передачи производились в соответствии с [6]. Существенное отличие схем нагружения привода при двух видах правки заключалось в том, что при встречной правке ведомый шкив (что на валу ролика) дополнительно нагружался моментом сил правки, направленным противоположно вращению. При этом ведущая ветвь ремня получала большую нагрузку, но направление передачи энергии (от шкива двигателя к шкиву ролика) не менялось. При попутной же правке шкив ролика нагружался моментом, сонаправленным с вращением, ведущая и ведомая ветви ремня менялись ролями, а направление передачи энергии менялось на

противоположное – от шкива ролика к шкиву двигателя. Это означало, что составлении мощностного баланса при встречной правке мощность резания (более точно – мощность сил резания на валу ролика) N_p меньше величины приращения мощности на валу двигателя DN на величину потерь в ременной передаче:

$$N_p = h \cdot DN. \quad (6)$$

При попутной правке, наоборот, часть мощности резания теряется в ременной передаче на пути к двигателю:

$$N_p = \frac{|\Delta N|}{\eta}, \quad (7)$$

где приращение мощности на валу DN – отрицательная величина.

Таким образом, выше представлена методическая часть перехода от зарегистрированной величины изменения частоты вращения двигателя к мощности резания при правке. Графическое изображение этой функции *время-число оборотов* во время правки представлено на рис. 2.

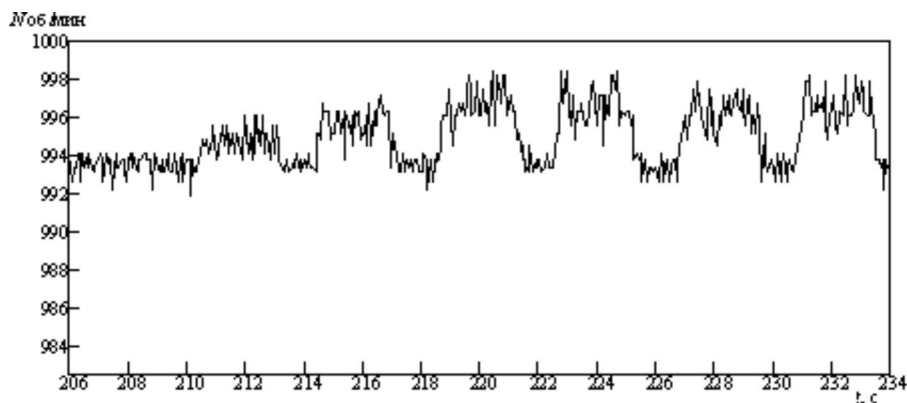


Рис 2 – Экспериментальный график *время-число оборотов* вала ведущего двигателя

Результаты обработки экспериментальных данных следующие. При встречной правке зафиксировано падение частоты вращения вала двигателя от частоты вращения на холостом ходу (с присоединенным приводом) до рабочей частоты (при максимальных установившихся силах резания): $|Dn|=994-990=4$ об/мин. Соответствующее приращение

мощности на валу $\Delta N = 20 \frac{\text{Вт}}{\text{об/мин}} \cdot 4 \text{ об/мин} = 80 \text{ Вт}$ и мощность резания (по формуле (6)) $N_p = 0,780 \text{ Вт} = 56 \text{ Вт}$.

При попутной правке приращение частоты вращения вала двигателя от холостого хода до рабочей частоты

$Dn = 998-993=5$ об/мин, падение мощности на валу $|\Delta N| = 20 \frac{\text{Вт}}{\text{об/мин}} \cdot 5 \text{ об/мин} = 100 \text{ Вт}$, мощность резания (по (7)) $N_p = 100 \text{ Вт} / 0,3 = 333 \text{ Вт}$.

Кроме того, экспериментально установлено: наступление установившегося режима, когда силы резания достигают максимального значения, происходит не сразу – только за три касания инструмента (три продольных прохода) (см. рис. 2).

Теоретические представления о квазиврезной правке как частном случае алмазно-абразивной обработке базируются на механико-статистическом подходе к рассмотрению данных процессов. При правке по такой схеме механизм накопление неудаленного припуска за ряд последовательных осевых проходов по существу такой же, как и при врезной правке алмазными брусками [7]. В нашем случае, при наличии осевой подачи S , длина H_p разбивается на $\text{int}(H_p/S)$ участков, имеющих различную степень нагрузки, условия работы каждого определяются параметрами; $m=0,1,\dots,m_{\max}$, где $m_{\max}=\text{int}(H_p/S)-1$. В нашем случае $m_{\max}=4$. За каждый k -тый проход любая точка заправляемого круга

$$\frac{dT^k}{d\ell}$$

подвергается контактированию со всеми участками, причем съем за проход $\frac{dT^k}{d\ell}$ и фактическая подача на глубину t_ϕ [7], как показывают расчеты, стабилизируются лишь к 3-му проходу.

