

новом осуществляется по функциональным признакам при отсутствии характеристик конструкции.

3. В некоторых классификациях нарушены правила классификации.

Отмеченные недостатки классификаций препятствуют формированию общего представления о разнообразии изделий, определению направлений дальнейшего развития изделий.

Отсутствие в классификациях в качестве отличительных признаков характеристик конструкции изделий препятствует заимствованию конструкторских решений при создании новых изделий. Это приводит к дублированию разработок, препятствует расширению специализированных производств.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Интернет ресурс <http://www.myshared.ru/slide/233710/>
2. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин: учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. 1988, – 640 с.

## REFERENCES

1. Internet Resource <http://www.myshared.ru/slide/233710/>
2. Artobolevsky, I.I. *Theory of Machines and Mechanisms: Textbook for Technical Colleges. 4-th Edition revised and supplemented* – М.: Science. 1988, – pp. 640.

Рецензент д.т.н. А.Н. Михайлов

УДК 621.9.02

DOI: 10.12737/article\_595256f1d4d6d1.51942913

**В.Ф. Макаров, д.т.н.**

(Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614600, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29)

E-mail: makarovv@pstu.ru

## Разработка и применение новых инновационных технологий при производстве современных газотурбинных двигателей

*Приведены результаты научно-исследовательских работ, проведенных совместно с ОАО «Пермский моторный завод» и ОАО «Авиадвигатель» по исследованию, разработке и внедрению новых инновационных технологических процессов изготовления ответственных деталей современных и перспективных ГТД типа ПС90 2А, ПД14, ПД35 с целью повышения производительности, качества и долговечности их работы.*

**Ключевые слова:** диски; лопатки; резьба; скоростное протягивание; глубинное шлифование; полирование; упрочнение; балансировка; качество; усталостная прочность.

**V.F. Makarov, D.Eng.**

(Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolsky Avenue, Perm, 614600, Russia)

## Development and application of new innovation technologies in manufacturing modern gas turbine engine

*The results of scientific research works carried out jointly with OC “Perm Motor Works” and OC “Aviation Engine” on investigations, development and application of new innovation technological processes of the critical parts production for modern and future-technology gas turbine engines (GTE) of types PS90 2A, PD14, PD35 with the purpose to increase productivity, quality and life of their operation are shown.*

**Keywords:** disks; blades; thread; speed drawing; deep grinding; burnishing; strengthening; balancing; quality; fatigue resistance.

Более высокие эксплуатационные показатели новых газотурбинных двигателей типа

ПС90 2А, ПД14, ПД35 по сравнению с ранее выпускаемыми изделиями достигнуты за счет применения новых жаропрочных материалов, еще более труднообрабатываемых резанием, а также за счет значительного усложнения конструкции деталей. Трудоемкость обработки таких деталей существенно увеличилась.

Для решения задач по снижению трудоемкости и обеспечению требуемого качества и их надежности проводятся работы по исследованию, разработке и внедрению таких высокопроизводительных технологических процессов, как скоростное протягивание, растровое фрезерование, многоосевое глубинное шлифование, тонкое прецизионное ленточное полирование, автоматизированное размерное скругление острых кромок, высокоскоростная совмещенная лазерно-электроэрозионная прошивка отверстий малых диаметров, и других технологических процессов с широким использованием современных достижений в области числового компьютерного управления станками и обрабатывающими центрами.

**Оптимизация процессов лезвийной обработки.** Совершенствование методов лезвийной обработки деталей ГТД – точение, фрезерование, сверление, протягивание – традиционно проводится по хорошо зарекомендовавшей себя методике проф. А.Д. Макарова [1] на базе оптимизации режимов резания по минимуму относительно установившегося износа при соответствующей оптимальной температуре контакта (резания). Эта методика позволяет быстро, надежно и достоверно определять экспериментально и теоретически оптимальные режимы практически для любого вида лезвийной обработки новых труднообрабатываемых материалов с применением новых видов режущего инструмента.

Эффективность такого подхода доказана при разработке и внедрении впервые в отрасли метода *«скоростного протягивания деталей ГТД на оптимальных режимах резания»*. Одна из острых проблем повышения производительности и качества процесса протягивания сложнофасонных замковых поверхностей дисков и лопаток газотурбинных двигателей решается путем применения метода скоростного протягивания твердосплавными протяжками на новых горизонтально-протяжных станках с ЧПУ с большой длиной хода, типа RAWM16/8500 фирмы Hoffmann (Германия).

Проведено комплексное исследование процесса протягивания более 30 марок обрабатываемых жаропрочных сталей и сплавов с при-

менением как быстрорежущих, так и твердосплавных протяжек в диапазоне скоростей резания 0,5...70 м/мин с подачами от 0,005 до 0,15 мм/зуб.

