

УДК 621.9.01

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ОПЕРАЦИЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО МИНИМУМУ СЕБЕСТОИМОСТИ

© 2016 Д.И. Волков¹, С.Л. Проскуряков¹, С.С. Тарасов²

¹Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева

²ПАО «НПО «Сатурн», г. Рыбинск

Статья поступила в редакцию 21.03.2016

Рассмотрены особенности оптимизации операций токарной обработки деталей газотурбинных двигателей (ГТД) из жаропрочных никелевых сплавов инструментами из сверхтвердых материалов (СТМ) и керамики. При высокоскоростной обработке на скоростях резания, в 10 раз превышающих скорости резания твердосплавными инструментами, наблюдаются качественные изменения в самом процессе резания. Показано, что эффективность обработки существенно зависит от всего комплекса условий обработки. Предложена методика для определения оптимальных условий высокоскоростного точения.

Ключевые слова: *высокоскоростное точение, никелевый жаропрочный сплав, сверхтвердый материал, керамика, методика оптимизации*

На современном этапе развития авиадвигателестроения оптимизация процессов механической обработки имеет принципиальное значение. В качестве критериев оптимизации токарной обработки инструментом из сверхтвердых материалов (СТМ) обычно принимаются максимальная производительность обработки, минимальная себестоимость или максимальная стойкость инструмента. При обработке жаропрочных сплавов в условиях серийного и массового производства интерес представляет сравнение методов обработки СТМ и твердосплавными инструментами с целью получения максимальной эффективности обработки при заданных требованиях качества деталей. Постановка задачи в этом случае выражается в минимизации себестоимости обработки при рациональном выборе инструмента, траектории его движения и режимов резания. Основными ограничениями при этом являются требования к качеству обрабатываемых поверхностей детали, а также допустимые условия эксплуатации станочного оборудования и инструмента.

Структура технологической операции в наиболее часто встречаемых случаях предусматривает обработку не только торцевых или цилиндрических, но криволинейных поверхностей заготовки при наружной или внутренней обработке. Для достижения наибольшей эффективности следует стремиться к минимизации числа переходов, при этом производительность обработки должна оставаться высокой. Удовлетворить одновременно перечисленные требования на интуитивном уровне довольно затруднительно. Поэтому в задачу данного исследования входит построение универсального алгоритма вычислений, который бы включал в себя рассмотренные выше ограничения, учитывал опыт производства и определял наилучшие режимы обработки. Разработка алгоритма расчетов базируется на теории процесса высокоскоростной обработки керамическим инструментом, элементы которой в виде отдельных математических моделей представленных в [1-3]. Объединение моделей достигалось путем

создания обобщенной методики расчета параметров высокоскоростной обработки СТМ и режущей керамикой и оптимизации процесса на основе целевой функции и налагаемых ограничений, которые устанавливаются из технических возможностей, технологических условий и имеющегося производственного опыта.

В условиях рыночной экономики при разработке технологических процессов лезвийной обработки устарели табличные методы определения режимов резания [4, 5]. При этом для определения наиболее рациональных параметров обработки в качестве основного критерия оптимизации следует выбирать минимум себестоимости технологической операции, предусматривающий получение годной детали с наименьшими производственными затратами [6-8]. Преимущества данного критерия оптимизации заключаются в том, что он наиболее полно и комплексно учитывает все виды затрат, связанные с изготовлением выпускаемой продукции. Это затраты, непосредственно связанные с выполнением технологической операции на конкретном рабочем месте, и затраты предшествующего характера на организацию производственного процесса, учитываемые амортизационными отчислениями и другими статьями расходов. Сравнение для базового варианта и предлагаемого более прогрессивного варианта [9].