В соответствии с установившимся значением t_ϕ рассчитывались нагрузка каждого из 5-ти участков ролика (таблица). Суммируя тангенциальные составляющие сил резания на всех участках, получены искомые силы правки.

Таблица 1 – Тангенциальные составляющие сил резания, по участкам правящего ролика

M	Встречная правка		Попутная правка	
	Тангенциальная составляющая сил правки		Тангенциальная составляющая силы правки	
	на единицу ширины контакта $\frac{1}{\delta} T_{\Sigma}, \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$	на m -том участке $T_m, \text{Н}$	на единицу ширины контакта $\frac{1}{\delta} T_{\Sigma}, \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$	на m -том участке $T_m, \text{Н}$
0	2,120	2,93	6,45	8,90
1	0,531	0,733	3,75	5,18
2	0,202	0,279	2,28	3,15
3	0,102	0,141	1,464	2,02
4	0,0614	0,085	0,986	1,36

		$\Sigma 4,16$ ($P_z=4,16H$)	$\Sigma 20,6$ ($P_z=20,6H$)
--	--	----------------------------------	----------------------------------

Соответствующие мощности встречной и попутной правки $N_p=4,16 \text{ Н} \cdot 16,4 \text{ м/с}=68 \text{ Вт}$ и $N_p=20,6 \text{ Н} \cdot 16,4 \text{ м/с}=338 \text{ Вт}$. Указанные цифры свидетельствуют: расчеты, базирующиеся на механико-статистическом подходе к описанию алмазно-абразивной обработке, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Таким образом, предлагаемая схема квазиврезной правки получила в работе обоснование в плане самосогласованности теоретико-экспериментальных подходов к изучению врезной правки и в плане эффективности использования стандартного оборудования и абразивного материала в модельных экспериментах.

Благодаря совместной с «Заря-Машпроект» научно-поисковой работе, в том числе, проведению экспериментальных работ, описанных выше, институт может гарантировать высокую точность изготовления методом гальванопластики правящих роликов (допуск радиального биения – до 5 мкм, торцевого – до 3 мкм) и качество обрабатываемой поверхности — $Ra=0,63$. Оптимальный выбор зернистости и марки алмазных порошков обеспечивает повышенную стойкость и приемлемую цену правящего инструмента.

В данном направлении Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины успешно сотрудничает и изготавливает алмазные прецизионные правящие ролики не только с ГП НПКГ «Заря-Машпроект», но и с рядом российских предприятий: ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение» (г. Казань), ОАО «Специальное конструкторское бюро турбонагнетателей» (г. Пенза), ОАО «Моторостроитель» (г. Самара).

Список литературы: 1. *Шейко М. Н.* Динамика съема припуска при шлифовании периферией круга на стадии врезания и выхаживания: фактор инструмента и режима обработки // Сверхтвердые материалы. – 1994. – № 4. – С. 52–57. 2. *Шейко М. Н.* Сила шлифования в свете теоретико-вероятностных представлений о процессе // Современные процессы механической обработки и качество поверхностей деталей машин: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ НАН Украины, 1998. — 198 с. — С. 172 —175. 3. *Полупан Б.И., Байкалов А.К.* Силы резания при правке абразивных кругов алмазным зерном // Синтетические алмазы. – 1978. – Вып. 3. – с. 58–61. 4. Микроскопические характеристики поверхностного слоя правящего ролика и способы их измерений / М. Н. Шейко; Редкол. журн. «Сверхтвердые материалы» АН УССР, АН Украины. – Киев, 1991. – 12 с. ил. – Библиогр. 9 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 18.07.91, № 3074–В91. 5. *Чиликин М.Г. Сандер А.С.* Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с. 6. Основы конструирования и детали машин. Глава 14. Ременные передачи. – МГТУ им. Н. Э. Баумана. Кафедра РК-3. 7. *Шейко М. Н., Максименко А.П.* Врезная правка алмазными брусками в свете механико-статистических представлений об абразивно-алмазной обработке. Установившаяся фактическая подача на глубину при многократных проходах // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 4. – С. 86–91.

Поступила в редколлегию 15.06.2009