Теоретической основой применения скоростного протягивания твердосплавными протяжками явилось установление оптимальных температурных зон в процессе резания, при которых наблюдалось существенное снижение износа протяжек, сил резания и усадки стружки [2]. Физическая природа этого явления выяснилась при проведении высокотемпературных механических испытаний образцов обрабатываемых материалов на растяжение. Установлено, что при определенной температуре испытаний (например, 700 °С для жаропрочного деформируемого сплава на железо-никелевой основе ЭИ787ВД) наблюдается снижение пластических свойств сплава – явление провала пластичности материала (минимум относительного сужения  $\psi$  и удлинения  $\delta$  при значительном снижении его прочностных свойств  $\sigma_b$ ).

В результате установлено, что минимальная интенсивность износа протяжек наблюдалась при различных оптимальных скоростях резания  $v_0$  для различных подач на зуб  $S_z$ , но при одной и той же оптимальной температуре резания  $T_0 = 700$  °С, совпадающей с температурой провала пластичности  $T_{пп}$ . Аналогичные результаты экспериментальных исследований получены и для других жаропрочных сталей и сплавов. Эмпирические зависимости оптимальных параметров резания  $v_0$ ,  $\theta_0$ ,  $h_{03л}$  в зависимости от процентного содержания углерода С, алюминия Al, предела прочности  $\sigma_b$ , ( $\gamma'$ ) – фазы, подачи на зуб  $S_z$  для различных групп обрабатываемых материалов представлены в таблице.

На основании проведенных исследований предложен новый метод скоростного протягивания на станке с ЧПУ с переключением скорости резания до оптимального значения на каждой секции протяжек по ходу движения многосекционного блока протяжек (рис.1).

В результате в процессе протягивания елочного паза диска турбины по мере движения блока протяжек и при соответствующем снижении подачи на зубьях с 0,1 до 0,02 мм/зуб скорость резания не снижается, как обычно при традиционном протягивании, а, наоборот, повышается с 17 до 27 м/мин, обеспечивая повышение производительности в 9 раз, улучшение параметров качества поверхностного слоя и более высокую усталостную прочность дисков.

Эмпирические зависимости оптимальных параметров резания

Группа обрабатываемых материалов	Инструментальный материал	Оптимальная скорость резания $v_o$ , м/с	Оптимальная температура резания $\theta_o$ , °К	Оптимальная интенсивность износа, $h_{озл}$ , мкм/м
1. Нержавеющие стали	P18	$32 \cdot C^{-0,2} S_z^{0,48} \cdot 10^{-3}$	$1100 \cdot C^{0,1}$	$305 \cdot C^{1,68} S_z^{2,36} \cdot 10^3$
2. Титановые сплавы	P18	$4,35 \cdot \sigma_b^{-0,2} Al^{-1,7} S_z^{-0,5}$	$16,2 \cdot \sigma_b^{-0,42} Al^{0,54}$	$0,01 \cdot \sigma_b^{0,32} Al^{2,51} S_z^{0,62}$
	BK8	$12,6 \cdot \sigma_b^{-0,23} Al^{-1,7} S_z^{-0,47}$		$0,002 \cdot \sigma_b^{0,4} Al^{1,7} S_z^{0,5}$
3. Жаропрочные деформированные сплавы	BK8	$0,98 \cdot (\gamma')^{-0,62} S_z^{-0,3}$	$570 \cdot (\gamma')^{0,1} + 273$	$4,36 \cdot (\gamma')^{1,4} S_z^{1,3}$
4. Жаропрочные литейные	BK8	$0,98 \cdot (\gamma')^{-0,62} S_z^{-0,3} \sigma_b^{-0,13}$		$5,6 \cdot (\gamma')^{1,4} S_z^{1,3} \sigma_b^{0,14}$



Рис. 1. Изменение скорости резания в процессе протягивания елочных пазов в дисках турбины из сплава ЭИ787ВД многосекционными твердосплавными протяжками

Созданная теория оптимального резания при протягивании применена для разработки методики проектирования и применения впервые в отрасли новых конструкций сборных протяжек с механическим креплением непереключаемых твердосплавных пластинок вместо быстрорежущих и напайных твердосплавных конструкций для скоростного протягивания замков лопаток компрессора ГТД на оптимальных скоростях резания (рис. 2).

Методика проектирования и расчета параметров новых протяжек разработана [3] с учетом изменения силы резания, процесса стружкообразования, применения принципа равной стойкости чистовой, получистовой и черновой секций протяжек при скоростном протягивании замков лопаток из жаропрочных сплавов различных групп обрабатываемости типа титанового сплава BT8M, железоникелевого деформируемого сплава ЭИ787ВД и литейного никелевого сплава ВЖЛ14 на оптимальных скоростях резания для черновых, получистовых и чистовых протяжек. Применение протяжек сборной конструкции позволяет в 1,5 – 2 раза повысить стойкость, надежность и стабильность работы протяжек при скоростном

протягивании замков лопаток компрессора ГТД.

