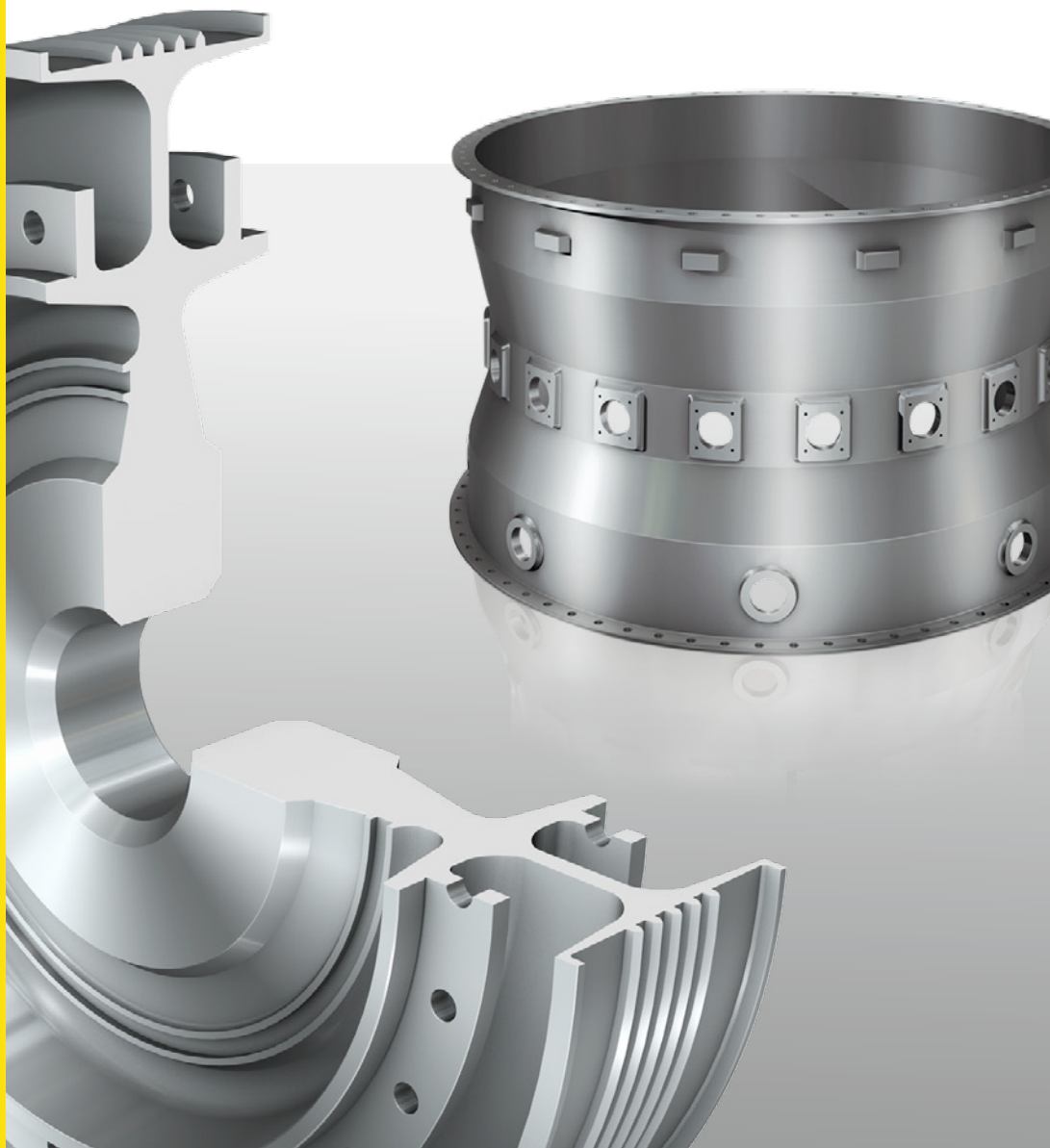
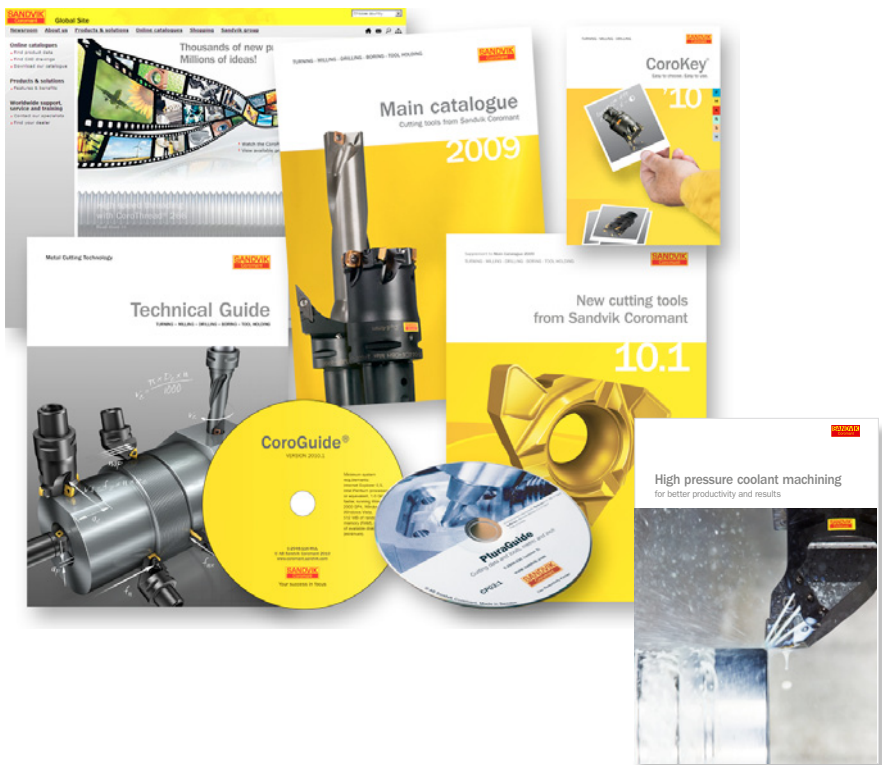


Жаропрочные сплавы





Подробная информация

Используйте информацию по применению, которую Вы можете найти в наших каталогах, справочниках и руководствах по применению, а так же в программе PluraGuide. CoroGuide web – это интернет-каталог, включающий модуль расчета режимов резания (также доступный на компакт-диске), содержащий рекомендации по выбору режимов обработки, в том числе и для решения специфических задач.

На сайте также можно узнать самые последние новости!

www.sandvik.coromant.com

www.aero-knowledge.com

Содержание

Введение	2
1. Жаропрочные сплавы	3
Классификация жаропрочных сплавов	4
Обработываемость/ состояние поставки	5
Распространенные виды деталей.....	7
Требования к подаче смазочно-охлаждающей жидкости.....	8
2. Точение сплавов на никелевой основе.....	9
Стадии обработки	9
Виды износа	11
Выбор формы пластины.....	13
Материалы режущего инструмента..	21
Керамические сплавы	22
Твердые сплавы	26
Спиральный путь резания (SCL) – расчет режимов обработки	28
Стружколомающие геометрии	31
Рекомендации по выбору инструмента для жаропрочных сплавов на никелевой основе	34
Система Tailor Made.....	36
Специализированные решения.....	37
Типовые решения.....	42
3. Точение сплавов на основе кобальта.....	51
Основные определения	52
Виды износа	53
Выбор формы пластины.....	54
Оптимальные инструменты для внутренней обработки	55
Рекомендации по выбору инструмента для жаропрочных сплавов на кобальтовой основе.....	57
Твердые сплавы	58
Специальные решения.....	58
Типовые решения.....	59
4. Фрезерование жаропрочных сплавов	60
Процесс разработки технологии	61
Типичные детали	61
Стратегия обработки	62
Выбор типа фрезы	64
Обработка фрезами со сменными неперетачиваемыми пластинами	65
Торцевое фрезерование твердосплавными пластинами	68
Концевые фрезы/фрезы для обработки уступов	77
фрезерование с использованием керамических пластин	82
Использование твердосплавной пластины CoroMill®Pluga при обработке жаропрочных сплавов	88
Применение фрез CoroMill 316 со сменной головкой для обработки жаропрочных сплавов.	97
Типовые решения.....	98
Рекомендуемые режимы резания..	102
5. Изготовление отверстий в жаропрочных сплавах	104
Виды отверстий и способы их изготовления	104
Инструмент для изготовления отверстий	106
Обработка по винтовой интерполяции в сплошном материале	107
Обработка по круговой интерполяции существующих отверстий	108
Обратное снятие фасок / снятие заусенцев	109
Резьбофрезерование.....	110
Рекомендуемые режимы резания..	112
Типовые решения.....	114
6. Технические данные	118
7. Жаропрочные сплавы – таблица перекрестных ссылок	120

Введение

Данное руководство описывает оптимальные методы обработки жаропрочных сплавов.

Для этого вида труднообрабатываемых материалов, выбор оптимизированного инструмента является, конечно, необходимым условием, однако не менее важен и способ его применения.

Здесь рассматриваются наиболее часто используемые материалы и способы их обработки. Авторам хотелось дать общие рекомендации относительно построения технологического процесса. Они могут помочь эффективнее использовать режущий инструмент с целью обеспечения максимальной надежности технологического процесса и качества деталей.

Наша цель: предоставить нашим клиентам комплексные решения по инструментальному оснащению, позволяющие снизить расходы и улучшить качество.

Главное для нас – производительность, качество и надежность. Когда мы будем обсуждать производительность, Вы увидите, что мы измеряем ее в см³/мин. Важно найти разумное сочетание скорости, подачи и глубины резания, а не только учитывать скорость резания, которая в большей мере определяет стойкость инструмента, но не производительность.

Жаропрочные сплавы

Жаропрочные сплавы – это распространенное определение для материалов, используемых в различных отраслях промышленности:

Авиационные двигатели	– детали турбин и камер сгорания.
Стационарные газовые турбины	– детали турбин и камер сгорания.
Нефтегазовая промышленность	– детали, работающие в морской воде.
Медицина	– суставные протезы.

Свойства, определяющие предпочтительное использование жаропрочных сплавов:

- Сохранение прочности и твердости при высоких температурах.
- Коррозионная стойкость.



Авиационные двигатели



Стационарные газовые турбины



Нефтегазовая промышленность



Медицина

Классификация жаропрочных сплавов

Жаропрочные сплавы делятся на три группы: на никелевой основе, на основе железа и на кобальтовой основе. Физико-механические свойства и обрабатываемость каждой группы различаются в значительной степени, как из-за химической природы сплава, так и вследствие различий в металлургических методах получения и термической обработки, осуществляемых в процессе производства. На последующую обрабатываемость особенно влияет, подвергался ли сплав отжигу или старению.

Сплавы на основе никеля применяются наиболее часто, и составляют более 50% массы современного авиационного двигателя. В будущем в новых двигателях эта доля будет увеличиваться.

Наиболее распространенные марки:

- Inconel 718, Waspaloy, Udimet 720 – дисперсионно-твердеющие сплавы
- Inconel 625 – закаливаемые

Сплавы на основе железа являются технологическим усовершенствованием аустенитных нержавеющей сталей.

Некоторые из них имеют очень низкий коэффициент теплового расширения (такие как Incoloy 909), что делает их особенно пригодными для валов, колец и корпусных

деталей. Однако из трех групп жаропрочных сплавов именно сплавы на основе железа в наибольшей степени теряют механические свойства при нагреве.

Распространенные виды:

- Inconel 909
- A286
- Greek Ascology

Сплавы на основе кобальта обладают большей коррозионной стойкостью при высоких температурах по сравнению со сплавами на никелевой основе. Они более дорогостоящие и их сложнее обрабатывать из-за повышенной износостойкости. Их применение в турбинах ограничивается деталями, непосредственно взаимодействующими со сгораемым веществом в самых нагреваемых частях двигателя.

Бурно растущая область применения этих сплавов – это производство хирургических имплантантов, где важна присущая им химическая инертность.

Распространенные виды:

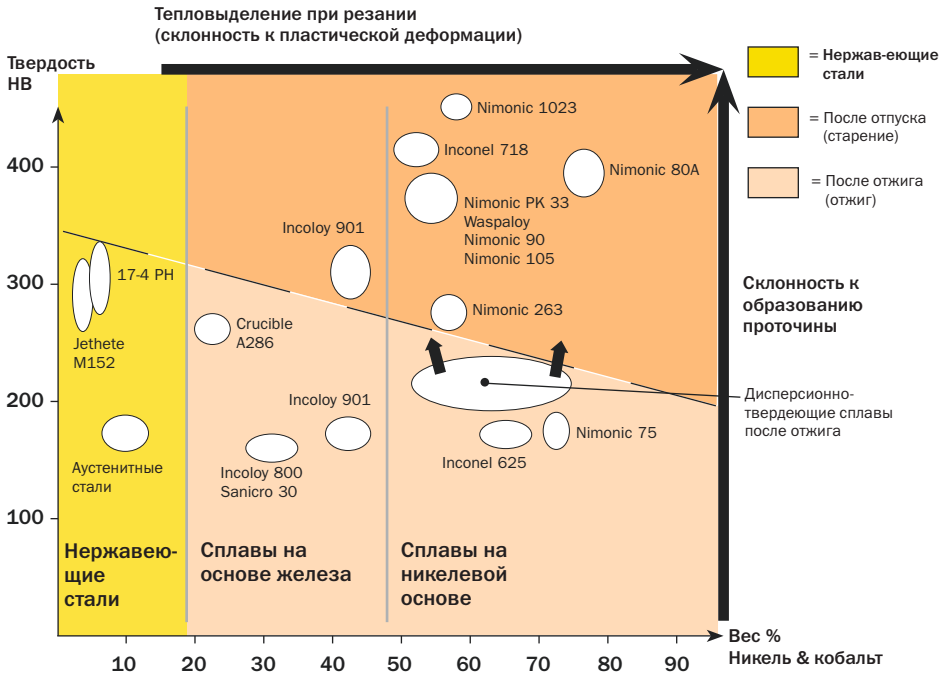
- CoCr
- Haynes 25
- Stellite 31

Наиболее часто применяемые жаропрочные сплавы см. полный список на стр. 120.

Основа сплава	Код		Материал	Твердость HB	
				После отжига	После старения
Никель	MC S2.0.Z.AN	CMC 20.2	Inconel 718	200	425
			Inconel 706		285
Железо	MC M1.0.Z.PH MC S2.0.Z.AN	CMC 05.3 CMC 05.4 CMC 20.21	Inconel 625	160	350
			Hastelloy S		
Кобальт	MC S3.0.Z.AG	CMC 20.3	Hastelloy X	280	340
			Nimonic PK33		
			Udimet 720		
			Waspaloy		
			Greek Ascology		300
			A286		300
			Incoloy 909		
			Haynes 25		
			Stellite 21		
			Stellite 31		

При таком широком спектре материалов под общим названием жаропрочные сплавы, обрабатываемость может значительно изменяться даже в рамках одной группы

сплавов. Даже для одного и того же материала в действительности существует множество рекомендации по обработке.



Обрабатываемость/ состояние поставки

Термообработка

После отжига	– нагревание до определенной температуры, затем охлаждение с управляемой скоростью.	<30HRC
После закалки	– нагрев с последующим быстрым охлаждением.	<30HRC
После отпуска	– медленное охлаждение после закалки	up to 48HRC

Термообработка изменяет твердость детали, и таким образом, влияет на виды износа. Характер образования стружки – хороший показатель твердости. Стружколомание происходит легче, когда материал твердый.

Обработка закаленных материалов сопряжена с увеличением температуры в зоне резания и отличается склонностью к образованию проточки режущей кромки на глубине резания. Но, сочетание в инструменте малого угла в плане, твердой износостойкой основы твердого сплава

и износостойкого покрытия, создающего тепловой барьер, позволяет достичь хороших результатов.

Более мягкие материалы в обработке схожи с нержавеющей стали.

Из-за меньшей температуры в зоне резания допустимы пластины из твердого сплава с меньшей красностойкостью, но высокой прочностью (сходящая стружка может повреждать пластину даже вне зоны резания).

Виды износа в зависимости от твердости материала и сплава пластины

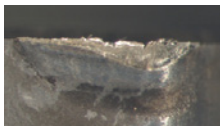
CNMX 1204A1-SM – v_c 50 м/мин, f_n 0.25 мм/об, a_p 1.5 мм

Твердый материал

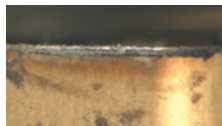
GC1105

S05F

6 мин.



12 мин.



Мягкий материал

GC1105

S05F

7 мин.



3.5 мин.



Выкрашивание сходящей стружкой

Технология получения заготовки

В зависимости от требований к размеру, форме и прочности детали, выбираются различные технологические способы получения заготовки.

Они влияют обрабатываемость материала и характер износа инструмента.

Материал	Детали	Преимущества/пригодность	Обрабатываемость
Поковки	крупногабаритные	высокая прочность	средняя
Литье	сложной формы	низкая прочность	неудовлетворительная
Прутковая заготовка	<200 мм в диаметре	доступность/ высокая прочность	хорошая

Каждый из этих типов сырья непосредственно влияет на микроструктуру сплава, а также определяет последующую обрабатываемость:


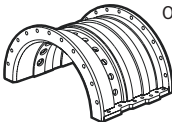


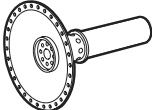
Поковки имеют более мелкий размер зерна, чем отливки, что улучшает прочность. Волокна имеют направленный характер. При обработке поковок, снижением скорости резания и увеличением подачи добиваются максимально возможной объемной производительности удаления металла в сочетании с высокой стойкостью инструмента.

При обработке отливок, напротив, более продуктивны низкая подача (толщина стружки 0.1 мм) и высокие скорости. Литые детали имеют неудовлетворительную обрабатываемость, а также в большей степени склонны к образованию проточкины и абразивному износу. Их легко распознать по явно крапчатой обработанной поверхности (эффект «апельсиновой корки»). Прутковый материал – наиболее легкое для обработки сырье. Образование проточкины не является проблемой, что позволяет использовать более твердые и износостойкие пластины, чем для поковок.



Распространенные типы деталей

Типовые детали из жаропрочных сплавов и распределение трудоемкости по видам обработки:

Детали авиадвигателей и газовых турбин – жаропрочные сплавы на основе никеля

Деталь	Точение	Фрезерование	Сверление	Другое
 Диски	60%	10%	5%	25%
 Оболочки	45%	40%	15%	
 Кольца	95%		5%	
 Лопатки Моноколеса Импеллеры	10%	50%		40%
 Валы	70%	5%	25%	

Медицина – сплавы CoCr

Деталь	Точение	Фрезерование	Сверление	Другое
 Чашка	90%		10%	
 Головка	90%		10%	

Требования к подаче СОЖ

Охлаждающую жидкость следует применять во всех операциях за исключением фрезерования с использованием керамики. Поток жидкости должен быть большим и точно направленным.

В настоящее время подача охлаждающей жидкости (под давлением до 80 бар) широко применяется и дает положительные результаты в отношении стойкости и стабильности.

Специализированный инструмент для подачи СОЖ под высоким давлением с фиксированными соплами создает параллельные ламинарные струи СОЖ точно направленные в зону между режущей пластиной и стружкой.

При фрезеровании и сверлении все инструменты с внутренним подводом СОЖ позволяют использовать эффект подачи под высоким давлением. Для получения высокого давления применяются сопла с отверстиями небольших диаметров.

- Точение, минимальный расход 20 л/мин при базовом давлении 70 бар.
- Фрезерование и сверление, минимальный расход 50 л/мин при использовании специальных сопел для фрез и сверл больших диаметров.



Применение СОЖ под высоким давлением улучшает стружколомание.