Основным преимуществом применения инструмента из СТМ и режущей керамики является большой экономический эффект, при котором данный инструмент при определенных условиях полностью покрывает расходы на его приобретение. С целью этого была разработана программа в пакете Microsoft Excel по определению экономической эффективности и целесообразности применения инструмента из СТМ в зависимости от конкретных условий обработки и применяемого оборудования. Расчет определяется в 4 этапа:

- 1) расчет стоимости машинного времени обработки;
- 2) расчет затрат на обработку детали по существующей технологии;
- 3) расчет затрат на обработку детали по новой технологии;
- 4) определение суммарных затрат по двум вариантам и расчет экономического эффекта (рис. 1).

Волков Дмитрий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой. E-mail: d_i_volkov@rsatu.ru
Проскуряков Сергей Львович, кандидат технических наук, доцент кафедры. E-mail: proskuryakov56@list.ru
Тарасов Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, ведущий специалист. E-mail: rmsi@rgata.ru

A42									
A	B	C	D	E	F	G	H		
Суммарные затраты по обработке детали Кожух уплотнения на операции 145									
		Затраты по операции, руб.							
	№ операции	Вариант 1	Вариант 2	Эффект по операции, руб.					
	1 75	4643,36	695,90	3947,46			C6-D6		
	2	Экономический эффект, руб.		3947,46					

Рис. 1. Программа для расчета экономического эффекта от применения инструмента из СТМ и режущей керамики

Результаты, которые были получены на основании теории, экспериментов и производственного опыта, свидетельствуют, что при использовании керамических инструментов обеспечивается высокий уровень производительности с получением требуемых параметров шероховатости. Вместе с тем ряд особенностей обработки жаропрочных сплавов инструментом из СТМ и режущей керамики затрудняют эффективное использование указанного метода обработки, так как отсутствует обоснование применения инструмента из СТМ взамен твердосплавных пластин и необходимое для такого анализа математическое обеспечение.

Основным препятствием при моделировании и оптимизации процесса лезвийной обработки является неопределенность действительных значений механических и геометрических параметров, существующих в зоне резания, и их зависимость от большого числа технологических факторов. Существенное влияние на процесс резания оказывают радиус округления и износ режущей кромки. Определение режимов точения жаропрочных сплавов инструментом из СТМ следует производить с учетом совокупности физических явлений, происходящих в процессе обработки. Методика оптимизации параметров технологической операции должна учитывать характеристики режущего инструмента, применяемого технологического оборудования и требования к детали, предъявляемые в соответствии с условиями эксплуатации. На этапе проектирования технологической операции предполагается решение задачи формирования требуемой геометрии шероховатости предъявляемых к деталям, а на этапе обработки решается задача стабилизации параметров процесса. Принципы построения методики оптимизации токарных операций изложены в работах [7, 8, 10, 11]. В

соответствии с ними основу методики оптимизации точения жаропрочных сплавов инструментом из СТМ и режущей керамики должны составлять представления о физических закономерностях, установленных в ходе данного исследования, и формализация накопленного опыта определения рациональных режимов обработки.

Создание общего алгоритма расчетов можно представить в виде постановки задачи математического программирования. В соответствии с решаемой задачей целевой функцией в данном случае может являться одна из двух:

- 1) получение наименьшей себестоимости обработки;
- 2) достижение наибольшей производительности обработки.

Реализация целевой функции достигается при условии наличия ряда ограничений, установленных в соответствии с требованиями к качеству деталей, кроме того, существует также ряд ограничений, не связанных с качеством деталей и обусловленных возможностями эксплуатации станка и инструмента. Такие ограничения влияют на выбор управляющих параметров при расчете и сужают диапазон допустимых решений.