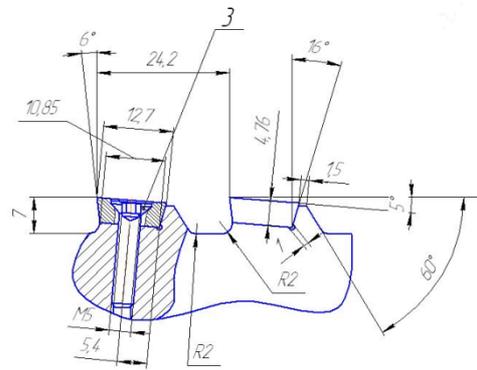


Рис. 2. Схема крепления многогранной сменной пластинки на корпусе протяжки и общий вид сборной протяжки для обработки замка лопатки

Решение проблемы обработки точных плоскостей в труднодоступных местах глубоких карманов корпусов специзделий решена путем разработки и применения **метода растрового прецизионного фрезерования на станке с ЧПУ**. При обработке таких поверхностей возникают технологические сложности, вызванные большим вылетом инструмента и конструктивными особенностями корпуса. Существующая технология ручной доводки не позволяет стабильно получать необходимые отклонение от плоскостности 0,01 мм и параметр шероховатости поверхности  $Ra \leq 0,63$  мкм.

В процессе обработки плоскости с использованием специально разработанной программой ЧПУ многоосевого станка обеспечивается траектория перемещения фрезы по фигуре Лиссажу [4]. Многообразие фигур и математический расчет позволяет запрограммировать

траекторию, перемещение инструмента по которой обеспечит требуемые параметры качества поверхности. Впервые выявлено, что на отклонение от плоскостности и параметр  $Ra$  шероховатости поверхности влияют такие параметры растровой траектории, как угол наклона и плотность сетки полученной траектории.

Анализ экспериментальных исследований показал, что эти зависимости носят экстремальный характер и наилучшее сочетание по производительности и требуемым параметрам качества поверхности можно достичь при угле наклона сетки  $\gamma = 90^\circ \pm 10^\circ$ , плотности сетки  $q = 30..50\%$  от диаметра инструмента. В результате внедрения нового процесса финишной обработки плоских поверхностей глубоких пазов, на станках с ЧПУ обеспечивается стабильная шероховатость  $Ra < 0,8$  мкм и отклонение от плоскостности  $\Delta < 0,05$  мм, устранен тяжёлый ручной труд, а производительность повысилась более чем в 3 раза.

Ускоренный выбор оптимальных режимов лезвийной обработки для различных деталей ГТД сегодня невозможен без применения *методов диагностики процесса резания*. На вновь созданном компьютерном центре диагностики проведены исследования влияния геометрии, материала режущих пластинок и износа резцов различных фирм и режимов резания на такие физические параметры процесса резания, как силы резания, температура, шум и вибрация, мощность резания, а также на шероховатость обработанной поверхности при точении. Проведена сравнительная оценка и даны рекомендации по ускоренному выбору и использованию режущих пластинок в зависимости от типа обработки различных сталей и композиционных материалов [5].

Установлена возможность полного импортозамещения режущего инструмента при обработке деталей ГТД на оптимальных режимах резания. Проведены исследования возможности адаптивного управления процессом фрезерования при обработке профиля пера титановых лопаток по силе резания. Повышена производительности обработки при этом на 15...20%.

**Проблемы обработки композиционных материалов.** В процессе механической обработки при воздействии режущего инструмента образуются значительные дефекты поверхностного слоя деталей: грубая недопустимая шероховатость; большая волнистость; вырывы и сколы на поверхности; ворсистость, расслоения, деламинация; глубокие трещины; откло-

нение формы и взаимного расположения поверхностей и др. Кроме того, при механической обработке резанием наблюдается повышенный износ режущих кромок инструментов и истирание по задней поверхности вследствие высокой твердости наполнителя и его абразивного воздействия на режущий инструмент, высоких прочностных характеристик композиционных материалов, а также слоистости структуры, низкой теплопроводности композитов, высоких упругих свойств композиционных материалов. В связи с этим, проведены исследования по резанию ПКМ гидроабразивным методом на установке гидроабразивной резки и на лазерной установке с охлаждением зоны резания азотом в сравнении с различными методами лезвийной обработки.

В результате анализа обработки *методом гидроабразивного резания (ГАР)* деталей из ПКМ установлено, что по сравнению с лезвийной обработкой имеются следующие преимущества: на образцах деталей полностью отсутствуют сколы, вырывы армирующего волокна и трещины на торцах; полностью исчезло выделение токсичных веществ; отсутствует износ режущего инструмента; отсутствуют оплавленные участки связующего из-за низкой температуры в зоне резания; появилась возможность качественно обрабатывать ПКМ с металлическими армирующими наполнителями; при получении отверстий полностью исчез дефект отслоения; повысилась производительность процесса обработки в 1,5 раза.