CNGG 120408-SGF
 v_c 65 м/мин, a_p 1.0 мм, f_n 0.2 мм/об
Inconel 718



CoroTurn HP, 80 бар



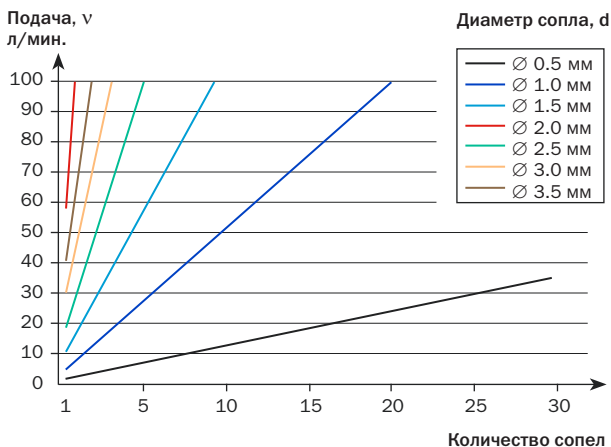
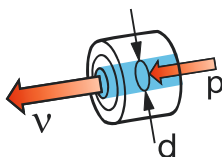
Обычный инструмент

Сравнение стружки, сделанной CoroTurn HP и обычным инструментом при стандартном давлении СОЖ.

Производительность насоса, необходимая для создания давления 80 бар при определенном диаметре сопла

Давление (р), попадающее в зону резания, зависит от числа сопел, их диаметра (d) и производительности насоса (v).

Для инструмента с большим количеством отверстий или отверстий большого диаметра необходим больший расход СОЖ.



2. Точение материалов на никелевой основе

– детали аэрокосмических двигателей и стационарных газовых турбин

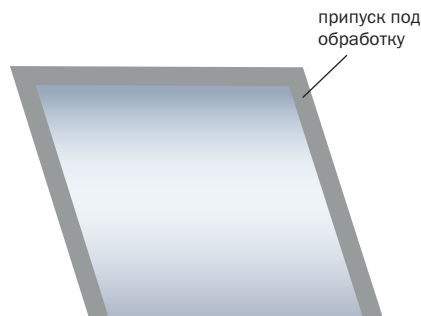
Классификация стадий обработки

Производственный цикл обработки жаропрочной детали можно разделить на три стадии, для каждой из которых необходимо учитывать особые требования к инструменту и качеству обработанной поверхности.

Предварительная обработка – глубина резания до 10 мм

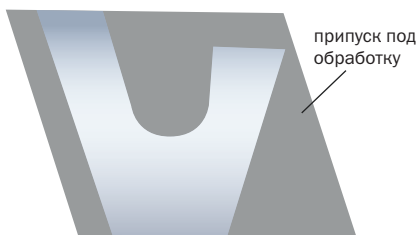
Кованые детали часто имеют корку или окалину. Они обычно обрабатываются в мягком состоянии (твердость 26 HRC), с целью придания заготовке основной формы детали. Твердые сплавы с покрытием и без, используются на большой подаче, при возможно большей глубине резания и в тоже время низкой скорости резания. При хороших условиях обработки и на ровных поковках возможно также использование режущей керамики. Здесь приоритетом является производительность, измеряемая удельным съемом металла. За весь процесс предварительной обработки может быть удалено до 80% первоначального веса заготовки. Формы детали просты, поэтому при точении можно использовать стандартные державки и пластины.

Многие ответственные детали имеют кольцо-свидетель, отрезаемое на этой стадии обработки для анализа качества материала. Пластины CoroCut с геометрией TF из сплава GC1105 наилучшим образом подходит для данной операции.



Промежуточная обработка – глубина резания от 0.5 до 5 мм

На этот этап, заготовка передается после термической обработки, и обычно находится в конечном твердом/ состаренном состоянии (твердость обычно от 36 до 46 HRC). Первоначальная форма уже получена на стадии предварительной обработки. Промежуточная стадия включает обработку профиля детали путем точения различной глубиной резания. Точность умеренная. Основная цель оставить тонкий равномерный припуск. В этом случае важным фактором является не только производительность, но и надежность работы инструмента. Режущая керамика обеспечивает максимальную производительность, если позволяет форма детали и ее жесткость. Из-за сложной формы деталей стадия промежуточной обработки может включать глубокую прорезку канавок и обработку профиля, для чего необходимо большое количество специальных державок.



Окончательная обработка – глубина резания от 0.2 до 1 мм

На стадии окончательной обработки снимается наименьшее количество материала, но при этом предъявляются самые высокие требования к качеству поверхности. На этой решающей стадии производства инструмент, траектория инструмента и режимы резания иногда утверждаются согласно требованиям спецприемки. Как правило, детали окончательно обрабатываются твердосплавными острокромочными пластинами, чтобы гарантировать минимальную зону наклепа и ограничения зоны остаточных напряжений у обработанной детали.



Факторы, в наибольшей степени влияющие на уровень остаточных напряжений, включают:

Скорость – не выше 60 м/мин для ответственных деталей.

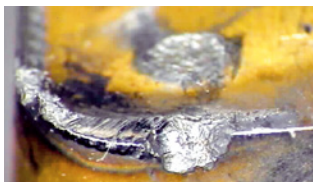
Износ инструмента – максимум 0.2 мм – используйте сплав S05F.

Толщина стружки Толщина стружки (в зависимости от комбинации подачи и радиуса при вершине) – если обработка производится пластинами с большим радиусом, то следует увеличить подачу, чтобы избежать излишнего упрочнения поверхности (толщина стружки менее 0.1 мм опасна) (см. стр. 18).

Виды износа

При использовании инструментов из твердых сплавов преобладают два вида износа: пластическая деформация и

образование проточкины. Перед выбором надлежащего сплава и стратегии обработки, важно определить, какой износ превалирует.

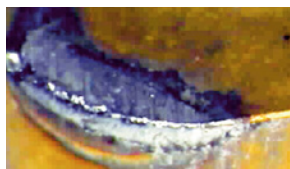


Образование проточин на главной режущей кромке – это механический износ, образуемый на глубине резания. Степень образования проточин непосредственно зависит от следующих параметров:

	Отсутствие проточкины	↔	Склонность к проточине
Главный угол в плане	Круглые пластины		C/DNMG 95 градусов
Глубина резания	Меньше радиуса при вершине		Больше радиуса при вершине
Геометрия	Позитивный		Негативный
Твердость заготовки	Мягкое состояние		Закаленный
Тип заготовки	Пруток	Поковка	Отливка
Сплав	Мелкозернистый твердый сплав с покрытием PVD (GC1105)	CVD (S05F)	Керамика (CC6060/CC6065/CC670)

Образование проточкины является критическим видом износа на стадии промежуточной обработки, так как обрабатываемый материал твердый, а

глубина резания довольно велика. Для уменьшения образования проточин используйте как можно меньший угол в плане.



Пластическая деформация/износ по задней поверхности является результатом действия высоких температур и высокого давления на режущую кромку. В то время как образование проточкины в большей степени зависит от условий обработки, износ в виде пластической деформации определяется свойствами самого твердого сплава. Хорошая износостойкость и красностойкость снижают вероятность пластической деформации.

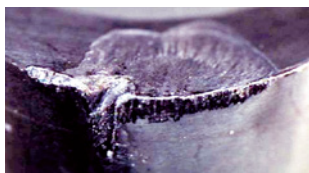
В случае чрезмерного износа задней поверхности используйте более износостойкие сплавы и уменьшите скорость резания.

Износостойкость задней поверхности Красностойкость	Точение	Обработка канавок
	Керамика	CC6060, CC6065 CC670
Твердый сплав	S05F	
	GC1105	GC1105
	GC1115	
	H13A	H13A
	GC1125	GC1125
	GC2025	GC2135
Прочность	GC2035	GC1145

Отслаивание вершины. Этот тип износа характерен для пластин из керамики при обработке жаропрочных материалов. Тонкие слои материала режущего инструмента отслаиваются от верхней поверхности пластины. Когда задняя поверхность пластины изнашивается до определенной степени, со стороны детали на периферию становится достаточным для отделения тонких слоев с вершины.

Отслоенная часть образует острую кромку, которая вновь может хорошо резать. При этих условиях на стадиях черновой и получистовой обработки этот процесс может продолжаться долгое время, не представляя угрозы для общего качества.

При чистовой обработке, где предъявляются особые требования к качеству поверхности и/или образованию заусенцев, отслаивание вершины может быть особенно критично. Этот процесс также увеличивается при увеличении подачи из-за повышенного радиального давления.



Отслаивание вершины пластины

Способы сокращения отслаивание вершины

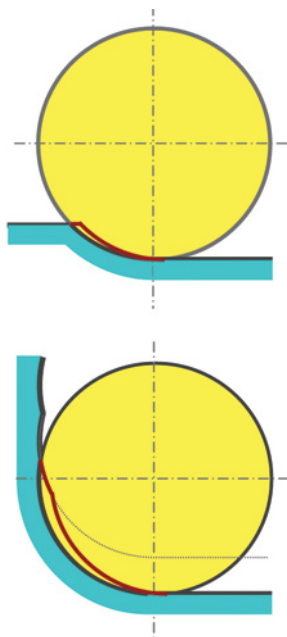
В стабильных условиях:

Уменьшение давления резания, сократив

- зону схода стружки:
 - скорость подачи
 - глубина резания
 - дуга контакта
- Использование оптимальных методов программирования
- Применение более прочной армированной керамики СС670 .

В нестабильных условиях, где износ верхнего слоя вызван вибрацией:

- Уменьшение угла контакта программными методами
- Применение СС6065 вместо СС6060

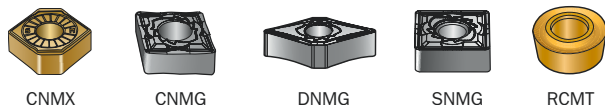


Выбор формы пластины

Главный угол в плане – κ_r

При черновой обработке стандартным типом пластины C/D/SNMG угол в плане постояен независимо от глубины резания.

Однако при использовании круглых пластин угол в плане изменяется от 0 до 90° в зависимости от соотношения глубины резания и диаметра.

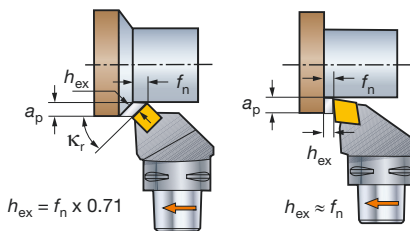


Влияние угла в плане

Образование проточкины в пластинах является основной проблемой при обработке жаропрочных сплавов. Этот вид износа чаще всего встречается, когда глубина резания больше радиуса при вершине, а угол в плане близок 90° (если глубина резания меньше радиуса при вершине, кинематический угол в плане уменьшается, даже когда угол для самой пластины равен 90°).

Принимая во внимание некоторые общие правила и используя более эффективные сплавы, износ можно контролировать.

- По возможности, используйте меньший угол в плане (макс 60° , мин 25°) – например для SNMG и CNMX $\kappa_r = 45^\circ$.
- Круглые пластины – угол в плане не должен превышать 45° , что соответствует глубине резания не более 0.15 от диаметра.



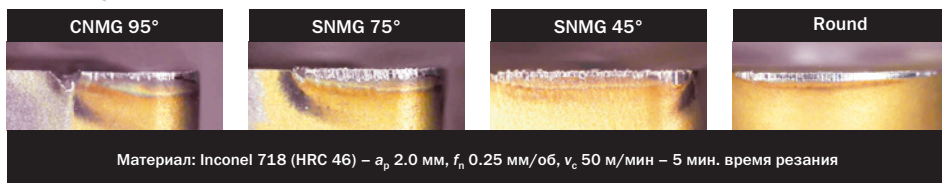
$$h_{ex} = f_n \times 0.71$$

h_{ex} = максимальная толщина стружки

- Обработка с врезанием. Запрограммируйте изменяющуюся глубину резания для каждого прохода. Это позволяет распределить образование проточкины по всей длине режущей кромки, увеличивая стойкость и делая износ более предсказуемым. Данный способ в основном используется при работе с керамикой и круглыми пластинами.

Влияние угла в плане на вид износа

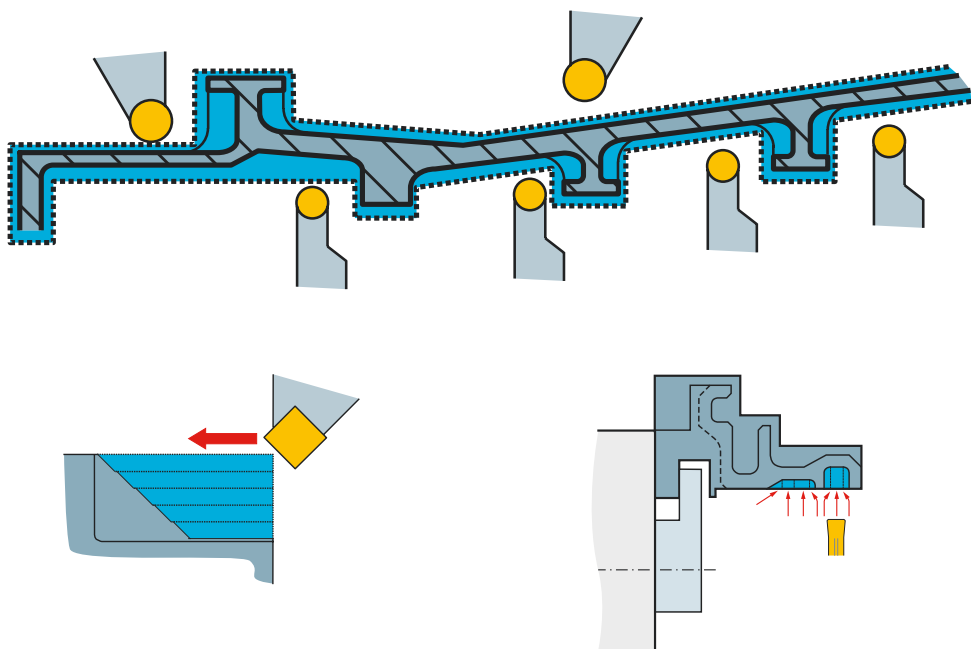
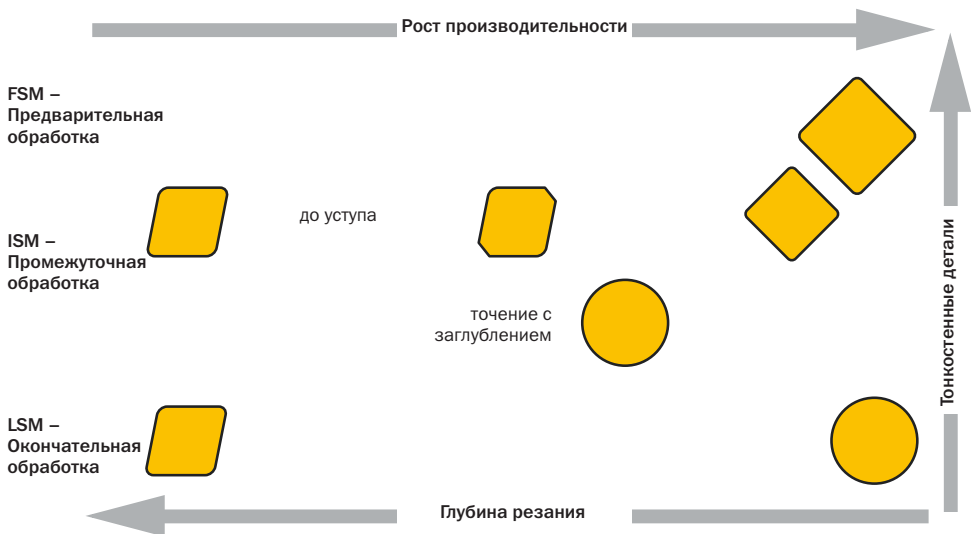
Низкие ← Отжимающие усилия → Высокие



Материал: Inconel 718 (HRC 46) – a_p 2.0 мм, f_n 0.25 мм/об, v_c 50 м/мин – 5 мин. время резания

← Образование проточкины Отсутствие проточкины →

Выбор пластины в зависимости от вида обработки



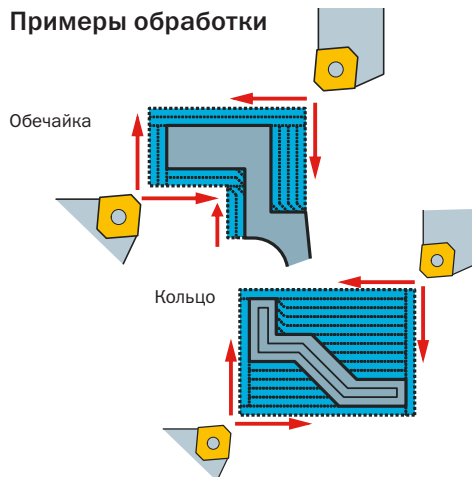
Пластина Xcel – высоко продуктивная обработка уступов



Пластины Xcel это инструментальное решение для лучистового точения уступов. В одной пластине сочетаются плюсы квадратной и удобство ромбовидной пластин:

- снижение склонности к износу и увеличение подачи по сравнению с ромбовидными пластинами.
- снижение отжимающих усилий и постоянная толщина стружки по сравнению с круглыми пластинами.
- геометрическая проходимость выше по сравнению с квадратными пластинами, в дополнение к возможности продольной и поперечной обработки, а

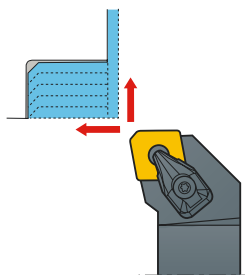
Примеры обработки



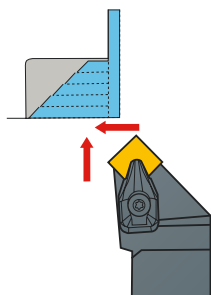
также наличию строго определенной точки привязки для точного измерения вылета режущей кромки.

Повышенная стойкость, надежная обработка, улучшенные параметры резания сочетаются в одном инструменте. Для обеспечения глубины резания до 2,7 мм на промежуточной стадии обработки, пластина выпускается в двух исполнениях. Она изготавливаются из различных сплавов, предназначенных для материалов ISO S.

Форма С



Форма S



Обозначение пластины	Max a _p мм
CNMX 1204A1-SM	1.7
CNMX 1204A2-SM	2.7

Рекомендации по виду сплава – первый выбор

<35 HRC	S05F	
>35 HRC	GC1105	
Титановые сплавы	H13A	
Сплавы на основе железа		GC2015

Пластины подходят для стандартной державки для пластин CNMG, но с учетом конструкции необходима специальная опорная пластина.

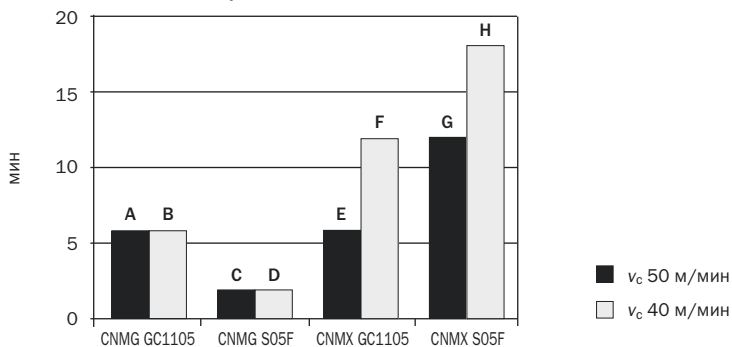
Специальные опорные пластины

5322 234-07 для T-Max P крепление рычагом

5322 234-08 для CoroTurn крепление жестким прихватом RC



Сравнение стойкости при обработке материала – Inconel 718 (HRC 46) a_p 1.7 мм, f_n 0.25 мм/об

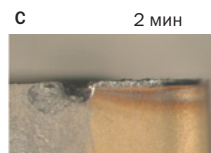
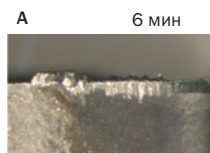


CNMG

■ v_c 50 м/мин

GC1105

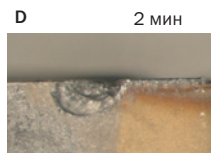
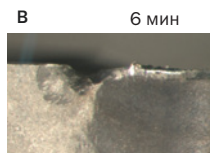
S05F



□ v_c 40 м/мин

GC1105

S05F

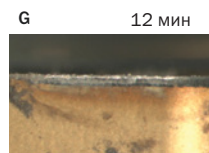
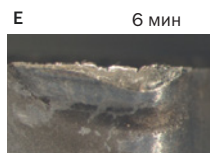


CNMX

■ v_c 50 м/мин

GC1105

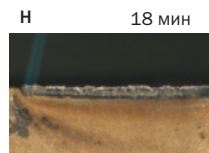
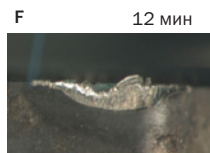
S05F



□ v_c 40 м/мин

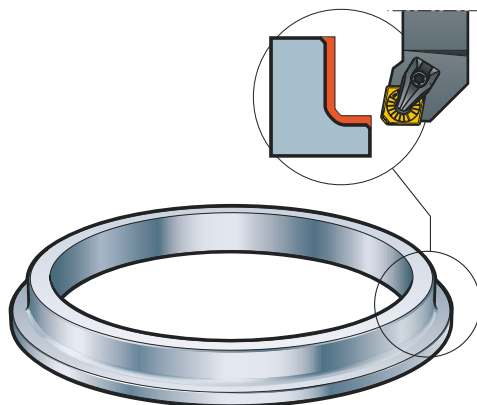
GC1105

S05F



Точение жаропрочных сплавов

Пластина Xcel позволяет добиться удвоения производительности при обработке жаропрочных сплавов на никелевой основе, за счет увеличения режимов резания и обеспечить большую стойкость.