Вопрос о себестоимости обработки встает в том случае, если обработка на некоторых технологических операциях осуществляется с достаточно большими затратами на восстановление режущей способности инструмента в частности на замену режущей пластины, переменная доля себестоимости при этом заметно увеличивается. Такой случай часто имеет место при обработке инструментом из СТМ, целевая функция по себестоимости имеет вид

$$C_{on.nep} = E \cdot t_M + \frac{(t_{cm} + t_H) \cdot E + C'_u}{T} \cdot k_M \cdot t_M \rightarrow \min, \quad (1)$$

где E – сумма зарплаты основных рабочих и всех амортизационных отчислений, отнесенных к минуте работы станка

$$E = \frac{C_{\text{мин}} K_{\text{т}} K_{\text{н}} + (C_{\text{ст}} N_{\text{ам,ст}} + C_{\text{пр}} N_{\text{ам,пр}} + C_{\text{зд}} N_{\text{ам,зд}} F_{\text{ст}} / F_{\text{зд}})}{(\Phi_{\text{ст}} 60000)}; \quad (2)$$

$t_{\text{см}}, t_{\text{н}}$ – время на смену и наладку нормально изношенного инструмента за период его стойкости, мин; $k_{\text{м}}$ – коэффициент, учитывающий непосредственное резание в машинном времени; $C'_{\text{и}}$ – сумма затрат на один период стойкости режущего инструмента, определяемая зависимостью:

$$C'_{\text{и}} = (C_{\text{ин}} + i_{\text{пл}} C_{\text{пл}}) / i_{\text{пл}}, \quad (3)$$

$C_{\text{ин}}$ – первоначальная стоимость используемого режущего инструмента, руб.; $i_{\text{пл}}$ – число переточек (перестановок многогранных пластин) режущего инструмента; $C_{\text{пл}}$ – стоимость одной переточки (перестановки многогранной пластины), руб.

При разработке технологической операции точения инструментом из СТМ схема обработки и распределение операционного припуска на поверхности заготовки во многом определяет стратегию построения рабочих переходов. Основные преимущества точения жаропрочных сплавов инструментом из СТМ связаны с увеличением скорости резания, значительным периодом стойкости инструмента и повышением производительности. В ряде случаев при токарной обработке жаропрочных сплавов может быть достигнута интенсификация съема металла по сравнению с обработкой твердосплавным инструментом. Производственный опыт показывает, что следует рассматривать два варианта: во-первых, величина и характер распределения припуска на обрабатываемых поверхностях определяют необходимость предварительной обработки, когда осуществляется подготовка к последующим переходам чистового точения инструментом из СТМ; во-вторых, процедура удаления основного припуска определяется из условия конкурентоспособности процессов точения керамическим и твердосплавным инструментом, а также с учетом того, что параметры качества в основном определяются на заключительном переходе.

Система прямых ограничений, накладываемых непосредственно на параметры режима обработки и размеры инструмента, связанная с возможностями реализации на применяемом станочном оборудовании. Согласно имеющимся представлениям данная система ограничений сводится к следующим условиям:

- диапазон изменения величины осевой подачи $s_{\text{о min}} \leq s_{\text{о}} \leq s_{\text{о max}}$;
- диапазон изменения величины радиальной подачи $s_{\text{р min}} \leq s_{\text{р}} \leq s_{\text{р max}}$;
- диапазон изменения частоты вращения заготовки $n_{\text{min}} \leq n \leq n_{\text{max}}$;
- диапазон изменения диаметра обработки $D_{\text{min}} \leq D \leq D_{\text{max}}$;
- диапазон изменения окружной скорости резания

$$\frac{\pi D_{\text{т min}} \cdot n_{\text{т min}}}{1000 \cdot 60} \leq v_{\text{р}}^{\text{т}} \leq \frac{\pi D_{\text{т max}} \cdot n_{\text{т max}}}{1000 \cdot 60}. \quad (4)$$

Обеспечение процесса токарной обработки инструментом из СТМ и режущей керамики по достижению заданных параметров стойкости инструмента и качества поверхностного слоя детали может быть обеспечено только в случае стабильного и устойчивого протекания процесса обработки. В связи с этим важная

группа ограничений обусловлена самим процессом резания и взаимодействием рабочего процесса со станком и инструментом. В данном случае основные ограничения определяются следующими параметрами.