К недостаткам процесса ГАР можно отнести следующие: возможность применения только ограниченную номенклатуру деталей по размерам и форме; невозможность обработки глухих отверстий; опасность насыщения композита водой с последующим расслоением препрегов при сушке.

При сравнении обработки деталей из ПКМ на лазерной установке с охлаждением зоны резания азотом с механической обработкой установлено, что при лазерной резке полностью отсутствуют сколы, вырывы армирующего волокна и трещины на торцах, исчез дефект отслоения, отсутствует износ режущего инструмента, имеется возможность обрабатывать ПКМ с металлическими армирующими наполнителями. При этом производительность процесса обработки выше в 1,7 раза.

В тоже время имеется ряд недостатков: выделение токсичных веществ (требуется применение вентиляции); остаются оплавленные участки с подтеками связующего на выходе

отверстия, что обусловлено высокой температурой в зоне резания; возможна обработка только ограниченной номенклатуры деталей; невозможность обработки глухих отверстий.

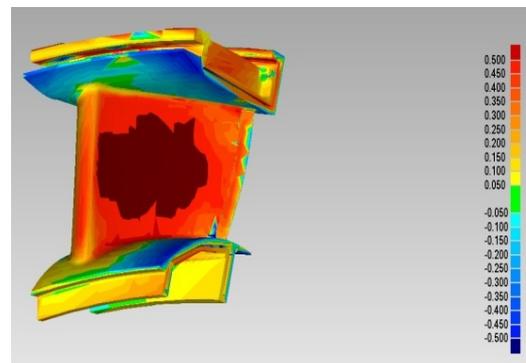
По результатам этих исследований можно сделать вывод, что заменить механическую обработку на ГАР или лазерную обработку для многих деталей ГТД из композиционных материалов невозможно. Однако становится ясно, что для качественной обработки композитов механическими методами необходимо обеспечить сверхвысокую скорость резания, весьма острую режущую кромку, микронную подачу и глубину резания. Скорость резания должна опережать скорость деформационных процессов, происходящих в структуре высокопрочной матрицы и хрупкой полимерной связки. Необходимо работать над созданием процесса сверхскоростного микрорезания, например, ультразвуковое вибросверление специальными сверлами с алмазным покрытием.

**Технологическое обеспечение высокой точности изготовления сопловых лопаток турбин при глубинном многоосевом шлифовании на станке с ЧПУ.** Для обеспечения высокого КПД и требуемой тяги газотурбинного двигателя конструкторами рассчитывается величина эффективной площади межлопаточного проходного сечения соплового аппарата. При сборке соплового аппарата точность проходного сечения зависит от точности изготовления литейных поверхностей профиля лопаток и точности базовых установочных поверхностей каждой индивидуальной сопловой лопатки. Существующая прежде технология шлифования базовых поверхностей лопаток на универсальных шлифовальных и модернизированных лоботокарных станках не учитывала погрешности литья лопаток. В результате требовалась длительная доработка и подгонка лопаток для обеспечения параметров проходного сечения.

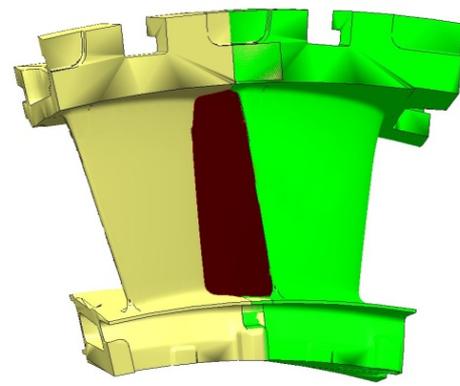
Для решения вышеприведенных задач приобретен специальный профилишлифовальный 5-ти осевой станок с ЧПУ Siemens Sinumerik 840D модели MFP-050.65.65 фирмы «Magerle AG» (Швейцария). Имеющиеся на станке большие возможности системы ЧПУ позволяют решить эту задачу. Для этого разработана методика и комплекс программного обеспечения (ПО) подготовки данных для шлифования лопаток, который включает в себя специализированное программное обеспечение (СПО) для автоматизированного расчета величин смещения и углов поворота сопловых и

рабочих лопаток [6]. В данном СПО разработан автоматический процесс получения величин компенсации смещения и углов поворота, который включает в себя пакетную обработку по результатам оцифровки комплекта лопаток.

Для того чтобы произвести механическую обработку, в первую очередь, необходимо правильно установить заготовку, т.е. придать ей правильное положение относительно выбранной системы координат по шести базовым литейным точкам. Однако, на практике, при таком варианте базирования сопловых лопаток на их проточных частях возможно появление искаженной геометрии по сравнению с эталоном, что связано с погрешностью литья отливок (рис. 3, а).