Исходные данные

Материал: NIMONIC PE 16
Кольцо, диаметр 650 мм
Глубина резания: 1.7 мм

Конкурент



Xcel



Пластина:

Конкурент

CNMX 12 04 A2-SM
сплав GC1005

Подача:

0.2 мм/об

0.3 мм/об

Скорость резания:

32 м/мин

50 м/мин

Стойкость деталей/ кромка:

1 детали

2 детали

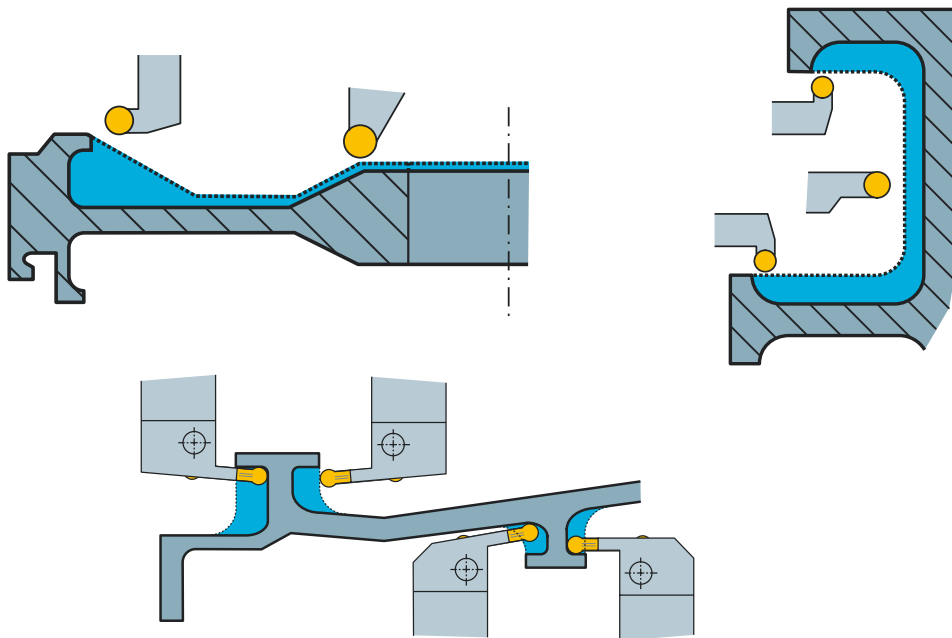
Результат

Увеличение производительности более чем на 100 %
Уменьшение времени резания с 8 мин До 3.5 мин.

Круглые пластины и пластины CoroCut® с RO геометрией

Круглые пластины – это наиболее прочные пластины, обеспечивающие высокую производительность. Обычно авиационные детали имеют крупные габариты, причем

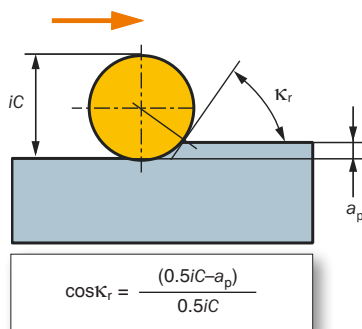
большие радиусы и плавные профили, спроектированные для устранения внутренних напряжений, делают возможным использование круглых пластин.



Угол в плане – κ_r

Наилучшее качество обработки достигается, когда угол в плане остается меньше 45° . При этом глубина резания составляет до 0.15 от диаметра пластины (абсолютная глубина резания не должна превышать 0.25 от диаметра).

Если глубина резания превосходит 25% от диаметра круглой пластины, лучше перейти на квадратные пластины с постоянным 45° углом в плане.



Примечание: этот принцип вычислений применим ко всем пластинам, когда глубина резания меньше радиуса при вершине.

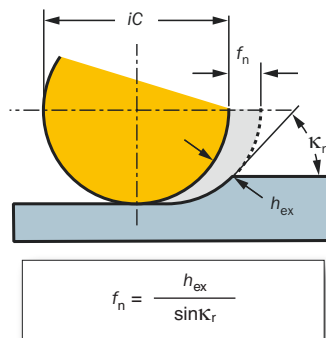
Толщина стружки

Толщина стружки меняется для круглых пластин и зависит от угла в плане. Если отношение глубины резания к диаметру невелико, подача может быть увеличена, чтобы сохранить толщину стружки на желаемом уровне.

Рекомендуемая толщина стружки h_{ex} для жаропрочных сплавов:

Твердый сплав от 0.1 до 0.35 мм

Керамика от 0.08 до 0.15 мм



Диаметр пластины a_p/iC	Глубина резания для диаметра пластины, в мм								Угол в плане κ_r	Коэффициент изменения подачи	Подача min/ max мм/об	
	3	4	5	6	8	10	12	16			h_{ex} 0.1 мм	h_{ex} 0.35 мм
0.25	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5	3	4	60°	1.16	0.12	0.41
0.2	0.6	0.8	1	1.2	1.6	2	2.4	3.2	53°	1.25	0.13	0.44
0.15	0.45	0.6	0.75	0.9	1.2	1.5	1.8	2.4	46°	1.4	0.14	0.49
0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.2	1.6	37°	1.66	0.17	0.58
0.05	0.15	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	26°	2.3	0.23	0.81

Например

Пластина CoroCut RO диаметр 6 мм

Глубина резания 0.9 мм, что соответствует углу в плане $\kappa_r = 46^\circ$.

Для обработки с:

толщиной стружки min 0.1 мм правильная подача 0.14 мм/об.

толщиной стружки max 0.35 мм правильная подача 0.49 мм/об.

Качество обработки поверхности

Шероховатость поверхности напрямую зависит как от радиуса при вершине, так и от значения подачи. Чтобы получить то же самое качество обработки поверхности, с маленьким радиусом при вершине потребуется уменьшение подачи, в сравнении со случаем, когда используется большой радиус при

вершине. На практике это означает, что маленький радиус приводит к снижению производительности. Таким образом, для повышения производительности радиус при вершине должен быть максимально возможным, причем наибольший обеспечивают круглые пластины.

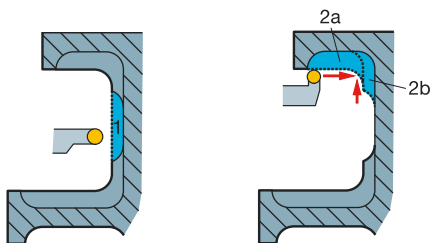
Максимальная подача f_n мм/об, чтобы получить шероховатость поверхности R_{max} 8.0 – R_a 1.6 μm – N7								
f_n	Радиус при вершине, мм				Диаметр пластины, мм			
	0.4	0.8	1.2	1.6	8	10	12	16
	0.17	0.22	0.27	0.32	0.5	0.57	0.62	0.7

Рекомендации по применению

«Закусывание» представляет собой проблему, возникающую при использовании круглых пластин, для обработки с врезанием и обработки контуров в углах. Из-за большого углового охвата, повышаются силы резания, поэтому подачу необходимо уменьшать. Чтобы избежать «закусывания», следует применять оптимизированные стратегии программирования наряду с меньшими радиусами пластин.

Рекомендации

- 1) Никогда не используйте простое прямое врезание.
- 2) Применяйте радиусное врезание на входе и выходе.
- 3) Черновая обработка – радиус обката не меньше диаметра пластины.
- 4) Чистовая обработка – диаметр пластины не превышает 1.75 от радиуса программируемой траектории

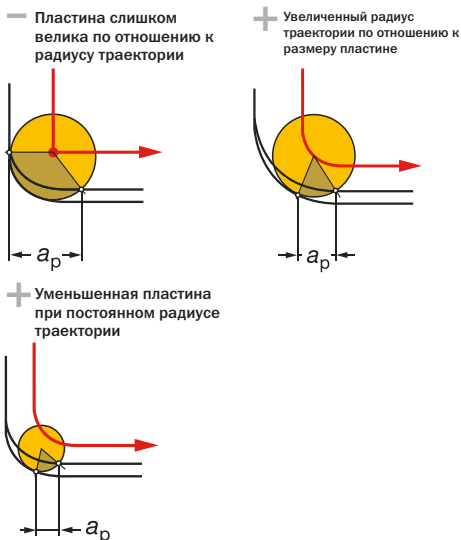


Рекомендации по программированию

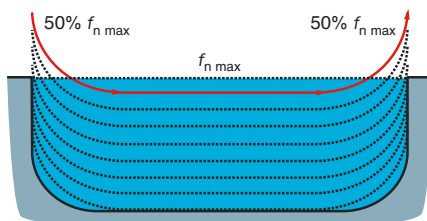
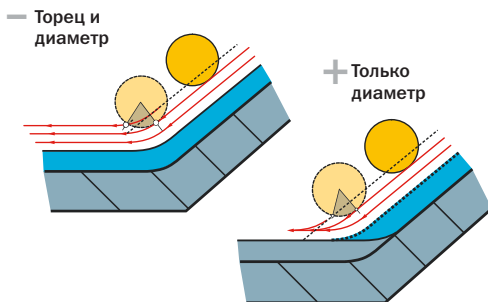
Из-за проблемы «закусывания» на перегибах, подачу следует уменьшать по мере увеличения глубины резания. Чем больше разница между радиусом траектории и диаметром пластины, тем меньше необходимость уменьшения подачи. Однако хорошей начальной позицией является 50% снижение подачи на криволинейных участках траектории по сравнению с прямолинейными проходами.

Трохоидальное точение

Припуск разбивается на тонкие слои. Данный метод можно использовать для любых видов профильной обработки. При применении пластин CoroCut и RCGX с задними углами направление перемещений может быть реверсивным для наиболее полного использования длины режущей кромки и сокращения затрат времени на холостые ходы.



Припуск на конструктивном элементе детали следует разбить так, чтобы торец и диаметр не обрабатывались одновременно, так как это закономерно увеличит глубину резания и опасность «закусывания».



Запрограммированный радиус = диаметр пластины

Материалы режущего инструмента

Выбор твердого сплава при обработке жаропрочных сплавов не следует рассматривать только с точки зрения чистовой и черновой обработки. Пластическая деформация (ПД) проявляется во всех операциях, тогда как образование проточки можно контролировать, изменяя угол в плане.

На практике это означает, что решение, принимаемое относительно выбора сплава, зависит от формы пластины. GC1105 является оптимальным универсальным сплавом для работы в любой области.

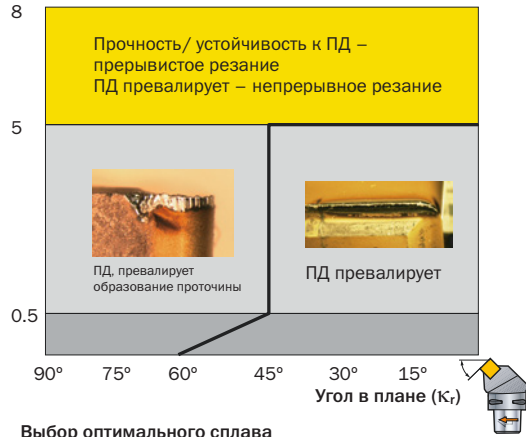
Диаграмма эффективности сплава в зависимости от формы пластины.

= FSM 26 HRC
 = ISM 46 HRC
 = LSM 46 HRC

Проточина = проточина на глубине резания

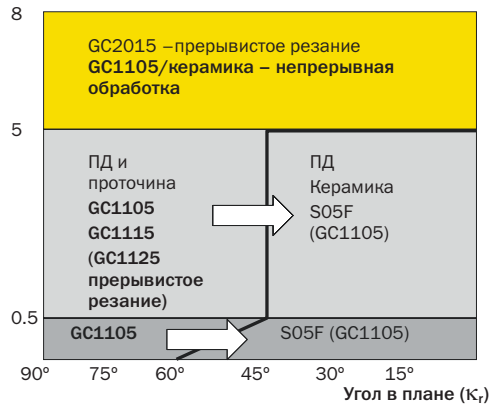
Виды износа по зонам

Глубина резания (a_p) мм



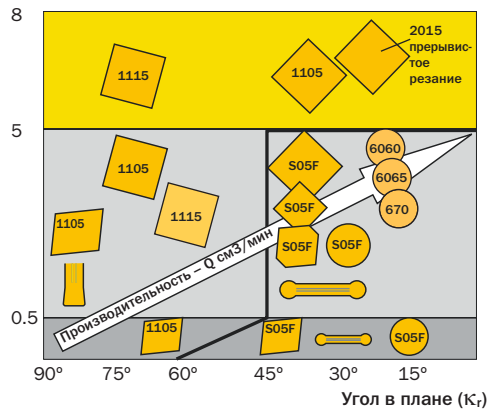
Выбор оптимального сплава

Глубина резания (a_p) мм



Выбор оптимального сплава

Глубина резания (a_p) мм



Керамические сплавы

Использование пластин из режущей керамики гарантирует высокую производительность при черновой обработке на предварительной стадии и промежуточной обработке. Их применение значительно отличается от твердых сплавов в силу ряда особенностей:

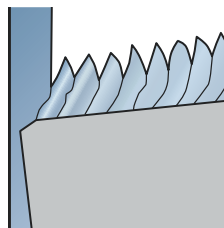
- высокой термостойкости керамики – допускается применять высокую скорость резания, чтобы использовать высокую температуру в зоне для разупрочнения стружки.
- низкой прочности – может привести к выкрашиванию кромки, отслоению вершины и образованию проточины.

Оба эти фактора означают, что для успешного применения необходимо соблюдать следующие правила:

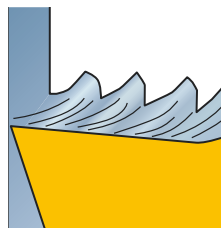
- Оптимальный угол в плане, позволяющий снизить образование проточин составляет примерно 45° , рекомендуется применять круглые или квадратные пластины.
- Максимальная толщина стружки – 0,8...0,15 мм.
- использовать оптимизированные траектории обработки для минимизации проточин при входе и выходе на проход и контроля дуги охвата при подрезании уступов.

Существуют два вида режущей керамики, используемых при обработке жаропрочных сплавов:

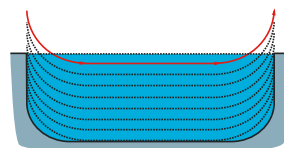
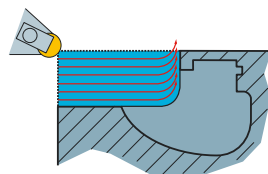
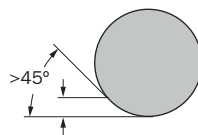
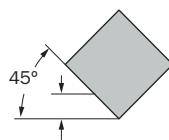
- **Sialon** – (кремний, алюминий, кислород, азот) – соединение нитрида кремния и оксида алюминия, которое имеет наилучшую химическую стойкость к образованию проточины:
 - CC6060 – оптимизированный выбор для наибольшей длины контакта с обрабатываемой поверхностью пластинами RNGN и для обработки профилей/глубоких канавок с врезанием, применяя оптимизированные методы программирования.



Режущая керамика

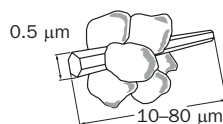


Твердые сплавы

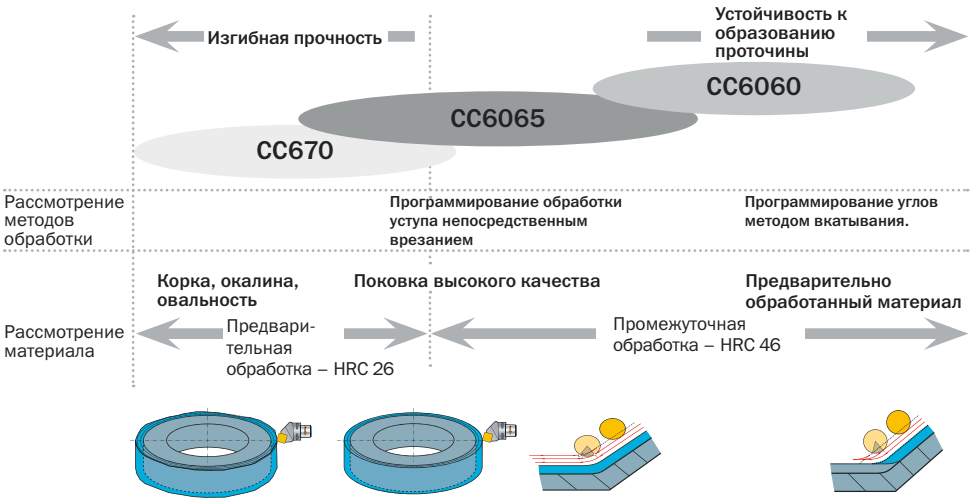


- CC6065 – предназначен для черновой обработки в тяжелых условиях, плунжерной стратегии и обработки углов.

- **Вискеризованная керамика** – чтобы гарантировать повышенную прочность по сравнению с традиционными керамическими сплавами, усилена волокнами карбида кремния:
 - CC670 – первый выбор для обработки кованых деталей с окалиной или овальностью.



Области применения сплавов



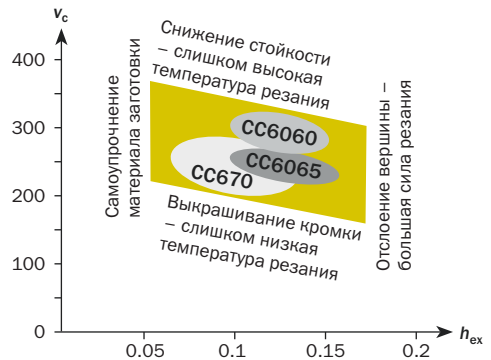
Режимы резания

Скорость следует выбирать таким образом, чтобы обеспечить достаточное нагревание в области резания для пластифицирования стружки, но при этом оно не должно происходить перегрева и интенсивного износа пластины.

Подача должна определяться в соответствии с толщиной стружки, которая должна быть достаточной, чтобы не вызывать упрочнения заготовки, но и не быть слишком толстой, чтобы избежать выкрашивания кромки.

Увеличение подачи и глубины резания требуют снижения скорости резания.

Эти показатели изменяются в зависимости от твердости поверхности детали и структуры обрабатываемого материала (размера зерна).