1. Предельно допустимая оборотная подача:

$$S_{\text{об.крив.}} < S_{\text{об.крив. max}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{об.крив.}}$ – текущее значение оборотной подачи при обработке криволинейной поверхности; $S_{\text{об.крив. max}}$ – предельно допустимое значение оборотной подачи при обработке криволинейной поверхности, обеспечивающее работоспособность пластины из режущей керамики;

2. Ограничение температуры в зоне резания:

$$\theta_{\text{р}} \leq \theta_{\text{ст}}, \quad (6)$$

где $\theta_{\text{р}}$ – температура резания, определяемая расчетом; $\theta_{\text{ст}}$ – теплостойкость керамики.

3. Ограничение параметра износа по задней поверхности:

$$h_{\text{з}} \leq h_{\text{з max}}, \quad (7)$$

где $h_{\text{з}}$ – параметр износа по задней поверхности, определяемый зависимостью; $h_{\text{з max}}$ – предельно допустимый износ по задней поверхности.

Следующая группа ограничений, связанных с техническими требованиями шероховатости поверхностного слоя деталей, имеет основное значение на заключительном проходе. Она образует систему неравенств, которая определяется следующими основными характеристиками.

4. Величина шероховатости обработанной поверхности

$$Ra_{\text{р}} \leq Ra_{\text{max}}, \quad (8)$$

где $Ra_{\text{р}}$ – расчетное значение шероховатости; Ra_{max} – величина шероховатости, заданная технологией.

Схема расчета режимов точения жаропрочных сплавов керамическим инструментом представлена на рис. 2. Исходными данными являются сведения об оптимизируемой операции, которые могут быть получены из техпроцесса. Кроме того, используются паспортные данные станочного оборудования, предполагаемого для использования, а также характеристики инструмента.

Разработанная схема расчетов позволяет рационально распределить операционный припуск и определить режимы резания на каждом из переходов. Достоинством методики является то, что она обеспечивает минимальное значение износа по задней поверхности и максимальной стойкости в процессе обработки и дает возможность формировать шероховатость обработанной поверхности, используя возможности режущего инструмента и станочного оборудования. Данная методика разработана на основе математического анализа механических и теплофизических явлений, сопровождающих процесс резания. В результате предложен научно-обоснованный аналитический подход определения условий точения жаропрочных сплавов инструментом из СТМ и режущей керамики, позволяющий без проведения длительных и трудоемких экспериментальных исследований с высокой степенью достоверности определить основные характеристики процесса, а также оптимизировать технико-экономические показатели операций точения.

