

УДК 621.923

DOI: 10.12737/article_5a313b63e48ae6.71957852

В.А. Полетаев, д.т.н.

(ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»,
Россия, Ярославская область, 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д.53),

Е.В. Цветков, к.т.н.

(ОАО «НПО «Сатурн»,
Россия, Ярославская область, 152903, г. Рыбинск, пр. Ленина, д.163)

E-mail: poletaev@rsatu.ru

Качество поверхностного слоя лопаток компрессоров из титана при многокоординатном глубинном шлифовании

Изложены результаты исследования влияния технологических условий при многокоординатном глубинном шлифовании на качество поверхностного слоя лопаток компрессоров ГТД из титановых сплавов. Установлено влияние режимов шлифования на поверхность и величину остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток, а также условия возникновения дефектов в виде прижогов на обрабатываемых поверхностях лопаток.

Ключевые слова: глубинное шлифование; лопатки компрессора; остаточные напряжения; титановые сплавы.

V.A. Poletaev, D. Eng.

(FSBEI HE "Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk",
53, Pushkin Str., Rybinsk, 152934, Yaroslavl region, Russia)

E.V. Tsvetkov, Can. Eng.

(PC "SPC "Saturn", 163, Lenin Avenue, Rybinsk, 152903, Yaroslavl region, Russia)

Surface layer quality in compressor titanium blades at multiaxes deep grinding

The investigation results of technological conditions impact at multiaxes deep grinding upon quality of titanium alloy blade surface layer in the compressors of gas turbine engines (GTE) are presented. The grinding mode impact upon a surface and a value of residual stresses in a surface layer of blades is defined and also conditions for defect occurrence as burns on blade surfaces under machining are detected.

Keywords: deep grinding; compressor blades; residual stresses; titanium alloys.

Глубинное шлифование лопаток ГТД является наиболее производительным способом механической обработки данных деталей. На операциях шлифования хвостовиков, бандажных полок, лабиринтов и других профильных поверхностей лопаток турбин из жаропрочных никелевых сплавов данный вид обработки является единственно возможным, так как обес-

печивает высокую геометрическую точность формы обрабатываемой поверхности, требуемую шероховатость, величину и благоприятное распределение остаточных напряжений [1, 2].

Технологические схемы обработки лопаток турбин, процессы глубинного шлифования деталей жаропрочных титановых сплавов дос-

таточно хорошо изучены, для их обработки разработано специальное технологическое оборудование, высокопористый абразивный режущий инструмент [3].

Вместе с тем большая часть лопаток ГТД изготавливается из титановых сплавов, в первую очередь это относится к лопаткам компрессоров, входных устройств ГТД, а также к узлам двигателей, работающим в условиях низких температур и агрессивной внешней воздушной среде.

Титановые сплавы по удельной прочности превосходят все иные технические материалы. Они теплоустойчивы, коррозионностойкие на воздухе и в морской воде, в кислотах и щелочах. Благодаря этому они нашли большое применение в производстве ГТД. Однако преобладающими способами их обработки до настоящего времени являются методы лезвийной обработки (точение и фрезерование). Процессы шлифования титановых лопаток применяются в ограниченных объемах, чаще всего при суперфинише деталей, полировании.

Это обусловлено характерными особенностями титановых сплавов, в том числе низкой теплопроводностью, которая у титана меньше чем у никеля в 4 раза, железа в 5 раз и алюминия в 13 - 16 раз. Низкая теплопроводность способствует большому тепловыделению в зоне обработки и является основным фактором, влияющим на обработку резанием. Низкий модуль упругости титановых сплавов обуславливает при обработке их резанием возникновение значительного упругого последствия.

Также одной из особенностей титановых сплавов является, то, что они обладают высокой химической активностью, увеличивающейся при повышении температуры, что создает предпосылки протекания химических реакций титана со средой и абразивами при шлифовании.

В результате реакций могут образовываться нитриды, карбиды и прочие твердые соединения, увеличивающие сопротивление микрорезанию титановых сплавов и силу шлифования. В результате образования продуктов реакций на поверхности трения титанового сплава с абразивом происходит увеличение микротвердости сплава в 2,0...3,3 раза, в то время как у никеля в 1,1...1,5 раза.

Увеличение микротвердости обрабатываемых материалов приводит к увеличению сопротивления микрорезанию. Физико-химические явления на границе контакта абразив-

материал способствуют прилипанию частиц металла к зернам круга, что также ухудшает показатели процесса шлифования.

Более того обработка лопаток компрессоров наиболее эффективна в условиях автоматизированного производства, т.е. в условиях многокоординатной обработки всех поверхностей наружного контура детали осуществляемых в условиях одной системы координат [3].

