

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК

Кленов О.С., Новиков Ф.В., докт. техн. наук
(Харьковский национальный экономический университет)

Повышение долговечности турбинных лопаток является актуальной задачей турбо- и двигателестроения. В значительной степени это относится к этапу изготовления лопаток, когда требуется технологически воплотить в жизнь все новые технические решения, заложенные в конструкции лопатки. Однако, как правило, реализовать их в “металле” весьма сложно. Это связано с необходимостью качественного изготовления лопатки и, в первую очередь, с качеством механической обработки. Несоответствие параметров точности и шероховатости обработки требованиям чертежа, а также наличие на обрабатываемых поверхностях прижогов и скрытых температурных дефектов (например, растягивающих напряжений в поверхностном слое) резко снижает эксплуатационные свойства турбинных лопаток [1]. Поэтому к качеству обработки поверхностей турбинных лопаток предъявляются высокие требования, обеспечить которые можно применением новых эффективных технологий механической обработки.

Важной проблемой при изготовлении лопатки является обработка елочного замка. Традиционно она осуществляется фрезерованием. Однако в последние годы доказана эффективность обработки с применением глубинного шлифования. В связи с этим целью работы является повышение надежности изготовления турбинных лопаток на основе разработки и применения эффективной технологии глубинного шлифования елочного замка.

Как известно, глубинное шлифование осуществляется с высокой производительностью обработки и характеризуется интенсивным тепловыделением в зоне резания [2,3]. Поэтому важно выбрать оптимальные характеристики шлифовальных кругов. С этой целью были проведены экспериментальные исследования на операциях глубинного шлифования елочных замков лопаток с применением новых высокопористых абразивных кругов производства совместной американско-польской фирмы “Saint – Gobain Abrasives”:

NORTON 1 500x32x203 9A80F25VCF2-35;

BAY STATE 1 500x32x203 9A80F12V98-35;

BAY STATE 1 500x32x203 5A80G12VHY-35.

Данные круги сравнивались с используемыми на данных операциях шлифовальными кругами 1 500x32x203 25А 10П ВМ1 12К5 КФ40 производства ОАО “Абразивы и шлифование” (г. Санкт-Петербург). Необходимо отметить, что к замкам елочного профиля лопаток предъявляются следующие технические требования: шероховатость поверхностей – $R_a \leq 1,25$ мкм; допуск на размеры замка по роликам – 0,08

мм; разность размеров по роликам – не более 0,02 мм; взаимное смещение продольных образующих одной гребенки относительно другой в плоскостях, параллельных плоскости симметрии – не более 0,02 мм; перекося рабочих поверхностей зубьев одной гребенки относительно другой в пределах допуска на шаг $\pm 0,01$ мм. Материал лопаток – жаропрочный сплав на никелевой основе марки ЧС88У-ВИ. Обработка замка лопаток производилась на шлифовальном полуавтомате с ЧПУ модели ЛШ-220. Каждым кругом было отшлифовано по 5 лопаток. Припуск на шлифование – 4 мм.

Испытание круга NORTON 1 500x32x203 9A80F25VCF2-35 первоначально провели на технологическом режиме шлифования по проходам (согласно технологического процесса):

1. $V_{кр} = 26$ м/с; $V_{дет} = 50$ мм/мин; $t = 3,3$ мм; $Q = 700$ мкм.
2. $V_{кр} = 26$ м/с; $V_{дет} = 60$ мм/мин; $t = 0,4$ мм; $Q = 300$ мкм.
3. $V_{кр} = 22$ м/с; $V_{дет} = 60$ мм/мин; $t = 0,2$ мм; $Q = 100$ мкм.
4. $V_{кр} = 20$ м/с; $V_{дет} = 80$ мм/мин; $t = 0,1$ мм; $Q = 0$ мкм.

Здесь и далее $V_{кр}$ – окружная скорость круга, м/с; $V_{дет}$ – продольная подача детали, мм/мин; t – глубина шлифования, мм; Q – расстояние круга до готового размера детали, мкм.