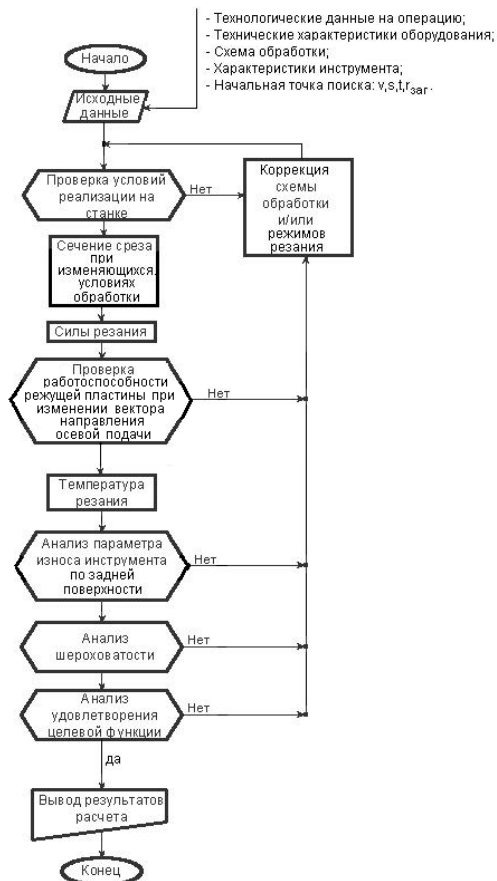


Рис. 2. Схема расчета режимов точения жаропрочных сплавов инструментом из СТМ

Внедрение результатов работы проводилось на предприятии ПАО «НПО «Сатурн» при обработке деталей из жаропрочных сплавов для авиационных двигателей «SaM-146» и наземной тематики «ГТД8-PM», а также при серийном изготовлении ряда других деталей авиационной и наземной тематики. В табл. 1 приведены наименования деталей и материал, из которого они изготовлены. На рис. 3 представлен эскиз одной из деталей с обозначением поверхностей, подвергаемых обработке. Для разработки рекомендаций по лезвийной обработке детали «Кожух уплотнения передний» двигателя SaM-146 из жаропрочного сплава INCONEL 718 были проведены сравнительные испытания резцов с режущей частью из различных инструментальных материалов киборит, белбор, IC907, GC1105, TH1000, GC6060, IS9, IW7.

Таблица 1. Наименование деталей и материал

Наименование детали	Марка материала
кожух уплотнения передний	INCONEL 718
диск 1 ступени	ХН62БМКТЮ
кольцо	ВЖЛ12У-ВИ
диск-лабиринт	ХН62БМКТЮ

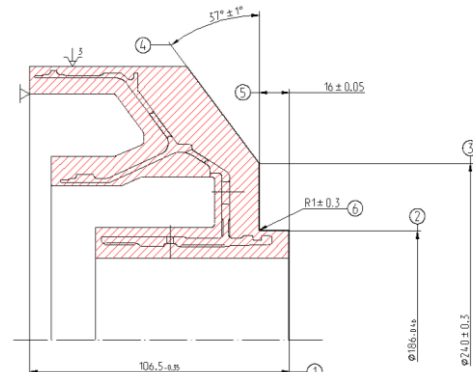


Рис. 3. Эскиз детали «Кожух уплотнения передний»

Также проведено сравнение стойкости резцов из СТМ и керамики при наружном точении детали «Кожух уплотнения передний» двигателя SaM-146 с имевшимися данными по аналогичному точению инструментом из твердого сплава. По результатам исследований можно сделать вывод, что при обработке детали «Кожух уплотнения передний» из жаропрочного материала INCONEL 718 удалось обеспечить производительность обработки в 8 раз больше по сравнению с базовым технологическим процессом, где инструментальным материалом служил твердый сплав.

Проблемы возникали при обработке полотна детали «Диск-лабиринт» из жаропрочного сплава ХН62БМКТЮ инструментами из твердого сплава в связи с низкой стойкостью инструмента. Для решения этой проблемы были проведены испытания инструмента с круглыми пластинами из режущей керамики. Результаты показали хорошую работоспособность инструмента с обеспечением требуемых геометрических размеров. При этом повышается производительность обработки и сокращается расход пластин по сравнению с пластинами из твердого сплава. На основании анализа технологии изготовления представленных деталей и результатов испытаний резцов при их обработке, рекомендуются режимы резания, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Рекомендуемые режимы резания

Вид обработки	Материал режущей части инструмента	Режимы резания				Стойкость инструмента, мин.
		s, мм/об	n, об/мин	v, м/мин	t, мм	
1. Продольное точение:						
а) черновое	CC670 CC6065, IW7	0,15-0,2	260-340	180-230	1,5	9,5
б) получистовое	IW7	0,1-0,15	290-360	200-220	1,5	11,4
2. Профильная обработка:						
а) черновое	CC670 CC6065, IW7	0,05-0.1	260-340	180-230	1,5	8,4
б) получистовое	IW7	0.07-0.12	290-360	200-220	1.5	16.3

Эффективность от внедрения данных научно-технических разработок заключалась в увеличении производительности процессов лезвийной обработки

за счет увеличения скорости резания и экономии времени на смену инструмента и, как следствие, уменьшения количества переналадок станка. При этом если

стойкость инструмента из керамики хотя бы равна 3 минуты при скорости 10 м / с, то она обеспечивает обработку поверхности на заготовке равной как при 60 минутной стойкости пластины из твердого сплава. В среднем повышение эффективности технологических операций выразилось в увеличении производительности на 40% и снижении себестоимости обработки на 25%.