Однако многокоординатная обработка наружного контура лопатки существенно осложняет реализацию процесса глубинного шлифования, негативно влияет на напряжённое состояние обрабатываемой поверхности. Это обусловлено тем, что в условиях многокоординатных перемещений инструмента и детали постоянно чередуются направления рабочих подач (встречные и попутные); изменяется форма и кривизна обрабатываемой поверхности (выпуклая, вогнутая, плоская); обрабатываются полузакрытые поверхности, где шлифование ведётся одновременно цилиндрической и торцевой поверхностью шлифовального круга; постоянно изменяются условия проникновения охлаждающей жидкости в зону шлифования.

Таким образом, факторы, присущие многокоординатному шлифованию лопаток турбин, существенным образом влияют на реализацию процесса шлифования, приводят к существенному росту сил и температур резания в зоне контакта круга с деталью, что, в конечном счете, отягощает напряженное состояние поверхности обрабатываемых деталей.

При этом напряженное состояние обрабатываемой поверхности формируется в результате чрезвычайно неоднородных упругопластических деформаций под действием сил резания и изменяющегося температурного поля, существующего в условиях интенсивного теплообмена на поверхности детали. В поверхностных слоях обрабатываемых поверхностей происходят структурные изменения. Неустойчивое состояние процесса шлифования приводит к мгновенным всплескам температуры и значительным изменениям напряжённого состояния, отражающихся в локальных прижогах на поверхности детали и даже в возникновении микротрещин.

Требуются специальные исследования качества поверхностного слоя лопаток компрессоров из титановых сплавов, формируемого в условиях профильного скоростного глубинного шлифования кругами из сверхтвёрдых материалов, в частности кругами из кубического нитрида бора (CBN).

Исследования проводились на ПАО «Сатурн», в условиях серийного производства лопаток компрессоров при шлифовании образцов хвостовиков лопаток из титанового сплава TA6V, аналогично отечественному сплаву BT20.

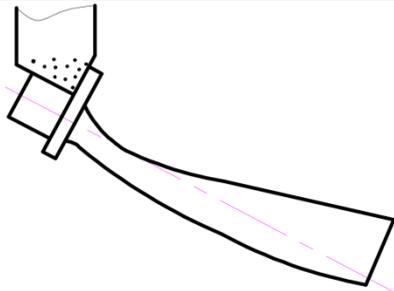
При исследованиях использовалась одна и та же схема врезного профильного шлифования плоской поверхности замка хвостовика и цилиндрической поверхности его полки. Длина шлифования на каждом образце составляла 130 мм. Шлифование осуществлялось кругом из кубического нитрида бора следующей характеристики: J10A-20016/5-181-VR150J/C-76. Шлифование осуществлялось на многоцелевом центре мод. SXS-512 при подаче охлажда-

ющей жидкости под давлением 10 бар. В ходе шлифования варьировались следующие режимы обработки: скорость круга v_k : 30, 50, 70 м/с; скорость детали v_d : 100, 300, 600 мм/мин; глубина шлифования t : 0,1; 0,5; 1,0; 1,5 мм; направление подачи: встречная, попутная.

По результатам испытаний проводились измерения величины остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ и параметра шероховатости Ra . Величина остаточных напряжений измерялась методом дифракции рентгеновских лучей с помощью дифрактометра XSTRESS 3000 σ_3 .

Условия эксперимента и его результаты приведены в табл.1.

1. Условия эксперимента и его результаты

Схема обработки	Направление подачи	Скорость круга v_k , м/с	Скорость детали v_d , мм/мин	Глубина шлифования t , мм	Шероховатость Ra , мкм	Остаточное напряжение $\sigma_{ост}$, МПа
	встречная	30	100	1,5	1,37	-380
	попутная	30			1,21	-280
	встречная	50			0,95	-390
	попутная	50			0,87	-230
	встречная	70			0,76	-320
	попутная	70			0,64	-150
	попутная	50	600	1,0	0,435	-80
	попутная	50	300	0,5	0,51	-400
	попутная	50	100	1,0	0,67	-110

На каждом из 9-ти сочетаний режимов шлифовалось по пять образцов. Средние показатели качества поверхностного слоя для каждого из сочетаний режимов занесены в табл.1.

Анализ представленных результатов показывает, что при всех сочетаниях режимов шлифования в поверхностном слое детали формируются остаточные напряжения сжатия. При этом с ростом скорости круга v_k величина напряжений и шероховатость уменьшается тем интенсивнее, чем выше скорость круга.