а)



б)

**Рис. 3.** Расчет СПО погрешности литья (темное пятно) на проточной части сопловой лопатки (а) и построение поверхности для вычисления площади проходного сечения (б)

С учетом величины этой площади вычисляется угол, на который необходимо повернуть лопатку относительно собственной оси так, чтобы площадь проходного сечения находилась в заданном допуске. В СПО заложена возможность анализа наличия или отсутствия припуска на механическую обработку.

Технолог может задать необходимую величину припуска на обрабатываемые поверхно-

сти, и СПО учтет эти данные в процессе со-  
вмещения. В результате внедрения новой тех-  
нологии совместного использования совре-  
менного оборудования и СПО, помимо повы-  
шения производительности производства со-  
пловых лопаток в 2,5 раза, значительно повы-  
силась точность проходного сечения, суще-  
ственно уменьшился разброс значений площади  
проходного сечения в сопловом аппарате и,  
как следствие, повысился КПД двигателя,  
снизилась вероятность появления нежела-  
тельных вибраций ГТД, что очень важно для  
повышения конкурентоспособности вновь  
выпускаемых изделий.

**Комбинированное зубошлифование – зу-  
бополирование.** На АО «Редуктор-ПМ» по-  
ставлена задача повышения эффективности и  
качества обработки зубчатых колес совре-  
менных редукторов и ГТД на основе применения  
новой передовой технологии шлифовально-  
полировальной обработки с применением  
сборных червячных шлифовально-  
полировальных кругов вместо применения  
весьма трудоемкой операции алмазного зубо-  
хонингования. Выполнен подбор режимов и  
тестовая обработка зубчатых колес с анализом  
точности и шероховатости поверхностей зубь-  
ев шестерен после комбинированной шлифо-  
вально-полировальной операции с приме-  
нением комбинированных шлифовально-  
полировальных червячных кругов.

Одна часть круга в осевом направлении  
предназначена для предварительного шлифо-  
вания, а вторая часть круга – для окончатель-  
ной финишной полировальной обработки  
(рис. 4). Первая черновая часть круга имеет  
более крупное абразивное зерно и  
керамическую связку, а вторая чистовая часть  
сборного круга имеет абразивные зерна  
меньшего размера и более мягкую  
полиуретановую связку.

В результате экспериментальных исследо-  
ваний установлено, что процесс зубошлифо-  
вания комбинированными шлифовально-  
полировальными кругами позволяет достичь  
требуемых параметров точности (3 – 4 сте-  
пень) и шероховатости поверхности профилей  
зубьев зубчатых колес  $Ra \leq 0,16$  мкм, что со-  
ответствует требованиям ТТ и КД. Внедрение  
комбинированной чистовой обработки сбор-  
ными шлифовально-полировальными кругами  
обеспечивает повышение производительности  
чистовой обработки в 2 раза за счет ликвида-  
ции операции алмазного зубохонингования.  
Одновременно решается вопрос импортоза-  
мещения украинских алмазных хоно-

вещественные шлифовально-полировальные  
круги завода Ильич (г. С.-Петербург), высво-  
бождения зубохонинговальных станков и об-  
служивающего персонала.

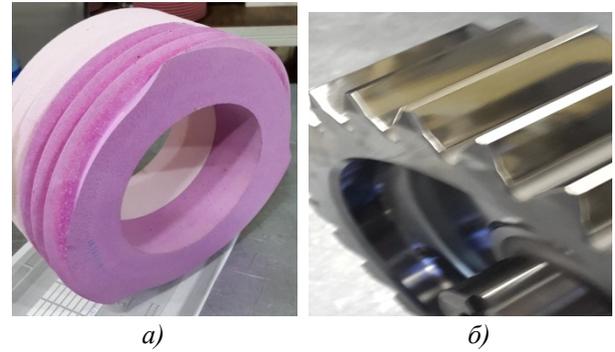


Рис. 4. Общий вид комбинированных шлифовально-  
полировальных червячных кругов (а) и поверхно-  
стей цилиндрических зубчатых колес после комби-  
нированного шлифования (б)

**Автоматизация скругления сложнопро-  
фильных кромок деталей ГТД вращающи-  
мися гибкими полимерноабразивными  
щетками.** В процессе любой механической  
обработки различных деталей образуются или  
острые кромки или заусенцы. Чаще всего ост-  
рые кромки и заусенцы на деталях не допус-  
каются по требованиям чертежа. Надежность  
работы машины обеспечивается снятием фа-  
сок, округлением и полированием кромок. В  
результате этого достигается снижение кон-  
центрации напряжений на кромках и повыше-  
ние усталостной прочности деталей машин.