Режим правки круга алмазным роликом: число оборотов ролика – 1433 об/мин; подача ролика на врезание – 1 мкм на 10 оборотов круга; схема правки – непрерывная в процессе правки. При шлифовании серийными кругами 1 500x32x203 25A 10П ВМ1 12К5 КФ40 подача ролика на врезание – 2 мкм на 10 оборотов круга. Шлифование и правку круга проводили с охлаждением 25-м раствором эмульсола “Аквол-2”, применяемым серийно на станке ЛШ-220.

При проведении дальнейших испытаний кругов NORTON и BAY STATE режим шлифования по проходам был увеличен:

1. $V_{кр} = 26$ м/с; $V_{дет} = 60$ мм/мин; $t = 3,3$ мм; $Q = 700$ мкм.
2. $V_{кр} = 26$ м/с; $V_{дет} = 80$ мм/мин; $t = 0,4$ мм; $Q = 300$ мкм.
3. $V_{кр} = 22$ м/с; $V_{дет} = 100$ мм/мин; $t = 0,2$ мм; $Q = 100$ мкм.
4. $V_{кр} = 20$ м/с; $V_{дет} = 120$ мм/мин; $t = 0,1$ мм; $Q = 0$ мкм.

Таблица 1

Максимальные значения силы тока I_{max} для двух рассматриваемых режимов шлифования по проходам

Технологический режим шлифования по проходам	Сила тока I_{max} , А		Увеличенный режим шлифования по проходам	Сила тока I_{max} , А	
	Корыто	Спинка		Корыто	Спинка
1	28	24	1	36	32
2	19	18	2	24	22
3	18	18	3	21	20
4	12	11	4	16	15

Примечание: номинальный ток электродвигателя шлифовального круга – 46А.

В табл. 1 приведены максимальные значения силы тока I_{max} электропривода шлифовального круга при работе на технологическом и увеличенных режимах. Как видно, ужесточение режима шлифования не приводит к существенному увеличению силы тока.

В процессе проведения испытаний было исследовано влияние характеристики шлифовальных кругов и увеличенных режимов шлифования на стабильность размеров станка по роликам и шероховатость шлифованных поверхностей, на возможность появления прижогов и трещин шлифованных поверхностей елочных замков лопаток.

Стабильность размеров замка по роликам контролировали измерением микрометром с ценой деления 0,01 мм. Измерения показали, что при шлифовании кругами выше перечисленных характеристик на всех исследованных режимах обеспечивается стабильность размеров замка по роликам в пределах 0,01–0,02 мм, что соответствует техническим требованиям чертежа лопатки.

Шероховатость шлифованных поверхностей измеряли профилометром фирмы Кьер-Брюэль (Дания).

Прижоги определялись визуально контролем при 2-х кратном увеличении по наличию цветов побежалости на шлифованных поверхностях замка лопаток. Контроль наличия или отсутствия трещин на шлифованных поверхностях замка лопаток проводили методом ЛЮМ-А дважды: сразу после шлифования; после проведения термической обработки (отжига) в вакууме при температуре 1200⁰С в течение 2-х часов.

В качестве изменяемых элементов режима шлифования замков лопаток были выбраны окружная скорость и продольная подача детали; глубина шлифования по проходам (кроме первого) практически оставалась без изменений. Колебание глубины шлифования на первом проходе, о чем можно судить по силе тока, связано с изменением величины общего припуска на обработку после выполнения операции фрезерования клина замка.

В табл. 2 приведены данные о влиянии характеристик кругов и режимов шлифования на шероховатость обработки и наличие прижогов шлифованных поверхностей замка лопаток. Как следует из табл. 2, круги BAY STATE G12 (более твердые, чем F12) дают прижоги даже на благоприятных, исходя из теории теплофизики, режимах шлифования: снижение окружной скорости круга до 20 м/с приводит к уменьшению мощности теплового источника (пятна контакта круга с деталью); увеличение продольной подачи детали до 120 мм/мин (в 1,5 раза) снижает количество тепла, переходящего в деталь, и опасность появления прижогов и трещин шлифованных поверхностей; при этом количество тепла, уносимого стружкой, возрастает в 2 – 2,5 раза [4]. Увеличение окружной скорости круга NORTON F25 до 30 м/с повысило шероховатость шлифованных поверхностей замка до $R_a = 1,25–1,40$ мкм, что связано с высокочастотной вибрацией круга. Глубинное шлифование замков лопаток на режиме $V_{кр} = 20$

м/с; $V_{дет} = 120$ мм/мин обеспечивает требуемые шероховатость $R_a \leq 1,25$ мкм и качество шлифованных поверхностей (без прижогов).