При сравнении направлений подачи детали неоспоримое преимущество имеет попутное шлифование, о чем свидетельствуют меньшие значения шероховатости при прочих равных условиях. С увеличением интенсивности обработки, ростом глубины и скорости показатели качества ухудшаются. Однако наиболее чувствителен процесс шлифования к изменению скорости круга v_k .

На рис. 1 представлены усредненные эпюры распределения остаточных напряжений. Здесь каждая эпюра по порядку соответствует сочетанию режимов шлифования, приведён-

ных в табл. 1.

Анализ приведенных эпюр распределения остаточных напряжений показывает, что наиболее благоприятные величины и распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя детали наблюдаются при шлифовании с попутной подачей при величине непрерывной правки порядка 1,0 мкм/об. круга. Уменьшение величины правки до величины порядка 0,2 мкм/об. круга приводит к резкому росту величины остаточных напряжений, что еще более усугубляется при использовании шлифования с встречной подачей.

Изменение направления подачи с попутной на встречную и уменьшение величины правки являются наиболее значительными факторами, влияющими на неблагоприятное распределение остаточных напряжений по сравнению с глубиной шлифования t и скоростью детали v_d . Увеличение этих параметров (v_d и t) также интенсифицирует процесс шлифования, приводит к росту остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ и увеличению глубины u их распределения в поверхностном слое, однако их влияние на

величину $\sigma_{ост}$ менее значимо, чем направление | подачи детали и величина правки круга S_p .

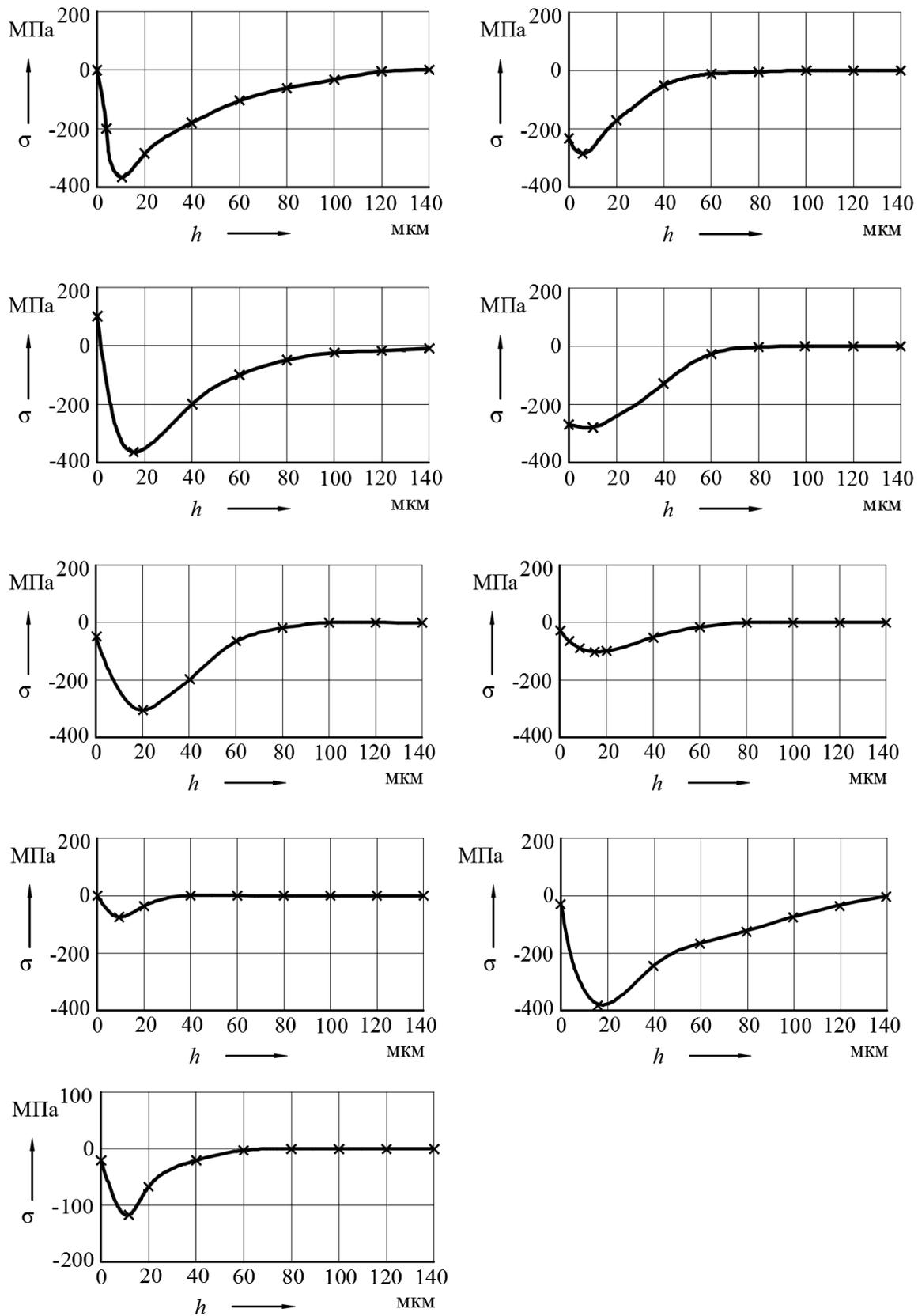


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ по глубине поверхностного слоя h в зависимости от скорости детали v_d , глубины шлифования t скорости правки S_p и направления подачи (табл. 1)