Рекомендуемые режимы резания (RNGN 12, RCGX 12) – Inconel 718 (HRC от 38 до 46)

Сплав	Скорость резания, v_c	Глубина резания, a_p	Подача, f_n
SS670	200 - 300 м/мин	2 мм	0.1 - 0.15 мм/об
SS6065	200 - 250 м/мин	2 мм	0.15 - 0.2 мм/об
SS6060	250 - 300 м/мин	2 - 3 мм	0.15 - 0.2 мм/об

Рекомендации по применению круглых пластин

Устранение повреждений – механизм износа

Отслоение вершины

Причина	Способ устранения
Слишком большая сила резания	Снизить подачу Уменьшите глубину резания a_p при использовании круглой пластины Используйте керамику CC670



Образование проточки

Причина	Способ устранения
Инструментальный материал чувствительный к нагрузкам	Точные методы программирования
Характерно для твердых сплавов	Уменьшите угол в плане Используйте CC6060, CC6065



Рекомендации по применению пластин из режущей керамики

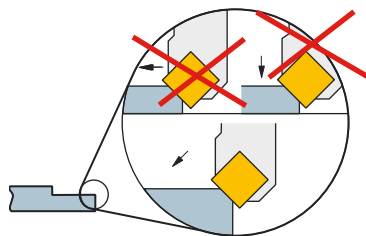
Выбор пластины

- Если возможно, используйте круглые или квадратные пластины с малым углом в плане и большим радиусом при вершине.
- Всегда используйте наибольший угол при вершине.
- Толстые пластины обеспечивают дополнительную прочность.



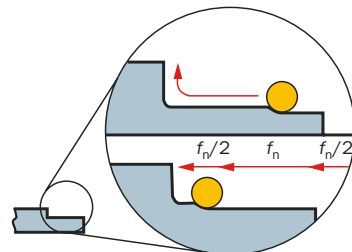
Технологическая заходная фаска

- защищает пластину при первом входе от начального выкрашивания/образования проточки.
- Чтобы избежать образования проточки при снятии фасок, используйте направление подачи в 90° по отношению к производимой фаске.



Обработка уступов:

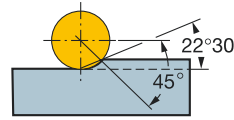
- Пластина должна обкатывать уступ по траектории с радиусом, превышающим диаметр пластины, во избежание скачкообразного увеличения глубины резания.
- Уменьшите подачу на 50% ($f_n/2$) при обработке уступа из-за увеличения глубины резания.



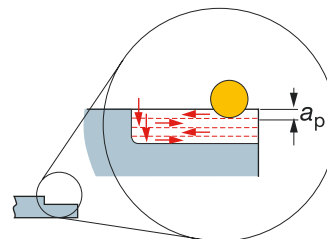
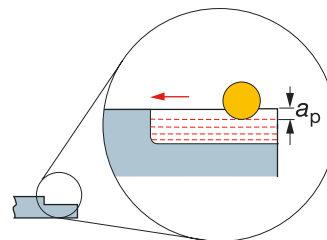
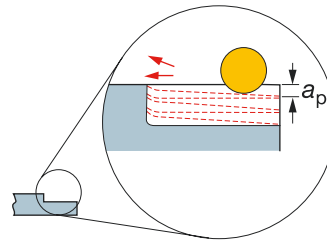
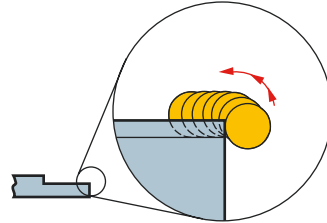
Предотвращение образования проточки

Образование проточки можно свести к минимуму при хорошем планировании операций и учете некоторых общих рекомендаций:

- По возможности применяйте круглые режущие пластины. При этом соотношение между глубиной резания a_p и диаметром режущей пластины не должно превышать 25%.
- Используйте угол в плане 45° , когда глубина резания превышает 25% IC.
- Заглубление методом «накатывания» на припуск устраняет необходимость предварительного снятия фасок и снижает образование проточин. При этом на режущей кромке один участок будет воспринимать нагрузку при врезании в поверхность детали, а второй участок будет находиться на линии a_p .
- Обработка с врезанием обеспечивает распределение повреждения по всей режущей кромке. Глубина резания должна изменяться в пределах от 25% IC до 15% (не снижайте глубину резания до нуля).
- Множественные проходы при различной глубине резания можно считать альтернативным выбором.
- При использовании пластин RCGX/RPGX задайте программу в обоих направлениях, чтобы максимально использовать кромки пластины.



MM	MM
6.35	0.9
9.52	1.4
12.70	1.9
19.06	2.8
25.40	3.8



Твердые сплавы

GC1105

Мелкозернистый твердый сплав с покрытием TiAlN PVD, обладающий хорошей красностойкостью и прочностью. Он оптимизирован под режущие пластины с углом в плане 95°, однако демонстрирует отличные характеристики на всех этапах обработки.

Покрытие обеспечивает отличную адгезию, необходимую при низкой подаче и малой глубине резания. Острые кромки SGF шлифованной пластины, в комбинации с GC1105, идеально подходит для низкоскоростной суперфинишной обработки элементов, чувствительных к вибрации.

GC1115

Микрозернистый твердый сплав, обеспечивающий надежность при высоких требованиях к прочности режущей кромки, например, решение проблем образования проточин или повреждения стружкой.

Покрытие PVD содержит TiAlN, повышающий прочность режущей кромки, и оксид алюминия и хрома, снижающий

образование наростов и появления лункообразного износа. Сочетание прочности и износостойкости делает сплав GC1115 идеальным для применения в нестабильных условиях.

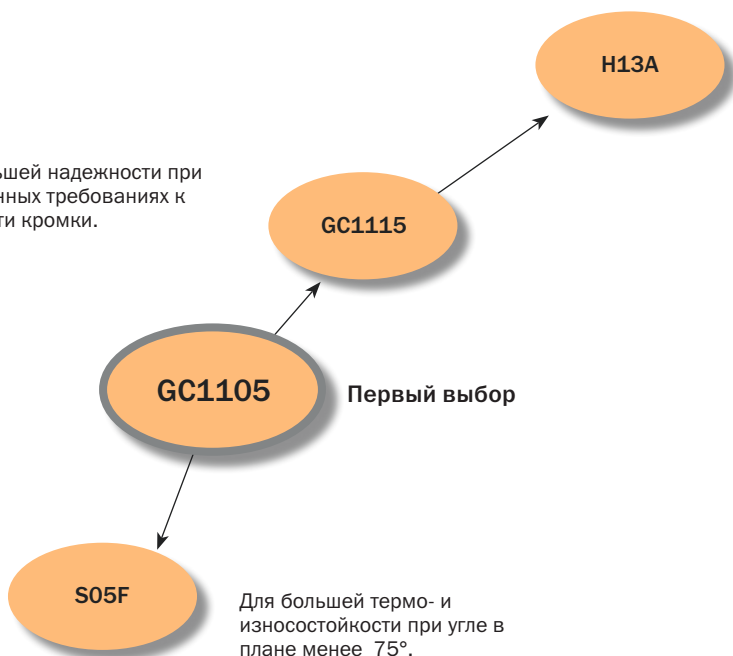
S05F

Это мелкозернистый сплав с покрытием CVD и отличной красностойкостью. Сплав оптимален для случаев применения инструментов с углом в плане 45° (квадратные, круглые пластины, пластины CoroCut RO, а также для чистовой обработки). Покрытие CVD обеспечивает отличный тепловой барьер, способствующий повышению производительности и стойкости на промежуточной стадии и стадии окончательной обработки.

Этот сплав оптимизирует производительность, однако не используется с углом в плане более 75° из-за нестойкости к образованию проточкины.

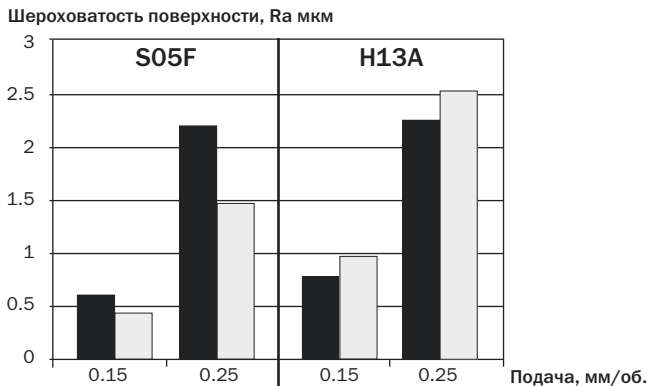
При необходимости повышенной прочности или требуется сплав без покрытия.

Для большей надежности при повышенных требованиях к прочности кромки.

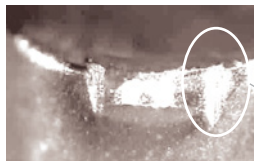


Сравнение качества обработки поверхности

■ = Новая пластина
□ = Изношенная пластина

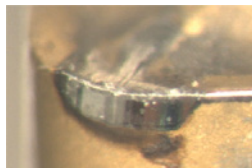


Испытание сплава S05F при обработке жаропрочными сплавами на никелевой основе на скорости 40 м/мин показывает, что глубина упрочненного слоя и уровень остаточных напряжений сохраняются практически постоянными вне зависимости от степени износа пластины. Высокая размерная точность и отсутствие конусности при обработке позволяет избежать дополнительной обработки и проходов с нулевой глубиной. Столь выдающиеся результаты достигаются благодаря минимальной величине износа по вспомогательной режущей кромке у сплава S05F по сравнению со сплавами других типов.



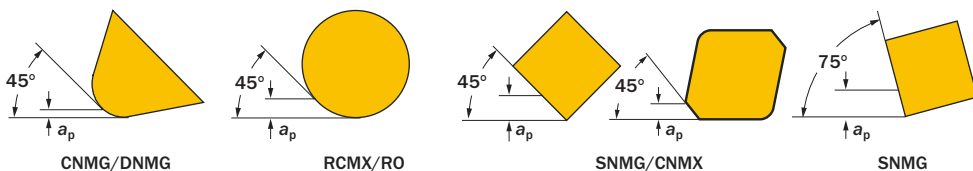
Износ, приводящий к неудовлетворительной чистоте поверхности из-за изношенности пластины.

CNMG 120408-23 H13A

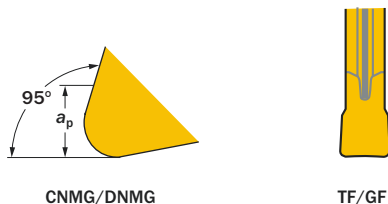


CNMG 120408-SF S05F

Использование сплава S05F – для предотвращения ПД



Использование сплава GC1105 – для уменьшения проточин



Спиральный путь резания (SCL) – прогнозируемая обработка

Расчет режимов обработки на основании спирального пути резания (SCL) был принят Sandvik Coromant для жаропрочных материалов в связи с относительно малой стойкостью инструмента. Обычно одна режущая кромка используется для одного прохода, после этого она заменяется. Важно суметь прогнозировать SCL:

- При черновой обработке – чтобы знать, когда запрограммировать остановку для замены режущей пластины.
- при чистовой обработке – найти режимы резания, которые гарантируют завершение прохода с прогнозируемым износом, чтобы не пришлось менять пластину во время резания

Порядок расчетов

Черновая обработка

- 1) Выберите оптимальный тип пластины для детали/процесса
- 2) Используйте оптимальные значения v_c , a_p и f_n для пластины данной формы, а допустимая SCL является проверочным фактором. Например, CNMX 1204A1-SM S05F – v_c 50 м/мин, f_n 0.35 мм, a_p 1.7 мм.
- 3) Запишите SCL для данной пластины SCL = 450 м, см. страницу 30.
- 4) Рассчитайте SCL для элемента Dia = 450 мм, l_m = 0,150 мм

$$SCL = \frac{D_{m1} \times \pi}{1000} \times \frac{l_m}{f_n}$$

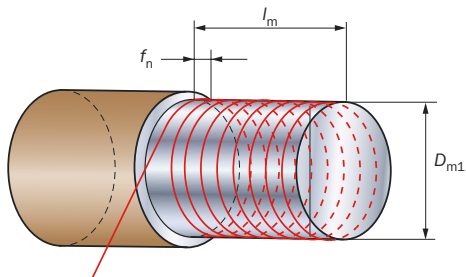
$$SCL = \frac{450 \times 3.14}{1000} \times \frac{150}{0.35} = 606 \text{ м}$$

- 5) Исходя из рассчитанной SCL и возможностей пластины – запрограммируйте необходимые остановки для замены инструмента. Например, 606/450 – необходимы 2 кромки

Примечание: Методика расчета приводится на страницах 118-119.

SCL – этот метод расчета режимов исходя из определения длины резания, требуемой для обработки определенной детали, и проверки согласно рекомендациям для данного обрабатываемого материала и сечения среза, чтобы обеспечить надежную работу.

Каждая диаграмма SCL применима только для определенной пластины, геометрии, глубины резания и материала. Для чистовой обработки предлагается большой диапазон скоростей резания, чтобы соответствовать длине пути резания для деталей разных габаритов. Для черновой обработки мы определили оптимальные параметры для каждого типа пластины и предлагаем одну длину.



Чистовая обработка

- 1) Выберите оптимальный тип пластины для детали/процесса
- 2) Используйте оптимальное значение a_p для пластины данной формы/применения, выберите подачу. Например, CNMG 120408-SF 1105 – f_n 0.15 мм, a_p 0.25 мм
- 3) Рассчитайте SCL для элемента детали Например, D = 450 мм, l_m = 150 мм

$$SCL = \frac{450 \times 3.14}{1000} \times \frac{150}{0.15} = 1414 \text{ м}$$

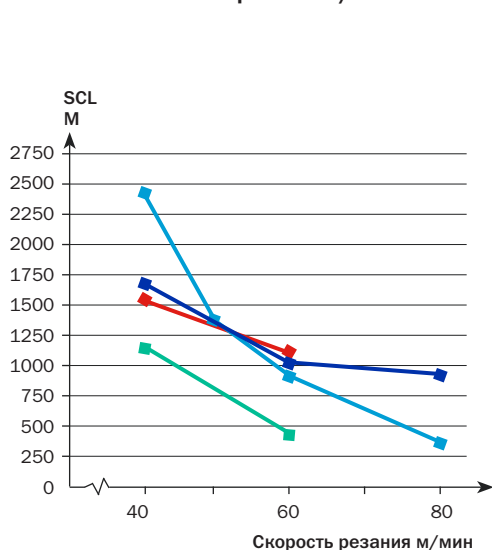
- 4) Выберите скорость резания по диаграмме, исходя из: CNMG 120408-SF 1105 a_p 0.25, f_n 0.15 мм, в условиях примера, v_c = 50 м/мин, см. страницу 30.

Рекомендации по SCL

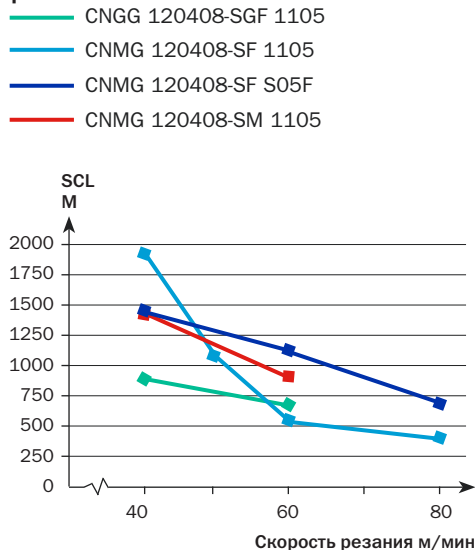
Все тесты, режимы резания и рекомендации относятся к обработке сплава Inconel 718 (HRC46), но, как

показывает практика, они действительны и для других сплавов – Udimet 720, Waspaloy.

Окончательная обработка/чистовая обработка

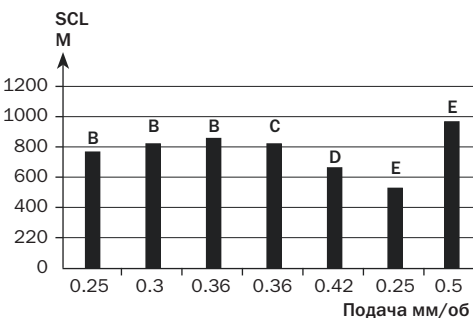


a_p 0,25 мм – f_n 0,15 мм/об



a_p 0,25 мм – f_n 0,25 мм/об

SCL для пластины CoroCut RO геометрия S05F – a_p 0,25 мм – f_n различная



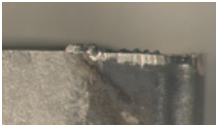

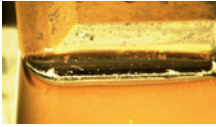


A = CNMG 120408-SF S05F
 B = N123H2-0400-RO S05F
 C = N123J2-0600-RO S05F
 D = N123L2-0800-RO S05F
 E = RCMT 1204M0-SM S05F

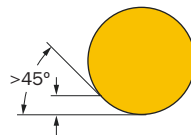
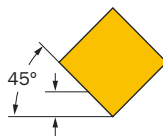
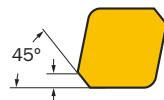
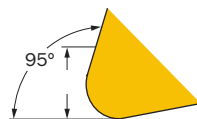
Шероховатость поверхности



■ = Новая
 □ = Изношенная


Черновая обработка

	v_c М/МИН	a_p ММ	f_n ММ/ОБ	Стойкость МИН	SCL М	Q СМ ³ /МИН	Q _{tot} СМ ³
 CNMG 120408-SMR 1105	50	2	0.25	5	250	25	125
 CNMX 1204A2-SM S05F	50	2.7	0.35	9	450	47	425
 SNMG 120408-SMR S05F	50	3	0.35	9	450	53	473
 SNMG 190616-SM S05F	50	5	0.35	9	450	88	788
 RCMT 1204M0-SM S05F	50	2	0.5	5	250	50	250
 RNGN 120700 T01020 6060	250	2	0.2	4	1000	100	400



Стружколомающие геометрии

Рекомендации по геометрии инструмента:

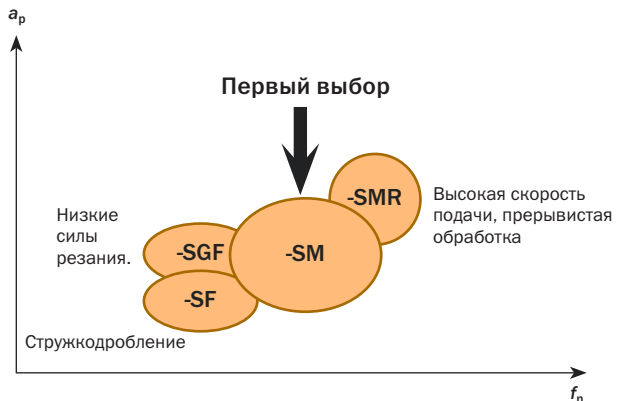
Область применения	Значение подачи, мм	Округление режущей кромки	Требования к типу пластины	Рекомендации по геометрии			
				Точение		Прорезка канавок	
				Двухсторонние	С задними углами	CoroCut®	Q-Cut
FSM	0.20 - 0.4	Среднее	Пластины прямого прессования с отрицательной фаской	 QM  SM  SMR		 TF	
ISM	0.15 - 0.25	Среднее и малое	Пластины прямого прессования с позитивной геометрией.	 QM  SM  SMR  Xcel	 MM  MR  SM	 TF  RO  1)	 5E  4P
LSM	0.1 - 0.2	Малое	Пластины прямого прессования или шлифованные по периферии	 SF  SGF	 MF  *CGT-UM  SM	 GF  RO  1)	 4G  4P

1) Отогнутые режущие пластины CoroCut, см. стр. 37.

Примечание: Шлифованные пластины -SGF и *CGT-UM следует использовать для обработки тонкостенных деталей, чтобы уменьшить режущие силы и, таким образом, снизить риск деформации.

геометрии ISO S

Первый выбор для общего точения двухсторонними режущими пластинами.