В большинстве случаев обработка кромок  
деталей проводится вручную с применением  
различных слесарных инструментов и приспособлений.  
Поставлена задача автоматизиро-  
вать скругление профильных острых кромок  
на деталях ГТД. Для решения этой задачи  
проведены комплексные исследования по тео-  
рии и практике применения обработки поли-  
мерноабразивными щетками, разработаны  
специальные агрегатные шлифовальные уста-  
новки (патент №79066) (рис. 5).

В результате внедрения технологии скруг-  
ления и полирования кромок пазов дисков  
турбин абразивно-полимерными щетками по-  
высились производительность, качество и  
стабильность обработки кромок [7]. Так, при  
ручном скруглении на обработку диска требо-  
валось 8 ч работы. После автоматизации обра-  
ботка диска занимает 2 ч, отсутствует грани-  
чность профиля и риски на поверхности скруг-  
ления.

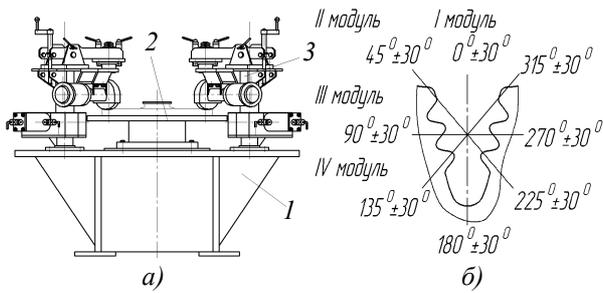


Рис. 5. Схема агрегатного четырехмодульного станка (а) и направления обработки кромок торцевых поверхностей елочного паза диска турбины шлифовальными головками с полимерноабразивными щетками (б)

Применение методов упрочняющей обработки. В процессе исследований причин разрушения деталей в эксплуатации и при усталостных испытаниях установлено, что в процессе механической обработки профильных поверхностей различных деталей на сопряженных поверхностях профиля формируются различные параметры качества поверхностного слоя – шероховатость, остаточные напряжения, микроструктура. В результате в переходных поверхностях профиля к конструкторскому концентратору напряжений добавляется технологический концентратор напряжений, что увеличивает вероятность появления усталостных трещин при знакопеременных нагрузках и приводит к последующему разрушению деталей.

Такие разрушения выявлены при эксплуатации и усталостных испытаниях зубчатых колес ГТД, конических крупномодульных резьб, елочных замков турбинных лопаток, ступенчатых валов, испытывающих высокие знакопеременные или циклические изгибные крутящие температурные нагрузки [8].

Оценка пооперационного формирования остаточных напряжений поверхностных слоев во впадине и на боковой поверхности шестерни, сделанная на основе анализа производственного опыта и расчета величины и характера распределения по данным научных исследований, позволяет сделать вывод о том, что в переходной зоне формируются дополнительный технологический концентратор напряжений (ТКН), обусловленный резким переходом растягивающих остаточных напряжений от +200 МПа на боковой поверхности зуба до высоких сжимающих остаточных напряжений -700 МПа на дне впадины зуба.

Выдвинута гипотеза: снижение действия технологического концентратора напряжений в критической переходной зоне возможно пу-

тем выравнивания напряжений за счет введения дополнительной финишной операции локального упрочнения впадины зуба методом поверхностно-пластического деформирования.

Применение наиболее рационального метода – обработки дробью способствует снижению величин градиентов основных параметров качества поверхностного слоя и формированию благоприятных сжимающих остаточных напряжений с необходимой величиной и распределением по глубине в области смежных поверхностей зуба. В результате проведенных усталостных испытаний установлено, что применение локального направленного упрочнения дробью переходных зон от впадины к боковой поверхности зубьев шестерен повышает предел выносливости на 15...20 % по сравнению с прежним серийным маршрутом обработки.

Аналогичные исследования проведены при разработке методики назначения оптимальных режимов глубинного шлифования елочных профилей турбинных лопаток. Для выполнения елочного профиля на замке лопатки применяется профильная схема врезного многопроходного глубинного шлифования с постепенным снятием припуска глубиной по первой впадине елочного профиля замка до 5 – 6 мм (рис. 6).

При шлифовании дна впадины длина дуги и площадь контакта периферии круга в несколько раз меньше, чем при шлифовании боковых поверхностей торцем круга. Вследствие увеличения длины дуги контакта длительность воздействия абразивных зерен на металл возрастает. Все это приводит к большему увеличению температуры шлифования на торцевых поверхностях, чем на дне впадины и росту растягивающих остаточных напряжений. Возникает технологический концентратор напряжений в переходной радиусной зоне.