Выводы:

1. Разработанная методика оптимизации операций высокопроизводительного точения инструментом из СТМ и режущей керамики учитывает большой комплекс факторов, определяющих себестоимость, в том числе учитывает физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материала, режимы резания, траектории движения инструмента, геометрические параметры режущего инструмента, что позволило прогнозировать выходные характеристики процесса обработки на стадии технологической подготовки производства.

2. Использование данной методики в производстве позволило разработать научно обоснованные рекомендации для практического использования при выборе станочного оборудования и инструмента для высокоскоростной обработки керамическим инструментом, а также оптимизировать условия обработки по минимуму себестоимости операции при обеспечении заданных параметров качества.

3. Разработанные практические рекомендации для технологий точения инструментом из СТМ и режущей керамики позволили в среднем снизить себестоимость операций на 15% и повысить производительность обработки на 40% при обеспечении требуемой точности и шероховатости обработанной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Волков, Д.И. Разработка модели процесса резания с учетом цикличности формирования стружки / Д.И. Волков, С.Л. Проскуряков // Вестник УГАТУ. 2011. №43. С. 72-78.
2. Волков, Д.И. Динамическая модель зоны резания для условий высокоскоростного точения / Д.И. Волков, С.Л. Проскуряков // Вестник РГТА. 2011. Т. № 1 (19). С. 43-49.
3. Волков, Д.И. Расчетное определение параметров сечения среза при высокоскоростной токарной обработке криволинейных поверхностей деталей ГТД из жаропрочных никелевых сплавов / Д.И. Волков, С.С. Тарасов // Вестник РГТАУ. 2013. №1(24). С. 61-68.
4. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1986. 240 с.
5. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами и их применение: Справочник / В.П. Жедь, Г.В. Боровский, Я.А. Музыкант, Г.М. Ипполитов. – М.: Машиностроение, 1987. 320 с.
6. Гильман, А.М. Оптимизация режимов резания на металлорежущих станках / А.М. Гильман, Л.А. Брахман, Д.И. Батищев и др. – М.: Машиностроение, 1972. 188 с.
7. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
8. Волков, Д.И. Особенности тепловых процессов при высокоскоростном точении никелевых сплавов и расчетное определение оптимальной скорости резания / Д.И. Волков, С.Л. Проскуряков // Вестник УГАТУ. 2013. №8(61). С. 121-127.
9. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под. ред. А.Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986. 496 с.
10. Яковб, Г.Ю. Оптимизация резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации / Г.Ю. Яковб, Э. Яковб. – М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
11. Волков, Д.И. Применение инструмента из минералокерамики для окончательной высокоскоростной токарной обработки деталей из жаропрочных литейных сплавов / Д.И. Волков, С.Л. Проскуряков, С.С. Тарасов // Вестник РГТАУ. 2013. №3 (26). С. 59-65.

METHODS OF OPTIMIZATION THE TURNING OPERATIONS OF GAS-TURBINE ENGINE DETAILS BY THE TOOL FROM SUPERSOLID MATERIALS ON THE PRIME COST MINIMUM

© 2016 D.I. Volkov¹, S.L. Proskuryakov¹, S.S. Tarasov²

¹ Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov

² PJSC "NPO "Saturn", Rybinsk

Features of optimization the operations of turning of gas-turbine engines details from heat resisting nickel alloys by tools from supersolid materials and ceramics are considered. At high-speed processing at the cutting speeds, by 10 times exceeding cutting speeds hard-alloy tools high-quality changes in the process of cutting are observed. It is shown that efficiency of processing significantly depends on all complex of processing conditions. The method for definition the optimum conditions of high-speed turning is offered.

Key words: high-speed turning, nickel heat resisting alloy, supersolid material, ceramics, optimization method

Dmitriy Volkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department. E-mail: d_i_volkov@rsatu.ru;
Sergey Proskuryakov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: proskuryakov56@list.ru
Sergey Tarasov, Candidate of Technical Sciences, Leading Specialist. E-mail: rnsi@rgata.ru