Диаграммы стружколомания

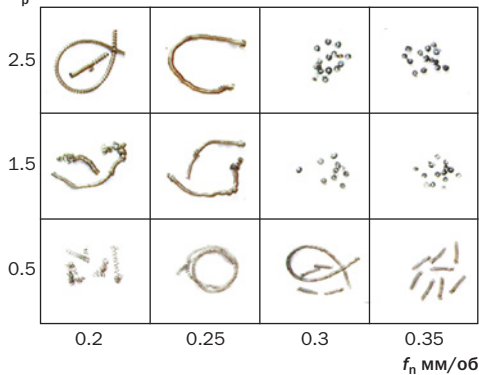
Скорость резания 65 м/мин, Inconel 718 – HRC 44

K_r 45° – ISM

SNMG 120408-SMR



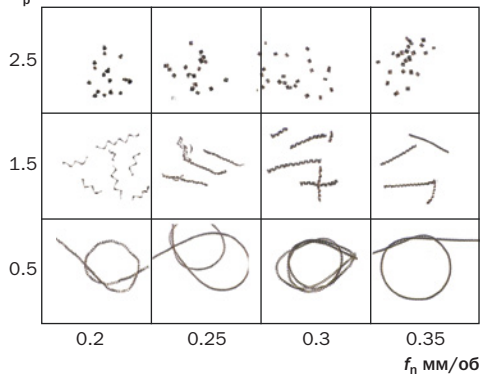
a_p мм



CNMX 1204A2-SM



a_p мм

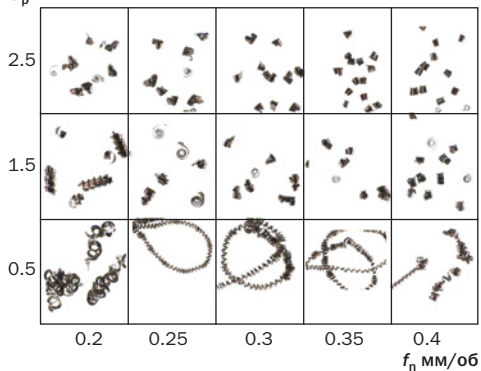


Круглые пластины

RCMT 1204M0-SM



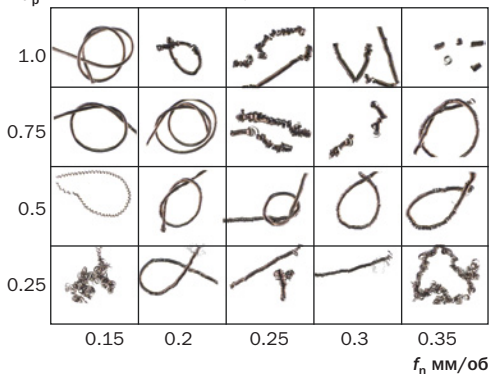
a_p мм



N123J2-0600-R0



a_p мм

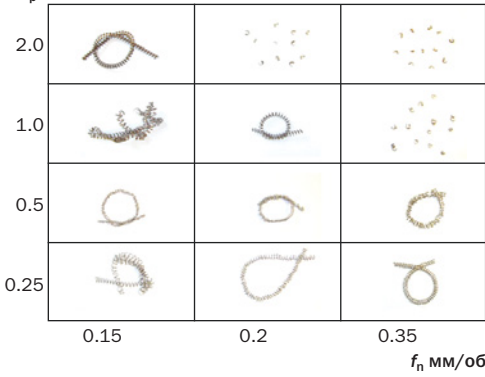


κ_r 95° - ISM

CNMG 120408-SM



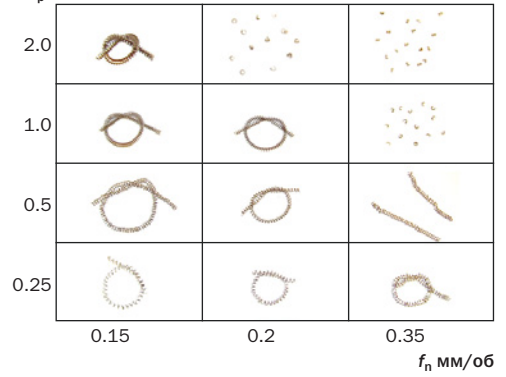
a_p MM



CNMG 120408-SMR



a_p MM

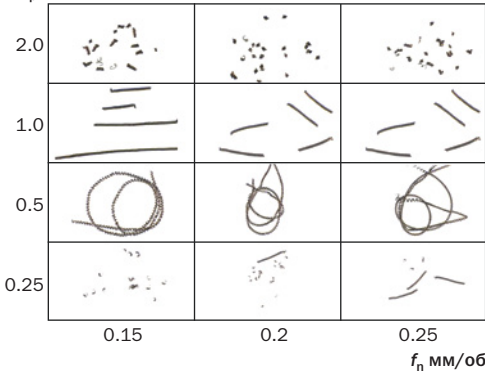


κ_r 95° - LSM

VBGT 160408-UM



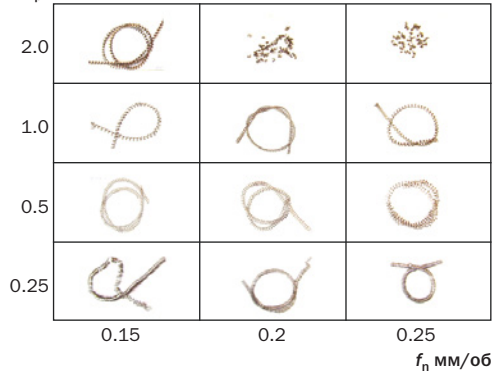
a_p MM



DNGG 150608-SGF



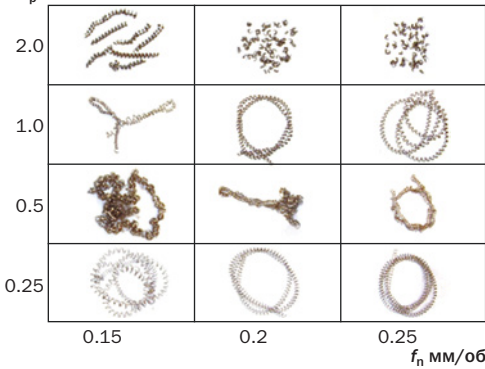
a_p MM



CNGG 120408-SGF



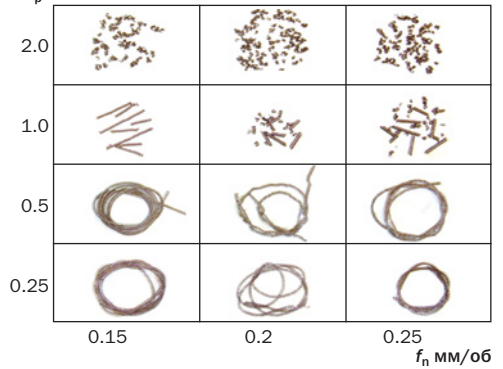
a_p MM



CNMG 120408-SF





















a_p MM












Рекомендации по выбору инструмента для обработки жаропрочных сплавов на никелевой основе

Точение

	Первый выбор	Альтернативный выбор	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	Тип пластины		Комментарии
FSM	GC1105	GC1115	30–40	0.3–0.4	до 10	 SNMG 15, 19 -SMR	120	Используйте угол в плане 45°, чтобы уменьшить толщину стружки и склонность к образованию проточины.
	CC670	CC6065	150–200	0.15–0.2	до 5	  RNGN 19 SNGN 19	200	Используйте угол в плане 45°, чтобы уменьшить толщину стружки и склонность к образованию проточины – первый выбор для качественных поковок.
ISM	CC6060	CC6065	200–300	0.1–0.2	1–3	 RNGN 12	120	По возможности используйте круглые пластины, чтобы минимизировать образование проточины.
	CC6060	CC6065	200–250	0.1–0.2	1–3	 RPGX	80	Для точения с заглублением используйте позитивные пластины.
	S05F	GC1105	40–60	0.3–0.45	3–5	 SNMG 15, 19 -SMR	90	Где возможна большая глубина резания.
	S05F	GC1105	40–60	0.25–0.35	3–5	 SNMG 15, 19 -SM	90	
	S05F	GC1105	40–60	0.2–0.45	1–3	 SNMG -SMR	50	По возможности работайте с углом в плане менее 75°. Это позволяет уменьшить образование проточин, то есть, используйте круглые пластины RCMT или квадратные пластины SNMG и CNMX.
				0.2–0.35	1–3	 SNMG -SM	50	
0.2–0.5				1–3	 RCMT -SM	50		
0.2–0.35				1–2.5	 CNMX -SM	50		
GC1105	GC1115	40–60	0.15–0.25	1–3	 SNMG -SMR  SNMG -SM  DNMG -SMR  DNMG -SM	25	Для угла в плане 90°.	
LSM	S05F	GC1105	40–60	0.25–0.5	0.25–0.5	 RCMT -SM		Контурная обработка
	S05F	GC1105	40–80	0.15	0.25	 *NMG -SF		Для каждой операции используйте скорость, требующуюся для достижения SCL.
	GC1105	GC1115	40–60	0.15	0.25	 *NGG -SGF		Используйте шлифованную пластину -SGF для тонкостенных деталей.

Обработка канавок и профильная обработка

Стадия обработки	Первый выбор	Альтернативный выбор	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	Тип пластины	Комментарии
ISM	GC1105	GC1125	40– 60	0.1–0.15		 TF  5E	Для черновой прорезки канавок используйте наибольший возможный радиус при вершине.
	S05F	GC1105	40– 60	0.2–0.4	Max a_p 0.15 x D	 RO  4P	Для контурной обработки.
	CC670		200–400	0.05–0.1		 150.23	Для черновой прорезки канавок в стабильных условиях.
LSM	GC1105	GC1125	40– 60	0.1–0.15	0.25 - 0.5	 GF  4G	Для чистовой прорезки канавок по возможности используйте радиус 0.4.
	S05F	GC1105	40– 60	0.15–0.35	0.25 - 0.5	 RO  4P	Для чистовой обработки контуров.

Tailor Made

Компания Sandvik Coromant выпускает широкий ассортимент инструмента и оснастки, но он не ограничен только изделиями представленными в каталогах. Благодаря системе параметрического проектирования Tailor Made, возможна разработка инструментальных решений по индивидуальному заказу клиента, что позволяет конкретизировать свои требования к режущему инструменту для определенных видов обработки. Система Tailor Made рассчитывает стоимость и предоставит чертежи инструмента с учетом пожеланий клиента в течение 24 часов, готовый инструмент будет поставлен в течение 10 – 20 дней. Заказ можно сделать по Интернету, что обеспечит наиболее быструю связь с клиентом.



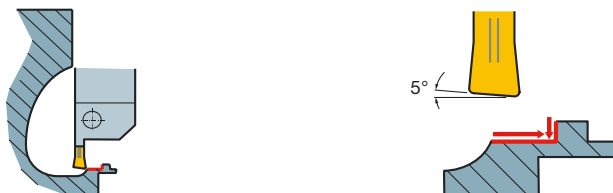
Подробности о системе параметрического программирования Tailor Made и бланки заказов представлены в изданиях компании Sandvik Coromant и в Интернете на сайте www.sandvik.coromant.com/ru.



Чистовая прорезка канавок пластиной Tailor Made CoroCut.



Tailor Made с пластиной CoroCut.



Чистовая прорезка канавок с малым радиусом.

Специализированные решения для аэрокосмической отрасли

Мы разработали специализированные решения для применения в аэрокосмической отрасли. Решения применимы к определенным деталям. За дополнительной информацией обратитесь к своему техническому представителю компании Sandvik Coromant.

Отогнутые режущие пластины CoroCut® для обработки канавок

Тонкостенные детали и детали сложных форм аэрокосмического двигателя требуют прорезки канавок и обработки контуров в труднодоступных местах. Стандартные пластины и державки часто не обладают требуемой геометрической проходимостью или жесткостью, для обработки труднообрабатываемых материалов.

Чтобы преодолеть эти трудности, специалисты Sandvik Coromant разработали специализированные пластины с непревзойденной жесткостью системы крепления CoroCut, изготовленные из оптимальных сплавов для гарантии безопасности и производительности.

Доступны для заказа шлифованные пластины согласно требованиям заказчика:

Укажите особые требования

Ширина l_a

Глубина iW

Радиусы $r_{\epsilon 1}$, $r_{\epsilon 2}$

Наличие стружколома

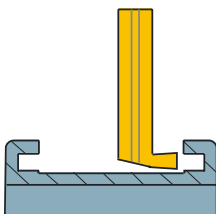
Ограничения по ширине/глубине

Предлагаемые сплавы:

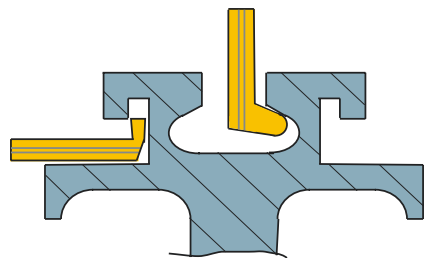
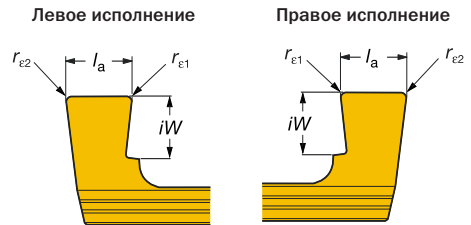
GC1105 – первый выбор для обработки жаропрочных сплавов

H13A – для прерывистого резания и универсального использования

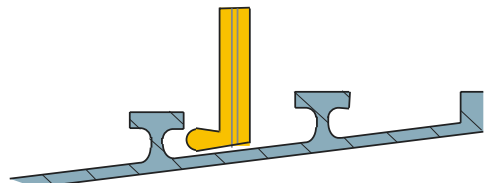
Типовые элементы деталей – обечаек, дисков, колец и валов



Диск, вал



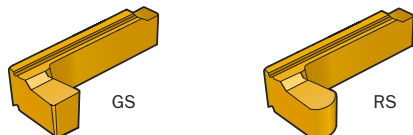
Сегмент статора направляющего аппарата



Обечайка

Стандартные пластины и заготовки для самостоятельного изготовления профиля

В ассортименте режущие пластины CoroCut 90° лево- и правостороннего исполнения, изготовленные из GC1115.



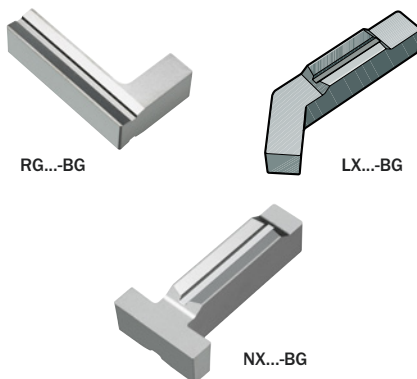
Стандартный ассортимент:

- Право- и левостороннее исполнение с углом 90°
- Размеры гнезда: Н и L
- Ширина (la): 2, 3 и 4 мм
- Геометрии GS и RS

Стандартные заготовки для самостоятельного шлифования в нужный размер, сплавы Н13А, Н10F и Н10.

заготовки с углом 90°

- Размеры гнезда: Н и L
- Ширина (la) 6 мм
- Заготовки с углом 45° и Т-образные
- Размер гнезда: L
- Ширина (la) 6 мм

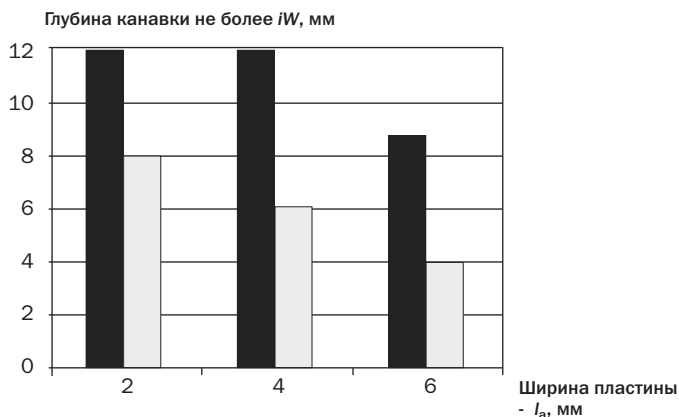


Область применения

Подача:

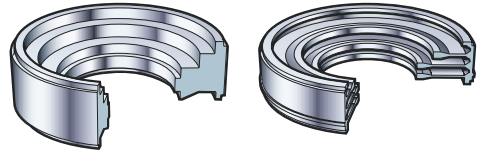
Полная канавка – от 0.05 до 0.1 мм/об
 Контурная обработка – до 0.2 мм/об

■ = L
 □ = H



Прорезка глубоких канавок и профильная обработка

Диски и детали типа катушек обычно имеют глубокие канавки, которые обрабатываются либо из цельной заготовки, либо протачиваются по контуру после сварки. Неблагоприятное отношение глубины обработки к ширине пластины приводит к тому, что инструмент проявляет склонность к вибрации.



Форму лезвия разрабатывают исходя из контура детали, обеспечивая максимальную жесткость и минимальные вибрации, что приводит к повышению производительности, при использовании длинных тонких инструментов. Для таких инструментов применяются:

- Встроенный в лезвие демпфирующий элемент
- Хвостовик Coromant Capto® (C6 или C8)
- Овальное сечение стержня
- Соединение по рифлениям
- Увеличенная высота лезвия
- Верхний и нижний подвод СОЖ



Механизм демпфирования

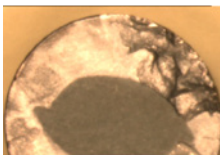
Запатентованное решение применяется, когда соотношение длины лезвия к ширине больше, чем 5:1. твердосплавные диски монтируются в лезвие, что препятствует вибрации, вызываемой процессом резания. В результате можно получить в 4 раза большую глубину резания.

Влияние на пластину

Керамика RCGX 090700 T01020 670

v_c 250 м/мин, a_p 1.5 мм

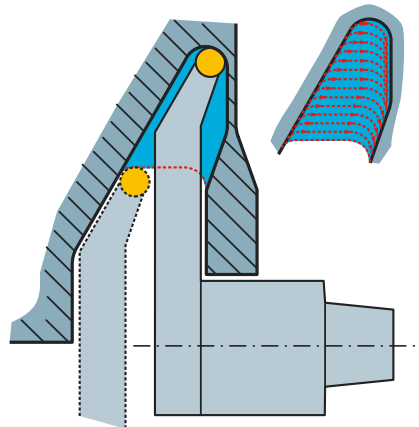
f_n 0.15 мм/об (G1), f_n 0.075 мм/об (G2/G3)



Без встроенного демпфера.



Со встроенным демпфером.



S-RCMX 090700-SM

Пластины устанавливаются в державки для керамики, что снижает как количество требуемого инструмента, так и его взаимозаменяемость во время:

- операций на стадии чистовой обработки
- смешанной обработки титана и жаропрочных сплавов

Безопасное решение с наличием стружколома для отличной производительности и стружкоудаления.

S-RCMX 060600-SM, диам. 6 мм

S-RCMX 090700-SM, диам. 9 мм

S-RCMX 120700-SM, диам. 12 мм

S05F – первый выбор для обработки жаропрочных сплавов

H13A – первый выбор для титана



S-SNMM-SR

Оптимальная геометрия для обработки жаропрочных сплавов с ковкой коркой без термообработки (HRC26). Чтобы получить наибольшую глубину резания и минимизировать прерывистую обработку по контуру: квадратная пластина iC 19 или 25 – κ_r 75°

S-SNMM 250924-SR 2015 or 2025

S-SNMM 190616-SR 2015 or 2025



S-WCMX-GM

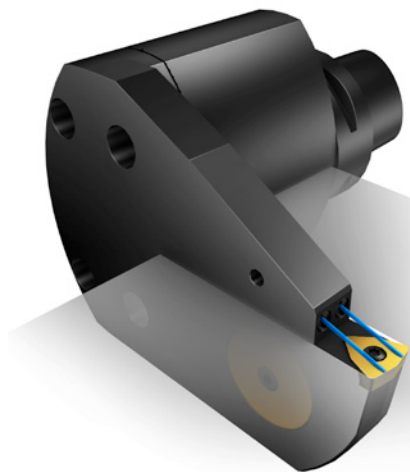
Улучшенная геометрия с превосходным стружкодроблением. Высокая производительность при плунжерном точении.