При действии знакопеременных нагрузок в условиях эксплуатации этот концентратор напряжений складывается с циклически возникающим конструктивным геометрическим концентратором напряжений и создает условия для образования усталостных трещин в критической радиусной переходной зоне и разрушения лопаток турбины. Для снижения действия этого технологического концентратора напряжений и повышения сопротивления усталости после обработки глубинным шлифованием предложено применять процесс упрочнения профиля хвостовика микрошариками на пневмодробеструйной установке.

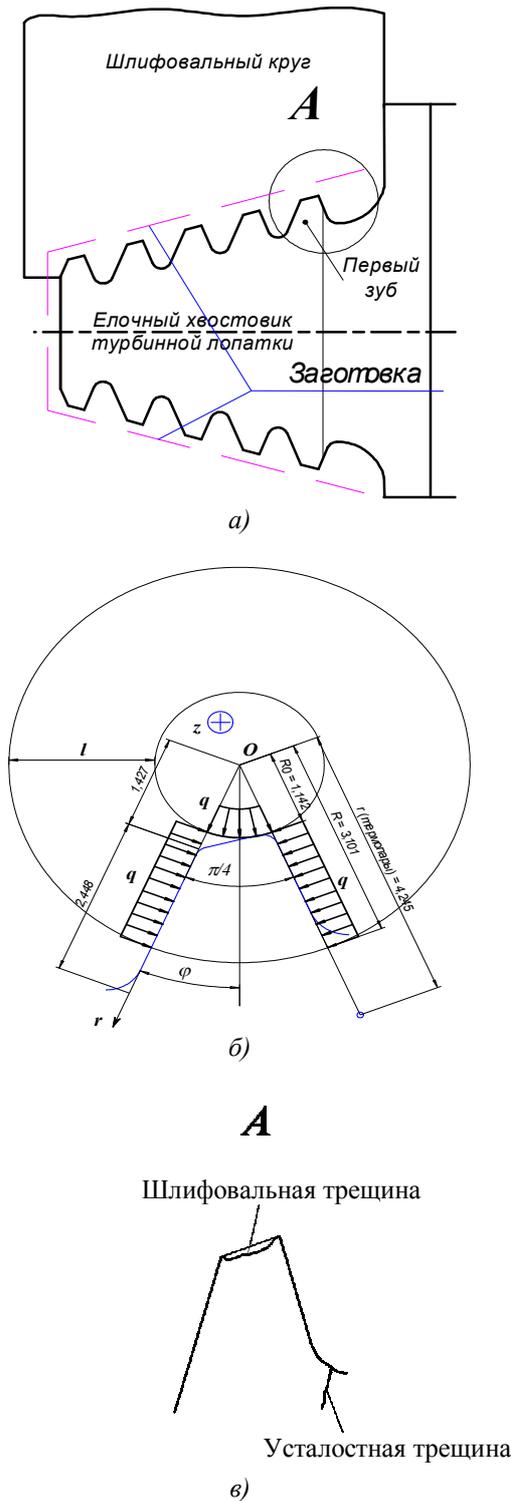


Рис. 6. Схема глубинного шлифования елочного замка (а, в), схема действия тепловых источников при глубинном шлифовании первой впадины елочного профиля хвостовика турбинной лопатки (б)

В результате проведения дробеструйного упрочнения микрошариками «елочного» профиля хвостовика и последующих усталостных испытаний турбинных лопаток и образцов-имитаторов «елочного» хвостовика при нормальной (20 °С) и рабочей (650...700 °С) тем-

пературах установлено, что предел выносливости после упрочнения повышается на 20...25 % при испытании с нормальной температурой, а при испытании на рабочей температуре происходит увеличение на 60 %.

Наличие технологических концентраторов напряжений установлено при нарезании крупномодульных конических резьб, которые в эксплуатации испытывают значительные знакопеременные нагрузки от действия растягивающих сил, изгибающих моментов, химического и абразивного воздействий, что приводит к нередким случаям поломки труб по резьбовым соединениям [9]. Анализ мест разрушения показал, что разрушение резьб носит усталостный характер и начинается рост усталостных трещин в зоне впадины резьбы.

Изготовление конической резьбы проводится методом врезного профильного многопроходного нарезания на токарно-винторезном станке SCT 22100 с ЧПУ сборными резцами с механическим креплением специальных трехгранных профильных резьбовых пластинок. Несвободное резание радиусной вершиной резца происходит в сложных условиях трехстороннего сжатия с формированием дна впадины резьбы методом поперечного врезного точения канавок. При этом образуется деформированная вытянутая корытообразная стружка сине-зеленого цвета, что свидетельствует о высокой, порядка 500...600 °С, температуре резания.

Резание боковыми режущими кромками резца является свободным резанием с образованием широкой плоской спиральной стружки светлого цвета, что свидетельствует о значительно меньшей деформации и температуре 250...300 °С.