Требуемые шероховатость $R_a \leq 1,25$ мкм и качество шлифованных поверхностей (без прижогов) достигаются кругами BAY STATE F12 на уменьшенном по сравнению с кругами NORTON F25 режиме шлифования $V_{кр} = 20$ м/с; $V_{дет} = 100$ мм/мин.

Таблица 2

Данные о шероховатости обработки и наличии прижогов
шлифованных поверхностей замка лопаток

Номера лопаток	Обозначение круга	Режим шлифования	R_a , мкм	Наличие прижогов
5	NORTON F25	$V_{кр} = 20$ м/с; $V_{дет} = 80$ мм/мин	1,20–1,30	Прижогов нет
11	NORTON F25	$V_{кр} = 20$ м/с; $V_{дет} = 120$ мм/мин	1,0–1,25	Прижогов нет
36	NORTON F25	$V_{кр} = 26$ м/с; $V_{дет} = 120$ мм/мин	1,0–1,20	Прижогов нет
37	NORTON F25	$V_{кр} = 30$ м/с; $V_{дет} = 120$ мм/мин	1,25–1,40	Прижогов нет
39К	BAY STATE F12	$V_{кр} = 20$ м/с; $V_{дет} = 80$ мм/мин	1,10–1,25	Прижоги
38С	BAY STATE F12	$V_{кр} = 20$ м/с; $V_{дет} = 100$ мм/мин	1,0–1,25	Прижогов нет
18	BAY STATE F12	$V_{кр} = 20$ м/с; $V_{дет} = 120$ мм/мин	1,20–1,40	Прижогов нет
39С	BAY STATE F12	$V_{кр} = 20$ м/с; $V_{дет} = 120$ мм/мин	1,20–1,40	Прижогов нет
38К	BAY STATE F12	$V_{кр} = 22$ м/с; $V_{дет} = 100$ мм/мин	1,25–1,40	Прижогов нет
33	BAY STATE G12	$V_{кр} = 20$ м/с; $V_{дет} = 120$ мм/мин	0,90–1,10	Прижоги

Здесь: К – поверхность замка со стороны корыта лопатки;

С – поверхность замка со стороны спинки лопатки.

Таким образом, глубинное шлифование елочных замков лопаток высокопористыми абразивными кругами NORTON 1 500x32x203 9A80F25VCF2-35 на увеличенном по сравнению с применявшимся ранее режиме шлифования обеспечивает все технические требования, предъявляемые чертежом лопатки к елочным замкам, в том числе: шероховатость поверхности $R_a \leq 1,25$ мкм; стабильность размеров замка по роликам в пределах 0,01–0,02 мм; полное отсутствие прижогов и трещин шлифованных поверхностей.

Испытанные круги по сравнению с серийными кругами 1 500x32x203 25А 10П ВМ1 12К5 КФ40 производства ОАО “Абразивы и шлифование” (г. Санкт-Петербург) позволили увеличить производительность шлифования на 25–30%; повысить стойкость кругов в 2,4 раза; снизить потребление электроэнергии на 10–15%.

Список литературы

1. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с.

2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 2. "Теплофизика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2003. – 625 с.

3. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Якимов А.А. Высокопроизводительная обработка абразивно-алмазными инструментами. – К.: Техніка, 1993. –152 с.

4. Скрябин В.А., Жук А.П., Репин А.С. Факторы, влияющие на процессы теплообразования и теплообмена при глубинном шлифовании елочного профиля лопаток турбокомпрессоров. – Машиностроитель, 2006, №10, с. 40-41.