- Обработка широких глубоких канавок до 16 мм
- Крепление винтов, без прижима
- Позволяет использование СОЖ под высоким давлением.

S-WCMX 120408-GM

GC1105 – первый выбор для обработки жаропрочных сплавов

H13A – первый выбор для обработки титана



Керамические канавочные пластины типа CSGX

используются в тех же державках с V-образным основанием, что и пластины RCGX/RPGX.

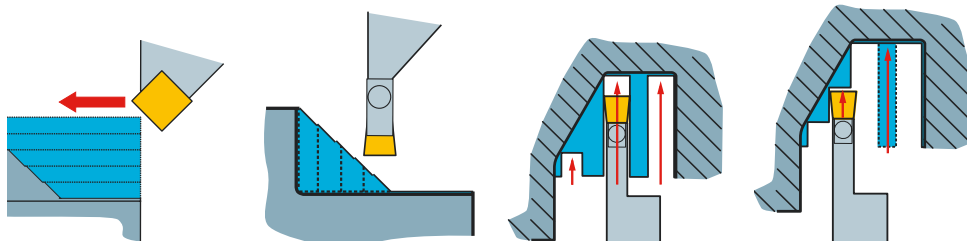
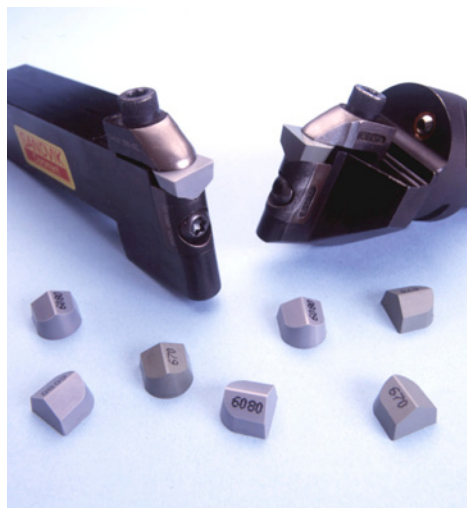
CSGX 060608 T01020 670, ширина 6.35 мм

CSGX 090708 T01020 670, ширина 9.75 мм

CSGX 120708 T01020 670, ширина 12.7 мм

Высокий удельный съем металла – эффективно используются для:

- доработки уступов после квадратных пластин
- прорезки широких канавок



Пластины с базой по ребру

Специальные державки для стандартных режущих пластин.

440 310211R44 правостороннее исполнение

440 310211L45 левостороннее исполнение

- Оптимизирована для стабильной работы и точной профильной обработки.
- Сопло для подачи СОЖ под высоким давлением
- Отличный контроль над стружкодроблением
- Глубина резания (ar) 8 мм

N123E2-0200-R0 ширина 2,0 мм

GC S05F – первый выбор для обработки жаропрочных сплавов



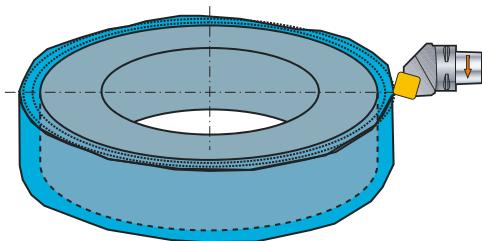
Типовые решения Sandvik Coromant

Предварительная обработка.

HRC 26.

Удаление корки.

Угол κ_r 75° для большей глубины резания (a_p).



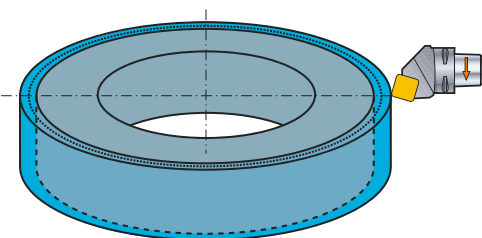
Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Стойкость, мин	Удельный объем металла, см ³ /мин	Спиральный путь резания, м
S-SNMm 190616	SR	GC2015	20	10.00	0.60	20	120	400
S-SNMm 250924	SR	GC2015	20	15.00	0.60	20	180	400

*для сплава Inconel 718 (HRC 26)

Предварительная обработка.

HRC 26.

Обработанная поверхность.



Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Стойкость, мин	Удельный объем металла, см ³ /мин	Спиральный путь резания, м
SNMG 190616	SM	GC1105	40	8.00	0.40	15	128	600
RNGN 190700		CC6065	200	5.00	0.25	5	250	1000

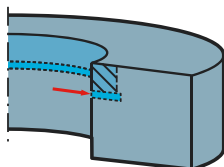
*для сплава Inconel 718 (HRC 26)

Предварительная обработка.

HRC 26.

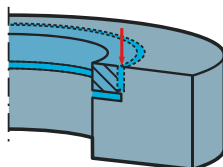
Вырезание кольца-свидетеля.

Прорезается канавка на 2 мм глубже внешнего диаметра кольца-свидетеля

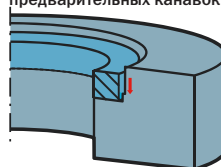


Керамика 6.35 мм
150.23 063508 T01020 CC670
 v_c 300 м/мин f_n 0.07 мм/об

Прорезается канавка, не доходя 2 мм до смыкания

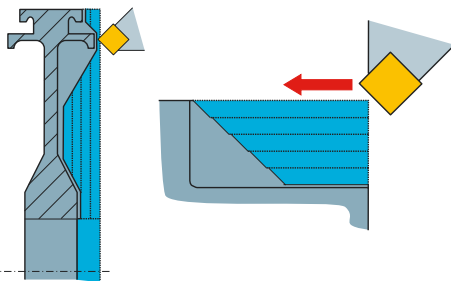


Отрезаем кольцо твердосплавной пластиной на 1 мм уже предварительных канавок



Тв. сплав 6 мм
N123K2-0600-0004-TF 1105
 v_c 50 м/мин f_n 0.12мм/об

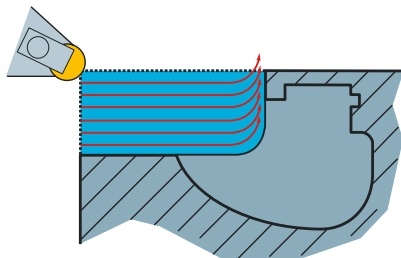
**Промежуточная обработка.
HRC 46.**



Угол врезания не более
40° для DSDNN
25° для DSSNL/R

Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Стойкость, мин	Удельный съем металла, см³/мин	Спиральный путь резания, м
SNMG 190616	SM	S05F	50	5.00	0.35	8	87.5	400
SNMG 120408	SMR	S05F	50	3.00	0.35	8	52.5	400

**Промежуточная обработка.
HRC 46.
Обработка углов керамикой.**

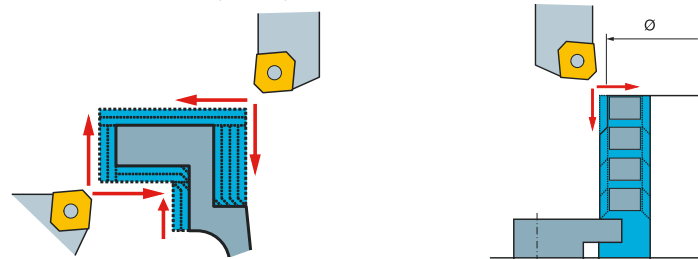


*для сплава Inconel 718 (HRC 46)

Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Стойкость, мин	Удельный съем металла, см³/мин	Спиральный путь резания, м
RNGN 120700		CC6060	250	2.00	0.2	4	100	1000
RNGN 120700		CC6065	250	2.00	0.2	3	100	750

*для сплава Inconel 718 (HRC 46)

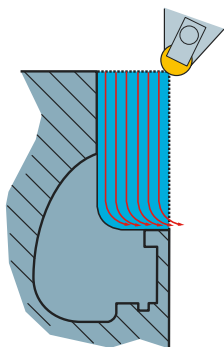
Твердый сплав.



Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Стойкость, мин	Удельный съем металла, см³/мин	Спиральный путь резания, м
CNMX 1204A1	SM	S05F	50	1.50	0.35	8	29.75	400
CNMX 1204A2	SM	S05F	50	2.50	0.35	8	47.25	400

*для сплава Inconel 718 (HRC 46)

Промежуточная
обработка.
HRC 46.
Обработка
профилей и
глубоких канавок с
врезанием.
Керамика.

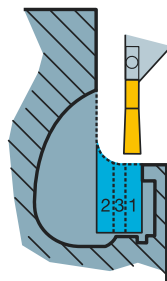


RNGN 120700 6060

v_c 300 м/мин

a_p 2.0 мм

f_n 0.15 мм/об

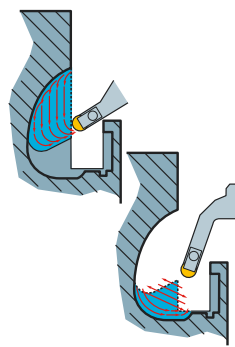


150.23 9.5 мм 670

v_c 300 м/мин

l_a 9.5/6 мм

f_n 0.07 мм/об

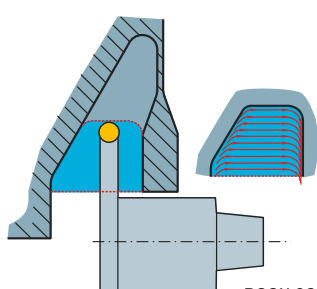


RCGX 090700 6060

v_c 300 м/мин

a_p 1.5 мм

f_n 0.15 мм/об



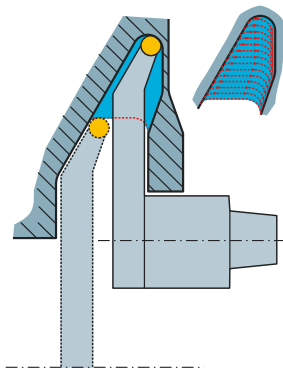
RCGX 090700 6060

v_c 300 м/мин

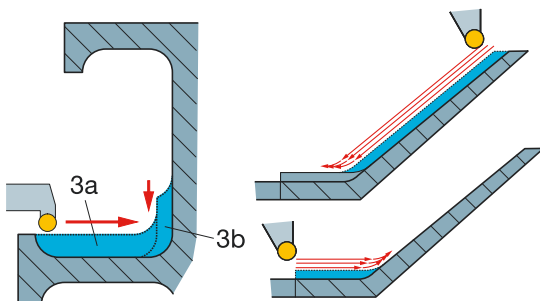
a_p 1.5 мм

f_n 0.15 мм/об

Q 68 см³/мин



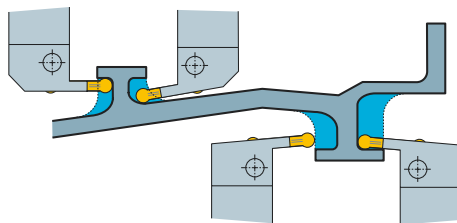
Твердый сплав.



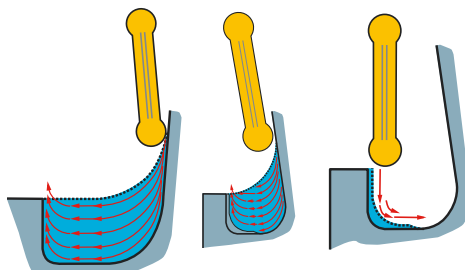
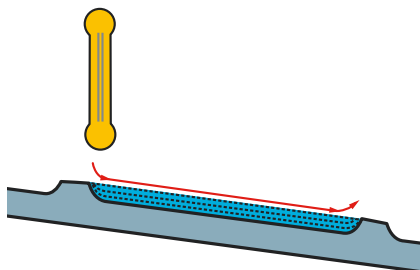
Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Стойкость, мин	Удельный съем металла, см ³ /мин	Спиральный путь резания, м
RCMT 10T3M0	SM	S05F	50	1.50	0.35	5	26.25	250
RCMT 1204M0	SM	S05F	50	2.00	0.50	5	50	250

*для сплава Inconel 718 (HRC 46)

Промежуточная
обработка.
46 HRC.
Прорезка канавок
пластинами
CoroCut.



Трохоидальное точение. Подробнее см. стр. 20



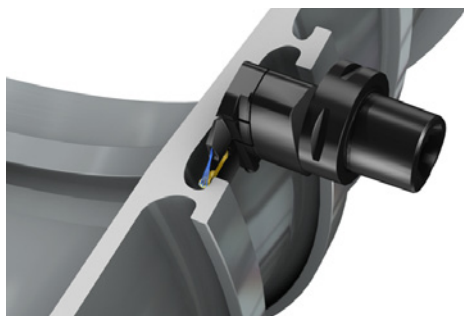
Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Стойкость, мин	Удельный съем металла, см ³ /мин	Спиральный путь резания, м
N123L2-0800	RO	S05F	50	1.20	0.50	6	33	300
N123J2-0600	RO	S05F	50	1.00	0.40	6	22.5	300
N123H2-0400	RO	S05F	50	0.60	0.30	6	10.5	300

*для сплава Inconel 718 (HRC 46)

CoroTurn® SL70

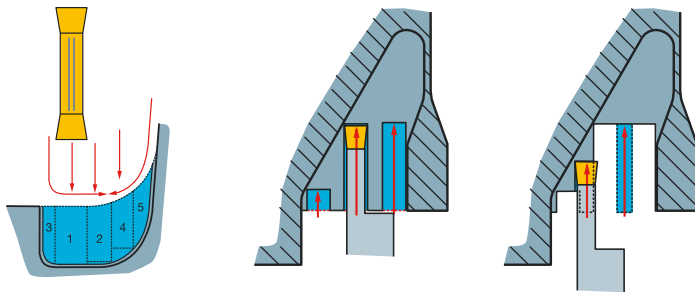
Модульная система CoroTurn SL70, включающая головки и адаптеры, предназначена для профильного точения и обработки карманов любой сложной формы без модификации оборудования.

- Обеспечивает стабильность и превосходную эксплуатацию инструмента.
- Токарный инструмент для обработки дисков, корпусов, рабочих колес и валов турбин из жаропрочных сплавов.
- Подача СОЖ на керамические режущие пластины через зажим.
- Стандартные адаптеры для твердосплавных пластин имеют сопла для подачи СОЖ под давлением.



CoroTurn® SL70 для универсального применения

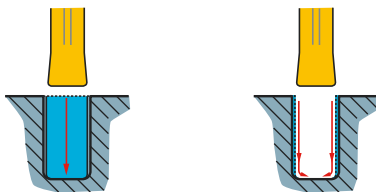
**Промежуточная обработка.
HRC 46.
Широкие канавки.**



Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Стойкость, мин	Удельный съем металла, см ³ /мин	Спиральный путь резания, м
150.23-0635	T01020	CC670	300	6.35	0.07	3	133.4	900
150.23-0950	T01020	CC670	300	9.50	0.07	3	199.5	900
CSGX 090708	T01020	CC670	300	9.50	0.07	3	199.5	900
N123K2-0600-0004	TF	GC1105	50	6.00	0.12	8	36	400
N123L2-0800-0008	TF	GC1105	50	8.00	0.15	8	60	400

*для сплава Inconel 718 (HRC 46)

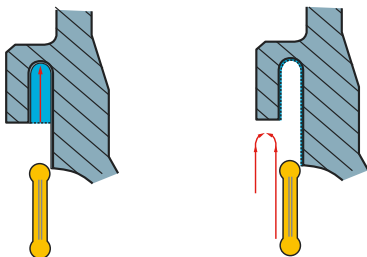
Узкие канавки.



Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Стойкость, мин	Удельный съем металла, см ³ /мин	Спиральный путь резания, м
N123G2-0300-004	GF	GC1105	50	3.00	0.07	8	10.5	400
N123G2-0300-004	TF	GC1105	50	3.00	0.10	8	15	400

*для сплава Inconel 718 (HRC 46)

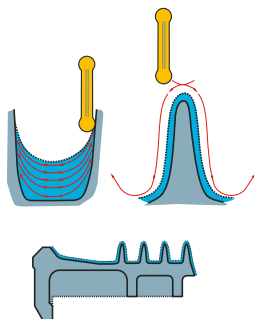
Канавки с радиусным дном.



Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Стойкость, мин	Удельный съем металла, см ³ /мин	Спиральный путь резания, м
N123F2-0300	R0	S05F	50	3.00	0.08	12	12	600

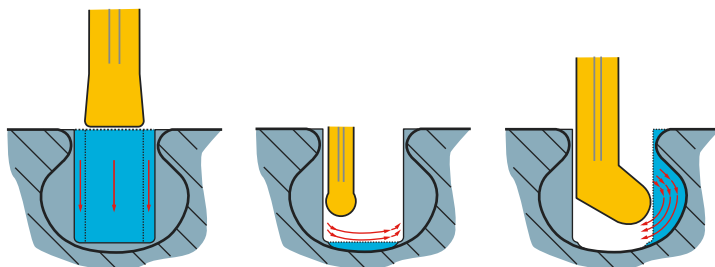
*для сплава Inconel 718 (HRC 46)

Промежуточная обработка.
HRC 46.
Пластины с базой по ребру, специальные державки, стандартные режущие пластины.



N123E2-0200-RO S05F
 v_c 50 м/мин
 a_p 0.5 мм
 f_n 0.25 мм/об

Замковые канавки для лопаток на деталях типа дисков и катушек.

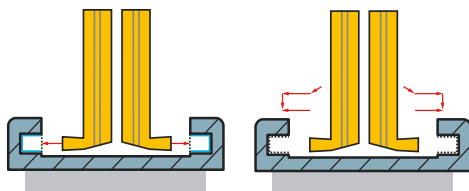


N123H2-0400-0004-TF 1105
 v_c 40 м/мин
 f_n 0.1 мм/об

N123G2-0300-RO S05F
 v_c 50 м/мин
 a_p 0.5 мм
 f_n 0.25 мм/об

CoroCut engineered insert GC1105
 v_c 50 м/мин
 a_p 0.5 мм
 f_n 0.25 мм/об

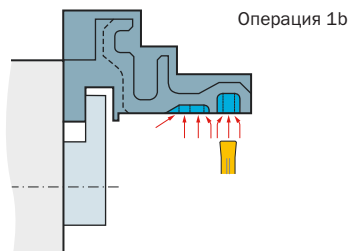
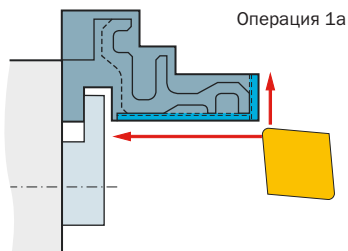
Канавки на статоре направляющего аппарата.



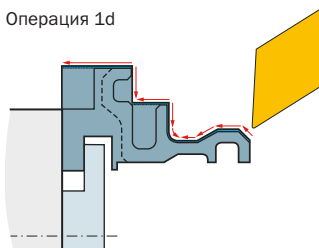
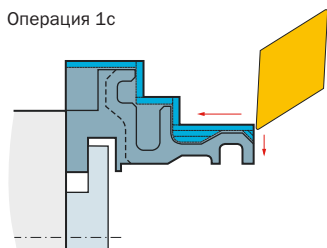
CoroCut 90° режущая пластина GC1115
 v_c 30 м/мин
 l_a 2 мм
 f_n 0.1 мм/об

CoroCut 90° режущая пластина GC1115
 v_c 30 м/мин
 a_p 0.25 мм
 f_n 0.15 мм/об

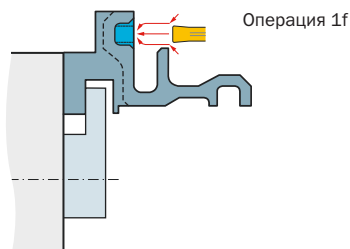
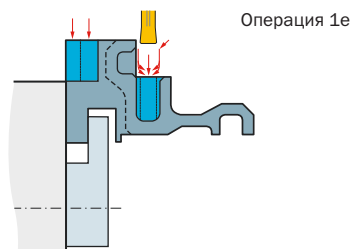
Промежуточная
обработка.
46 HRC.
Кольца.