Полученные результаты позволяют сделать предположение, что в процессе нарезания резьбы в поверхностном слое дна впадины и на боковых поверхностях резьбы формируются различные параметры качества: шероховатость, остаточные напряжения и наклеп. Например, установлено, что на дне впадин резьбы наблюдаются более глубокие риски от режущего инструмента, чем на боковых поверхностях резьбы.

Таким образом, можно констатировать факт образования технологического концентратора напряжений в переходной зоне от дна впадины к боковой поверхности, что в условиях действия изгибных знакопеременных нагрузок и при наличии конструктивного геометрического концентратора напряжений может усиливать вероятность образования уста-

лостных трещин и последующего разрушения резьбы.

Для снижения действия технологического концентратора напряжений предложено ввести поверхностно-пластическую деформационную обработку путем обкатки предварительно нарезанной резьбы роликом. При анализе сравнительных усталостных испытаний установлено увеличение наработки обкатанного резьбового соединения над неупрочненным более чем в четыре раза, с 700 тыс. циклов до 3900 тыс. циклов.

**Заключение.** Таким образом, разработка и внедрение новых прогрессивных методов лезвийной, абразивной и упрочняющей обработки позволили существенно сократить трудоемкость изготовления новых двигателей при обеспечении требуемого высокого качества, надежности и долговечности работы в эксплуатации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
2. Макаров, В.Ф. Оптимизация протягивания труднообрабатываемых материалов: монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 440 с.
3. Макаров, В.Ф., Петухов, Г.Д. Разработка сборных конструкций протяжного инструмента для скоростного протягивания хвостовиков лопаток компрессора из труднообрабатываемых материалов // Сборка в машиностроении и приборостроении. – 2015. – № 10(183). – С. 23–31.
4. Макаров, В.Ф., Пепельшев, А.В. Повышение точности формы при фрезеровании плоских поверхностей в результате оптимизации параметров траектории // Справочник. Инженерный журнал. – 2015 г. – № 3 (216). – с. 6–9.
5. Макаров, В.Ф., Койнов, И.И., Абзаев, Р.С., Ширинкин, В.В., Мешкас, А.Е. Особенности диагностики процесса резания при сверлении композиционных материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 12(66). – С. 20–27.
6. Макаров, В.Ф., Никитин, С.П., Норин, А.О. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 5(59). – С. 17–24.
7. Makarov V.F., Vinogradov A.V. Automated polishing of sharp edges on gas-turbine components by abrasive polymer brushes. Russian Engineering Research New York: Allenton Press. 2012, 32, № 1, pp. 102–107.

8. Макаров, В.Ф., Горбунов, А.С., Ворожцова, Н.А. Формирование параметров качества поверхностного слоя зубьев спирально-конических шестерен с учетом влияния технологической наследственности // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – №4. – С. 40–47.

9. Песин, М.В., Макаров, В.Ф., Ашихмин, В.Н. Научно-обоснованное проектирование технологического процесса упрочняющей обработки резьбовой поверхности буровых труб // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – № 11(29). – С. 42–48.

## REFERENCES

1. Makarov, A.D. *Cutting Process Optimization*. – M.: Mechanical Engineering, 1976. – pp. 278.
2. Makarov, V.F. *Optimization of Hard-to-Machine Material Drawing*: Monograph. – Staroy Oskol: TNT, 2014. – pp. 440.
3. Makarov, V.F., Petukhov, G.D. Combined structures development of drawing tool for speed drawing of hard-to-machine blade butts // *Assembly in Mechanical Engineering and Instrument Making*. – 2015. – № 10(183). – pp. 23–31.
4. Makarov, V.F., Pepelyshev, A.V. Form accuracy increase during flat surface milling as a result of path parameters optimization // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2015 г. – № 3 (216). – pp. 6–9.
5. Makarov, V.F., Koinov, I.I., Abzayev, R.S., Shirinkin, V.V., Meshkas, A.E. Diagnostics peculiarities of cutting process during composites drilling // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – № 12(66). – pp. 20–27.
6. Makarov, V.F., Nikitin, S.P., Norin, A.O. Quality and productivity increase during deep profile blade grinding // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – № 5(59). – pp. 17–24.
7. Makarov V.F., Vinogradov A.V. Automated polishing of sharp edges on gas-turbine components by abrasive polymer brushes. Russian Engineering Research New York: Allenton Press. 2012, 32, № 1, pp. 102–107.
8. Makarov, V.F., Gorbunov, A.S., Vorozhtsova, N.A. Quality parameter formation in surface layers of spiral bevel gear teeth taking into account technological heredity impact // *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – №4(34). – pp. 40–47.
9. Pesin, M.V., Makarov, V.F., Ashikhmin, V.N. Scientifically reasonable design of technological process of threaded surface strengthening in drill pipes // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2013. – № 11(29). – pp. 42–48.

Рецензент д.т.н. А.С. Ямников