Проведенные исследования позволяют сделать однозначный вывод о преимуществах шлифования с попутной подачей при непрерывной правке круга со скоростью подачи 0,8...1,0 мкм/об. круга. При соблюдении этих двух условий процессы глубинного шлифования лопаток компрессоров из титановых сплавов наиболее устойчивы в пределах возможных вариаций режимов шлифования, соответствующих условиям бездефектного шлифования.

Анализ шероховатости поверхности лопаток, обработанных на приведенных выше сочетаниях режимов показывает, что высота микронеровностей в большей мере зависит от скорости круга v_k , чем от остальных режимов (скорости детали, глубины шлифования и направления подачи). Причем при скорости круга до 30 м/с высота микронеровностей достигает наибольших значений ($Ra > 1,37$ мкм), а характер рельефа «вытянут» в направлении вращения инструмента. При повышении скорости круга $v_k > 30$ м/с высота микронеровностей значительно меньше, так при $v_k = 70$ м/с величина Ra не превышает 0,76 мкм. (Значения параметра шероховатости Ra , полученные в ходе исследований, приведены в табл. 1).

В целом значения параметра шероховатости Ra поверхностей лопаток компрессоров из титановых сплавов, полученные при глубинном шлифовании кругами из CBN, соответствуют требованиям предъявляемым к данным деталям.

Микроструктура поверхностного слоя лопаток на всех образцах, кроме тех, что получены при скорости круга $v_k = 70$ м/с соответствует эталонам (фото) требуемого поверхностного слоя лопаток. Измененный слой отсутствует. Микроструктура поверхностей лопаток при скорости $v_k = 70$ м/с; $t = 1,5$ мм; $v_d = 100$ мм/мин, при попутном и встречном направлении подачи имеет измененную структуру, соответствующую микроструктуре перегрева поверхности. Глубина измененного слоя не превышает 20 мкм. При удалении от поверхности вглубь детали микроструктура сплава ТА6 соответствует эталонам. То есть данные сочетания режимов возможно использовать только при предварительном шлифовании деталей, в дальнейшем они требуют чистой обработки на менее «напряженных» рабочих режимах шлифования или суперфиниша (полировки).

Проведенные исследования могут использоваться для предварительного назначения режимов шлифования и окончательно утвер-

ждаться в ходе отладки технологического процесса конкретной детали, конфигурация которой оказывает влияние на осуществление процессов глубинного шлифования, а соответственно и на предельно допустимые значения температур шлифования и параметров качества поверхностного слоя.

Выводы:

1. Полученные результаты свидетельствуют о возможности достижения благоприятного распределения и величины остаточных напряжений при многокоординатном глубинном шлифовании лопаток компрессоров из титановых сплавов при определенных сочетаниях режимов обработки, а именно: скорости v_d и глубины t шлифования; скорости правки Sp ; направления подачи.

2. Рекомендуемые в статье значения режимов глубинного шлифования являются оценочными и должны окончательно утверждаться в ходе отладки технологического процесса конкретной детали, конструктивный облик которой накладывает свои особенности на осуществление процессов глубинного шлифования, а соответственно и на предельно допустимые значения температур шлифования и параметров качества поверхностного слоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оптимизация технологии глубинного шлифования // С.С. Силин, Б.Н. Леонов, В.А. Хрульков и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.
2. Полетаев, В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение. 2006. – 256 с.
3. Полетаев, В. А., Волков, Д.И. Глубинное шлифование лопаток турбин: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2009. – 272 с.

REFERENCES

1. *Optimization of Deep Grinding Technology* // S.S. Silin, B.N. Leonov, V.A. Khrulkov et al. M.: Mechanical Engineering, 1989. pp. – 120.
2. Poletaev, V.A. *Technology for Automated Manufacturing Gas Turbine Engine Blades*. M.: Mechanical Engineering. 2006. – pp. 256.
3. Poletaev, V.A., Volkov, D.I. *Turbine Blade Deep Grinding: Technologist's Library*. – M.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 272.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Макаров