Операция	Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об
1a	CNMG 120412	SM	GC1105	50	1.0	0.20
1b	N123G2-0300-0004	GF	GC1105	50		0.08/0.12

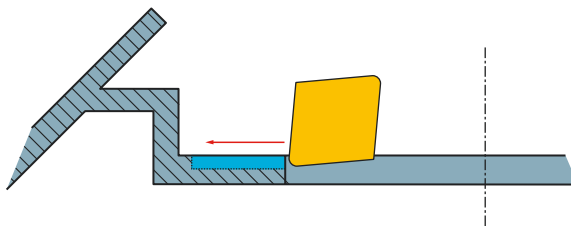


Операция	Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об
1c	DNMG 150612	SM	GC1105	50	1.0	0.20
1d	DNMG 150612	SM	GC1105	50	0.25	0.20



Операция	Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об
1e	N123G2-0300-0004	GF	GC1105	50		0.08/0.12
1f	N123G2-0300-0004	GF	GC1105	50		0.08/0.12

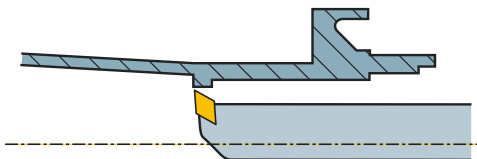
Промежуточная
обработка.
HRC 46.
Нежесткие
тонкостенные
детали.



Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Стойкость, мин	Удельный расход металла, см ³ /мин	Спиральный путь резания, м
CNMG 120408	SM	GC1105	50	1.50	0.20	5	15	250
CNMG 120408	SM	GC1105	50	1.00	0.20	5	10	250

*для сплава Inconel 718 (HRC 46)

Расточка.



Выбор оправки

Стальные
антивибрационные
расточные оправки

Silent Tools®

DNMG 150608-SM 1105

v_c 50 м/мин, a_p 2 мм, f_n 0.15 мм/об

Стальные
расточные
оправки

DNMG 150608-SM 1105

v_c 50 м/мин, a_p 2 мм, f_n 0.15 мм/об

Стальные
расточные
оправки

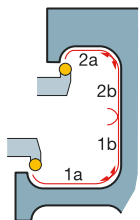
RNGN 120400 T01020 6060

v_c 200 м/мин, a_p 2 мм, f_n 0.15 мм/об

1 Ø 2 Ø 3 Ø 4 Ø 5 Ø 6 Ø 7 Ø 8 Ø 9 Ø 10 Ø

Для вылетов до 14 диаметров рекомендуется применять усиленные твердосплавные антивибрационные оправки Silent Tools.

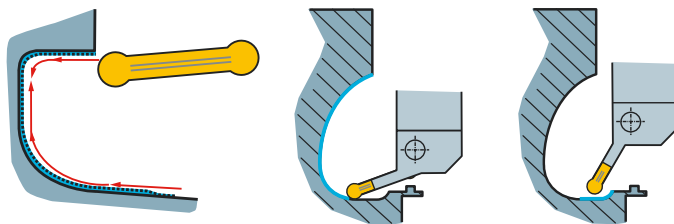
**Окончательная
обработка.
HRC 46.
Круглые пластины.**



Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Стойкость, мин	Удельный съем металла, см ³ /мин	Спиральный путь резания, м
RCMT 1204M0	SM	S05F	40	0.25	0.50	20	5	800
RCMT 10T3M0	SM	S05F	40	0.25	0.45	20	4.5	800
RCMT 0803M0	SM	S05F	40	0.25	0.40	20	4	800

*для сплава Inconel 718 (HRC 46)

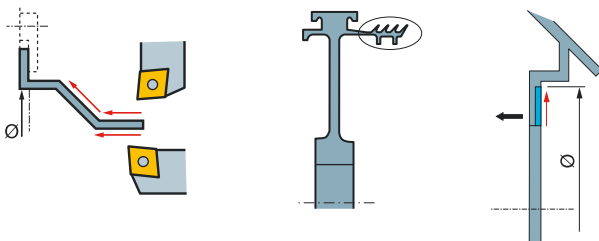
Пластины CoroCut.



Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Стойкость, мин	Удельный съем металла, см ³ /мин	Спиральный путь резания, м
N123J2-0600	RO	S05F	40	0.25	0.35	20	3.5	800
N123H2-0500	RO	S05F	40	0.25	0.30	20	3	800
N123H2-0400	RO	S05F	40	0.25	0.25	20	2.5	800
N123G3-0300	RO	S05F	40	0.25	0.20	20	2	800

*для сплава Inconel 718 (HRC 46)

**Тонкостенные
детали.**



Пластина	Геометрия	Сплав	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Подача, мм/об	Стойкость, мин	Удельный съем металла, см ³ /мин	Спиральный путь резания, м
CNGG 120404	SGF	GC1105	40	0.25	0.10	20	1	800
CNGG 120408	SGF	GC1105	40	0.25	0.15	50	1.5	2000

*для сплава Inconel 718 (HRC 46)

3. Точение материалов на основе кобальта – медицинская промышленность

Свойства материала

+ стойкость к износу (твердый материал HRC 45-50).

+ может быть отлит в сложных формах.

+ высокая коррозионная стойкость.

+ прочнее нержавеющей стали.

– в два раза тяжелее нержавеющей стали.

– очень хрупкий при ударной нагрузке.

Сплавы на кобальтовой основе, применяемые в медицине, - это CoCrMo и CoNiCrMo.

Сплавы CoCrMo используются для производства фиксирующих винтов, пластинок для скрепления осколков кости, плечевых, коленных и тазобедренных протезов (с/ без покрытия, с/ без связующего материала).

В этой главе руководства по применению мы сосредоточим свое внимание на обработке протеза для тазобедренного сустава из материала группы CoCrMo.



Химический состав некоторых сплавов на кобальтовой основе, используемых в протезировании

CoCr28Mo6 ASTM F75

Vitalium (Howmedica, Inc)

Haynes-Stellite 21 (Cabot Corp.)

Protasul-2 (Sulzer AG)

Micrograin-Zimaloy (Zimmer)

Co	Cr	Mo	Mn	Si	Ni	Fe	C
58.9–69.5	27.0–30.0	5.0–7.0	Max 1.0	Max 1.0	Max 1.0	Max 0.75	Max 0.35

CoCrMo ASTM F799

Поковки CoCrMo

После термомеханической обработки CoCrMo

Высокопрочные поковки FHS

Co	Cr	Mo	Mn	Si	Ni	Fe	C	N
58–59	26.0–30.0	5.0–7.0	Max 1.0	Max 1.0	Max 1.0	Max 1.5	Max 0.35	Max 0.25

Основные определения

Обработка заготовок

Поковки производят из отливок или прутков. Выбор материала влияет на процесс обработки. С литой заготовки снимается меньшее количество материала, твердая корка с некоторой степенью овальности может вызвать затруднения, если пластина не полностью удаляет припуск при первом проходе. С прутковой заготовки необходимо снять гораздо больше материала, а также использовать сверление, чтобы удалить припуск – см. специальные решения на стр. 58

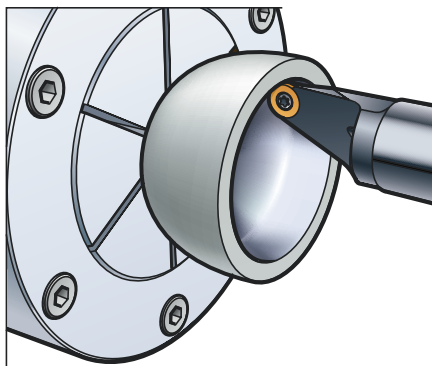
Ограничения по обработке

Процесс резания ограничивается плохой обрабатываемостью материала, сложностью доступа к внутренней сфере и нежестким закреплением. Обычно отливка имеет технологический выступ для закрепления во время обработки внутреннего профиля; впоследствии этот выступ удаляется.

Стадия обработки – классификация

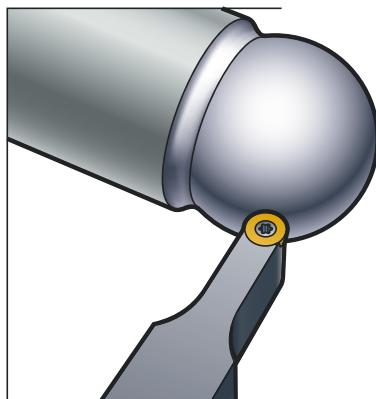
Обработка/операция 1 – Чашка шарнира

- Черновое сверление – пруток.
- Черновое точение – глубина резания до 1 мм.
- Полуцистовое точение – глубина резания 0.1–0.15 мм.
- Чистовое точение – глубина резания 0.05–0.15 мм.
- Удаление технологического выступа.



Обработка/операция 2 – Головка шарнира

- Черновое точение – глубина резания до 1 мм.
- Полуцистовое точение – глубина резания 0.1–0.25 мм.
- Чистовое точение – глубина резания 0.05–0.15 мм.
- Отрезка от прутка.

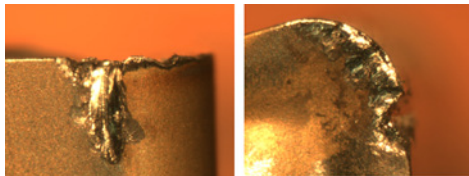


Виды износа

Склонность к образованию проточкины

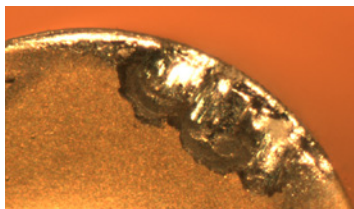
Это механический износ, сосредоточенный на глубине резания. Этот вид износа значительно снижает стойкость и приводит к образованию заусенцев на детали.

Способ устранения: износ связан с формой инструмента и легко устраняется при изменении угла в плане (формы пластины), нежели при замене сплава.



Абразивный износ

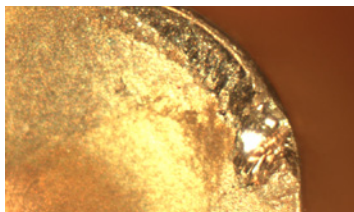
Случается, главным образом, из-за твердых частиц, присутствующих в материале заготовки, изнашивающих кромку.



Износ по передней поверхности

Образуется из-за абразивного действия твердых частиц при течении стружки по передней поверхности.

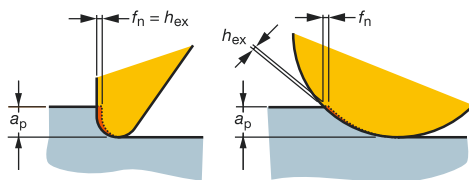
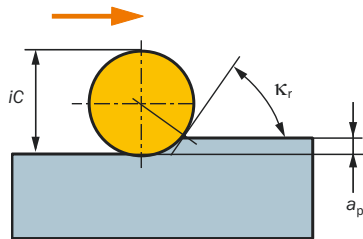
Способ устранения: выберите пластину с позитивной геометрией. Снизьте скорость, чтобы уменьшить температуру.



Выбор формы пластины

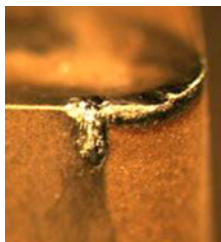
При анализе типов износа, видим, что уменьшение угла в плане (κ_r) имеет два очевидных преимущества:

- Если удастся избежать образования проточин, то производительность повышается, а стойкость инструмента становится более предсказуемой.
- Уменьшенная толщина стружки. При использовании пластин формы V или D толщина стружки (h_{ex}) равна подаче вне зависимости от глубины резания. Для круглых пластин использование глубины резания ниже радиуса снижает толщину стружки относительно подачи и увеличивает длину режущей кромки. В результате получаем более низкую температуру и, следовательно, больший путь резания и высокую производительность.

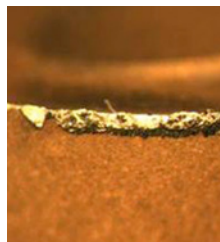


Уменьшение угла в плане, не снижая глубину резания, лучше всего достигается при использовании большого радиуса – на практике это означает использование круглой пластины.

Диаграмма показывает влияние радиуса при вершине на стойкость. Увеличение в 6 раз при одинаковом сплаве.

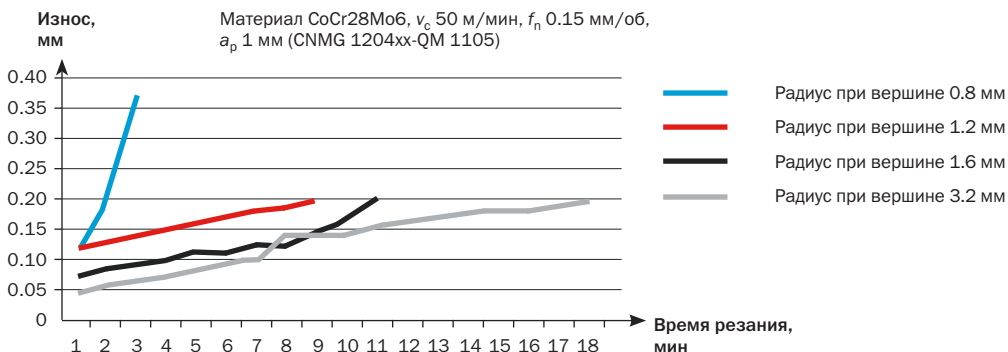


Стойкость: 3 мин
Радиус: 0.8 мм



Стойкость: 18 мин
Радиус: 3.2 мм

Влияние радиуса при вершине



Оптимальные инструменты для внутренней обработки

Чтобы реализовать преимущество применения больших радиусов, компания Sandvik Coromant разработала ряд инструментов, которые используются при традиционной обработке, обеспечивая повышение производительности и стойкости.

Два типа пластин:

Тип пластины	Размер пластины мм	Диаметр оправки, мм
DCMT	7	16
DCMT	11	20
Круглая	8	16
Круглая	10	20

v_c 70 м/мин, f_n 0.1 мм/об, a_p 0.5 мм.

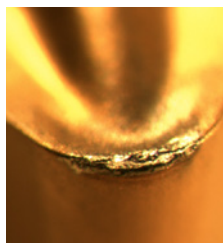
Обрабатываемый материал: сплав кобальта с хромом



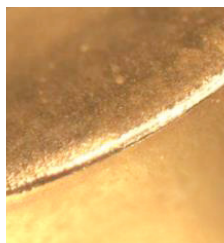
Державка: A20M-ADXCL 11-R
Пластина: DCGT 11T308-UM 1115



Державка: A20M-SRXDL 08-R
Пластина: R300-0828E-PL 1030



1 деталь.

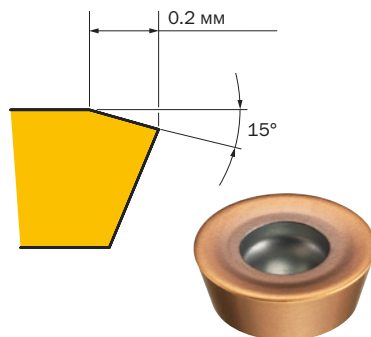
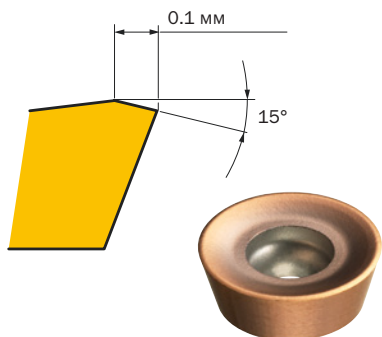


10 деталей.

Геометрия круглых пластин

- R300-0828E-PL 1030 или 1010
- R300-1032E-PL 1030 или 1010
- + шлифование по периферии.
- + плавное резание.
- + снижает вибрации и усилия резания

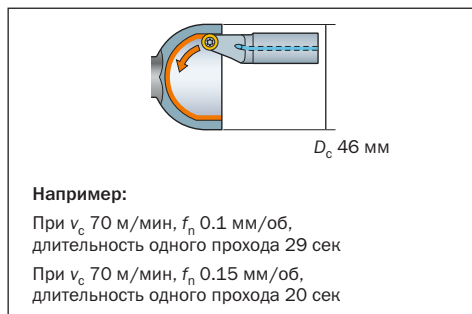
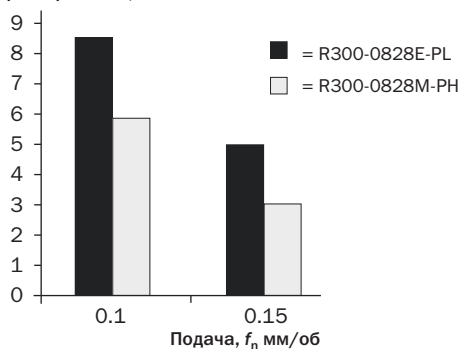
- R300-0828E-PH, 1030
- R300-1032E-PH, 1030
- + прямое прессование.
- + для жесткой СПИД.



Влияние подачи

Торцевая обр-ка – Сплав кобальта с хромом
 D_c 46 мм, v_c 70 м/мин, a_p 0.5 мм, GC1030

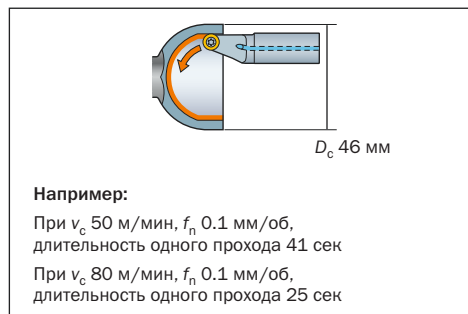
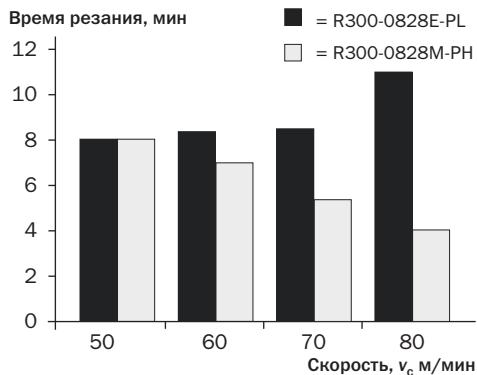
Время резания, мин



Влияние скорости

Торцевая обр-ка – Сплав кобальта с хромом
 D_c 46 мм, f_n 0.1 мм/об, a_p 0.5 мм, GC1030

Время резания, мин



Рекомендации по выбору инструмента для жаропрочных сплавов на кобальтовой основе

Стадия обработки	Поверхность	Первый выбор	Альтернативный выбор	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	Удельный съем металла, см ³ /мин	Тип пластины
Черновая обработка	Внутр.	PL GC1010	PH GC1030	50–80	0.1–0.15	до 1.0	12	R300-08
	Наружн.	SM GC1105	SM S05F*	40–60	0.1–0.15	до 1.0	9	RCMT 10
		RO GC1105	RO S05F*	40–60	0.1–0.15	до 1.0	9	N123J2-0600
Получистовая обработка	Внутр.	PL GC1010		50–80	0.1–0.15	0.1–0.3	3	R300-08
		UM GC1105	UM GC1115	40–60	0.08–0.1	0.1–0.25	1.5	DCGT 11 DCGT 07
	Наружн.	SM GC1105	SM S05F*	40–60	0.1–0.15	0.1–0.25	2.25	RCMT 10
		RO GC1105	RO S05F*	40–60	0.1–0.15	0.1–0.25	2.25	N123J2-0600
		GC1105	S05F*	40–60	0.08–0.12	0.1–0.25	1.8	DNGG
Чистовая обработка	Внутр.	PM CT530	PL GC1010	40–60	0.08–0.12	0.05–0.15	1.1	R300-08
		PF CT5015	UM GC1115	40–60	0.08–0.1	0.05–0.15	0.9	DCMT DCGT
	Наружн.	GC1105	S05F*	40–60	0.08–0.12	0.05–0.15	1.35	DNGG
		RO CB7015		180-230	0.04–0.08	0.05–0.10		N123J1-0600
		RO GC1105		60-100	0.1–0.15	0.05–0.15		N123J2-0600
Отрезка		CM GC1125		40–60	0.05–0.1	–		N123G2-0300-0002
Обработка канавок		GF GC1105		40–60	0.05–0.1	–		N123G2-0300-0002

Твердые сплавы

- GC1105 – сплав с уникальным тонким покрытием PVD (TiAlN) на твердой мелкозернистой основе.
 - Отличное сцепление с основой даже на острых кромках, хорошая красностойкость.
- GC1115 – уникальный микрозернистый твердый сплав с покрытием PVD.
 - Стойкость к образованию наростов и лункообразному износу. Идеальный сплав для очень нестабильных условий.
- GC1125 – микрозернистый твердый сплав с покрытием PVD.
 - Устойчивость к термическому удару и образованию проточин. Первый выбор для операций отрезки.
- GC1030 – сплав с уникальным многослойным покрытием PVD (TiAlN).
 - увеличенная стойкость к износу по сравнению со сплавом GC1025 при той же прочности. Высокая надежность кромки.
- GC1010 – микрозернистый твердый сплав с покрытием PVD.
 - Стойкость к пластической деформации, термическому удару и хорошей износостойкости.
- GC5015 – непокрытый кермет.
 - Превосходная стойкость к образованию наростов и пластической деформации.
- S05F – сплав с тонким покрытием CVD на твердой мелкозернистой основе.
 - Для использования в случаях, когда образование проточкины не является значимым, например, при использовании круглых пластин или при чистовой обработке с малым углом в плане.
- CT530 – непокрытый кермет.
 - Для чистовой обработки.
- CB7015 – сплав с PVD покрытием вставкой из КНБ с керамической связкой, предназначенный для непрерывного резания.
 - Обеспечивает отличную обработку поверхности.

Специальные решения

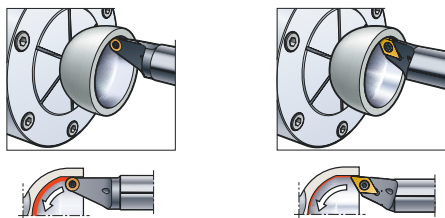
Разработаны для оптимизации черновой обработки из прутков.

- Специальное сверло Coromant U-drill
 - D 22-35 мм
 - WCMX, GC1020, H13A
- Исходные рекомендации по режимам резания для титана и кобальт хрома.
 - Скорость $v_C = 50-80$ м/мин.
 - Подача $f_n = 0.08-0.12$ мм/об.



Типовые решения Sandvik Coromant

Чашки шарнира с малым радиусом и/или нежесткой фиксацией (диаметр не менее 34 мм)



Черновая обработка



Державка: A20M-SRXDR 08-R
Пластина: R300-0828E-PL 1030
Режимы резания: $v_c = 50-80$ м/мин,
 $f_n = 0.1-0.15$ мм/об, $a_p = 1$ мм



Получистовая обработка

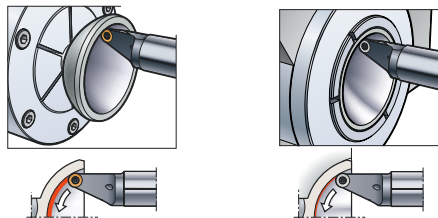
Державка: A20M-SDXCR 11-R
Пластина: DCGT11T308-UM 1105
Режимы резания: $v_c = 40-60$ м/мин,
 $f_n = 0.08-0.1$ мм/об, $a_p = 0.1-0.25$ мм



Чистовая обработка

Державка: A20M-SDXCR 11-R
Пластина: DCGT11T308-UM 1105
Режимы резания: $v_c = 40-60$ м/мин,
 $f_n = 0.08-0.1$ мм/об, $a_p = 0.05-0.15$ мм

Чашки шарнира без ограничения радиуса и/или с жесткой фиксацией (диаметр не менее 34 мм)



Черновая обработка



Державка: A20M-SRXDR 08-R
Пластина: R300-0828E-PL 1030/1010
Режимы резания: $v_c = 50-80$ м/мин,
 $f_n = 0.1-0.15$ мм/об, $a_p = 1.5$ мм



Получистовая обработка

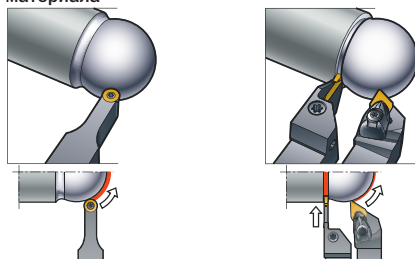
Державка: A20M-SRXDR 08-R
Пластина: R300-0828E-PL 1030/1010
Режимы резания: $v_c = 50-80$ м/мин,
 $f_n = 0.1-0.15$ мм/об, $a_p = 0.1-0.3$ мм



Чистовая обработка

Державка: A20M-SRXDR 08-R
Пластина: R300-0828E-PL 530
Режимы резания: $v_c = 40-60$ м/мин,
 $f_n = 0.08-0.12$ мм/об, $a_p = 0.05-0.15$ мм

Производство головок шарнира из пруткового материала



Черновая обработка



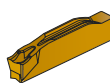
Державка: SRDCN 2020K 10-A
Пластина: RCMT 10 T3 MO-SM 1105
Режимы резания: $v_c = 40-60$ м/мин,
 $f_n = 0.1-0.15$ мм/об, $a_p \leq 1$ мм

Получистовая обработка



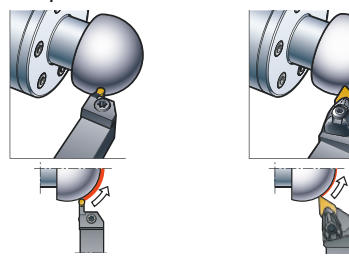
Державка: RF123J13-2525MB
Пластина: N123J1-0600-RE 7025
Режимы резания: $v_c = 180-230$ м/мин,
 $f_n = 0.04-0.08$ мм/об, $a_p = 0.05-0.10$ мм

Чистовая обработка

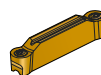


Державка: RF123F20-1616B
Пластина: N123F2-0250-0002-CM 1105
Режимы резания: $v_c = 40-60$ м/мин,
 $f_n = 0.05-0.1$ мм/об

Производство головок шарнира из кованого материала



Черновая обработка



Державка: RF123J13-2525MB
Пластина: N123J2-0600-RO 1105
Режимы резания: $v_c = 40-60$ м/мин,
 $f_n = 0.1-0.15$ мм/об, $a_p \leq 1$ мм

Получистовая обработка



Державка: RF123J13-2525MB
Пластина: N123J1-0600-RE 7025
Режимы резания: $v_c = 180-230$ м/мин,
 $f_n = 0.04-0.08$ мм/об, $a_p = 0.05-0.10$ мм

Фрезерование жаропрочных сплавов

При фрезеровании жаропрочных сплавов необходимо соблюдать определенные требования к построению технологического процесса.

- Для фрезерования жаропрочных сплавов часто необходимы более жесткие и мощные станки, чем для фрезерования углеродистой стали.
- Биение фрезы как в радиальном, так и в осевом направлениях, должно быть возможно меньшим, что очень важно для поддержания постоянной нагрузки на зуб, обеспечения плавности обработки и предотвращения преждевременной поломки отдельных зубьев фрезы.
- Режущие кромки должны быть острыми с оптимальным округлением, чтобы избежать налипания стружки при выходе пластины из зоны резания.
- Количество зубьев фрезы, одновременно находящихся в резании, должно быть максимальным. Это обеспечит высокую производительность при условии достаточной жесткости системы СПИД.
- Скорости резания жаропрочных сплавов обычно низкие. На практике часто сочетают довольно низкую скорость резания и умеренно высокую подачу на зуб, чтобы толщина стружки не была меньше 0,1 мм, что, в свою очередь, препятствует излишнему упрочнению обрабатываемого материала.
- При низкой скорости подачи, для исключения налипания стружки, необходим обильный поток СОЖ в зону режущей кромки. Для жаропрочных материалов рекомендуется подача СОЖ через шпиндели оборудования. Подача СОЖ под высоким давлением продлевает срок службы инструмента (для фрезерования керамическими пластинами подача СОЖ не требуется).
- Геометрия режущей кромки всегда должна быть положительной.

- При черновой обработке с глубиной резания более 5 мм, угол в плане не должен превышать 45°. На практике рекомендуется использование круглой пластины с положительным передним углом.
- При разработке фрез специальной конструкции необходимо предусмотреть достаточное пространство между зубьями для эффективного удаления стружки с режущих кромок.
- Износ по задней поверхности режущей кромки не должен превышать 0,2 мм для фрез типа R390, 0,3 мм для фрез с круглыми твердосплавными пластинами и 0,6 мм для фрез с пластинами из керамики. В противном случае возможность внезапного отказа сильно повышается. На практике лучше заменять режущие кромки часто, чтобы обеспечить стабильность процесса обработки.
- Попутное фрезерование следует применять, чтобы обеспечить уменьшение толщины стружки вплоть до нулевого значения на выходе из резания и тем самым снизить возможность налипания стружки.
- Обработка жаропрочных сплавов на основе железа, сплавов на никелевой основе (Inconel 625) после закалки, обычно проходит легче, чем обработка жаропрочных сплавов на никелевой основе в сыром состоянии и сплавов на кобальтовой основе.



Разработка технологии фрезерования

Чтобы оптимизировать цикл обработки, необходимо принять решение о:

Типе операции;

Траектории инструмента;

Направлении фрезерования;

Типе фрезы и инструментальном материале;

Порядке выполнения переходов.

Учет вышеупомянутых факторов, конечно, является важным, однако, чтобы достичь

оптимизированного процесса, следует сочетать эти параметры с применением специфических технологических приемов для обеспечения надежной производительной обработки. В данном руководстве даны рекомендации, в каком порядке наиболее оптимально организовать процесс обработки для фрезерования жаропрочных сплавов, а также рассматриваются важные факторы успеха для каждой стадии обработки.



Типичные детали

Благодаря отличным физико-механическим свойствам жаропрочным сплавам, они применяются во многих промышленных отраслях, включая:

Газотурбинные двигатели

- Детали камеры сгорания и турбины, кронштейны

Некоторые детали автомобилей

- Турбокомпрессоры, выпускные клапаны

Детали для медицинской промышленности

- Стоматология, протезирование

Детали космических аппаратов

- Аэродинамические обтекатели, детали энергетических установок космических кораблей

Ядерные энергетические установки

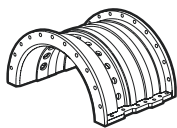
- Штоки управления, приводные механизмы

Нефтегазовая промышленность

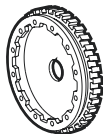
- Детали для морских платформ

Наиболее распространено применение жаропрочных сплавов в производстве авиационных двигателей. Использование жаропрочных сплавов для производства деталей камеры сгорания постоянно возрастает. Тогда как в 1950 году только около 10% общей массы авиационного газотурбинного двигателя производилось из жаропрочных сплавов, в настоящее время в современных двигателях этот показатель достиг 50%. Прогнозируют, что жаропрочные сплавы будут и в дальнейшем широко применяться в производстве деталей камеры сгорания авиационных двигателей. Благодаря последним достижениям металлургии, разрабатываются и внедряются в производство все новые поколения жаропрочных сплавов.

Типичные детали – аэрокосмическая промышленность



Корпуса камеры сгорания



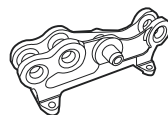
Диски



Кольца



Лопатки/моноколеса



Монтажные кронштейны

Стратегия обработки

Детали

Большинство деталей из жаропрочных сплавов – это важные части авиационных двигателей со сложными поверхностями, которые необходимо обрабатывать. Например, при обработке корпусной детали двигателя большая часть времени затрачивается на обработку выборок по периферии, плоскостей разъема и фланцев. Тщательное планирование операций и применение современных инструментальных материалов и прогрессивных конструкций инструмента могут значительно сократить время цикла. Планирование последовательности операций с целью снижения деформации детали также является важным фактором при выборе стратегии обработки.

Параметры станка

Компоновка (горизонтальный/вертикальный)

Для больших деталей, таких как корпусные детали двигателей, которые имеют много разных элементов, обеспечение доступа к которым является проблемой, лучше всего использовать горизонтальный станок. В этом случае стружка также легче удаляется, что предупреждает ее повторное резание и повышает стойкость инструмента. Для некоторых кольцевых деталей и для кронштейнов, вертикальный станок обеспечивает повышенную жесткость СПИД.

Количество управляемых осей (3/4/5)

Горизонтальные станки обычно имеют 4-5 осей, что обеспечивает хороший доступ, например, к закрытым поверхностям корпусных деталей.

Для обработки сложных деталей (трехмерные профили, моноколеса) используются 5-ти осевые жесткие станки с полным одновременным управлением по всем осям.

Скорость вращения шпинделя

Выбор типа шпиндельного узла по скорости

вращения и мощности определяется используемым режущим инструментом:

а) Для цельного твердосплавного инструмента скорость резания (v_c) составляет от 30 до 100 м/мин. Для диаметров фрез от 8 до 16 мм частота вращения шпинделя от 4000 до 600 об/мин. Нет особых требований по мощности и моменту.

б) Для твердосплавных пластин скорость резания (v_c) обычно не превышает 40 м/мин, для диаметров фрез от 25 до 80 мм частота вращения шпинделя от 500 до 159 об/мин. Требуется высокий момент и стабильность частоты вращения на низких скоростях. Желательно наличие коробки скоростей или редуктора в приводе. Если используется мотор-шпиндель, то он должен иметь большой запас по моменту.

с) Использование фрез с керамическими пластинами требует и высокой скорости, и большого момента. Скорость (v_c) обычно достигает 1000 м/мин, для диаметров фрез 50 мм частота вращения 6365 об/мин. Могут применяться шпиндели с любым типом привода, но обязательно с высокой мощностью.

Подача стола

При использовании фрез с твердосплавными пластинами подача стола довольно мала, так что следует предпочесть статическую жесткость привода нежели его скоростные характеристики.

При использовании фрез с керамическими пластинами для черновой обработки подача стола может достигать до 2,5 м/мин. Если подача стола достигает критических значений, то необходимо соблюдать осторожность, использовать скругленные траектории, функцию «просмотра вперед» и отслеживать как система управления справляется с изменением направления перемещений, чтобы избежать подрезов/ зарезов и т.д.

Параметры мощности/ крутящего момента

Мощность изменяется, в основном, в зависимости от удельного съема металла, от толщины стружки, геометрии фрезы и скорости. Чем выше удельный съем металла (Q , см³/мин), тем больше показатель мощности.

Так как скорость вращения шпинделя при обработке жаропрочных сплавов гораздо ниже, чем при обработке более привычных материалов, необходимо обеспечить соответствие мощности и крутящего момента при низкой частоте вращения (станок с недостатком крутящего момента и мощности не сможет обеспечить снятие стружки с постоянной толщиной и стабильную работу).

На рисунке представлен график мощности станка при низкой частоте вращения.

Требования к шпинделю

Большинство жаропрочных сплавов обладают высокой механической прочностью, самоупрочняются при обработке и имеют склонность к налипанию, не свойственную другим материалам. Тяжелое оборудование с конусом ISO 50 в шпинделе рекомендуется использовать для уменьшения вибрации и склонности к самоупрочнению обрабатываемого материала.

Использование смазочно-охлаждающей жидкости

В отличие от фрезерования большинства других материалов, для жаропрочных сплавов рекомендуется всегда использовать СОЖ в качестве вспомогательного средства при

удалении стружки, стабилизации температуры режущей кромки и предотвращении повторного перерезания стружки. Было показано, что подача СОЖ под высоким давлением (70 бар) через шпиндель/инструмент и снаружи имеет преимущество по сравнению с подачей под низким давлением.

Требования к приспособлению

Надежность приспособления и способ закрепления детали имеют решающее значение для успешной обработки. Детали авиационных двигателей часто являются тонкостенными и состоят из большого количества сложных элементов, которые легко деформируются и поддаются вибрации. Именно по этой причине корпусные детали двигателей часто требуют сложного крепления, чтобы снизить вибрацию и удержать заготовку от смещения под действием сил резания. Умеренная величина съема и использование инструмента с положительной геометрией может обеспечить надежную обработку без деформации.

Жесткость системы СПИД

Состояние и жесткость станка влияет на качество обработанной поверхности и может снизить стойкость. Чрезмерный износ шпиндельных подшипников или механизма подачи может привести к низкому качеству поверхности. На стойкость инструмента, наряду с жесткостью самого станка, оказывают влияние такие факторы, как вылет инструмента, тип оснастки (Cormant Capto), использование инструмента с демферами и т.д.



Выбор типа фрезы

В настоящее время фрезерование является широко универсальным методом обработки. В течение нескольких последних лет наряду с усовершенствованием металлорежущих станков произошло значительное расширение области применения фрезерного инструмента. Поэтому сегодня выбор способа обработки неоднозначен. В дополнение к традиционным областям использования фрез добавились такие как: изготовление отверстий, резьбофрезерование, обработка полостей и сложных поверхностей, которые раньше обрабатывались точением, сверлением и т.д. Инструментальная оснастка также постоянно дорабатывается с целью повышения производительности, надежности и качества обработки как в отношении инструмента со сменными твердосплавными, так и с керамическими пластинами.

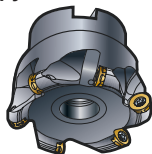
Целью оптимизации является применение подходящей стратегии для определенного инструмента и обрабатываемой детали с максимальным удельным съемом металла (Q см³/мин), который необходимо соотносить с экономичной стойкостью.

При фрезеровании следует учитывать многие переменные:

- D_c – диаметр фрезы
- Z_n – число эффективных зубьев фрезы
- κ_r – угол в плане
- $a_{p \max}$ – максимальная глубина резания
- $a_{e \max}$ – максимальное резание в радиальном направлении

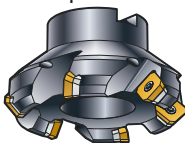
Конструкция Торцевые фрезы

Круглые пластины



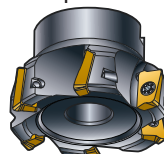
CoroMill® 300

$\kappa_r = 45^\circ$



CoroMill® 245

$\kappa_r = 90^\circ$



CoroMill® 390

Концевые фрезы

Круглые пластины



CoroMill® 300

$\kappa_r = 90^\circ$



CoroMill® 390

Цельная твердосплавная



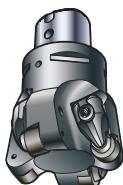
CoroMill® Plura

Сменная фрезерная головка



CoroMill® 316

Фреза с керамическими режущими пластинами



S-R120R/CoroMill® 300C

Сферическая фреза



CoroMill® Ball nose 216

Диаметр используемой фрезы зависит от выполняемой операции и мощности станка. Выбор фрезы с керамическими, твердосплавными пластинами или цельной твердосплавной определяется производительностью, требованиями к качеству поверхности и ограничениями обработки (станок, приспособление и т.д.).

Выбор угла в плане/ типа пластины (45° или 90° / круглая пластина) и количества зубьев оказывает огромное влияние на стратегию обработки и, в конечном счете, на стойкость и достижимую производительность Q . Тип детали и стратегия обработки также влияют на выбор фрезы.

Фрезерование

Направление фрезерования

Во время фрезерования заготовка подается по или против направления вращения фрезы, что изменяет характер процесса входа и выхода зубьев из резания.

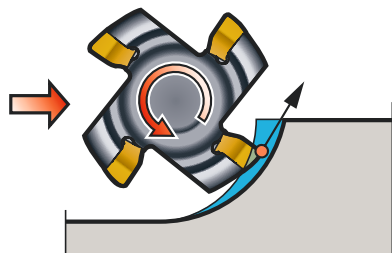
- При встречном фрезеровании (иногда его называют традиционным фрезерованием) толщина стружки при врезании равна нулю, на выходе – максимальна. В таком случае возникают силы трения, «отжимающие» фрезу и заготовку друг от друга. Пластина долго не может врезаться в заготовку, нагреваясь, затирая и


наклепывая материал заготовки, что приводит к самоупрочнению поверхности.

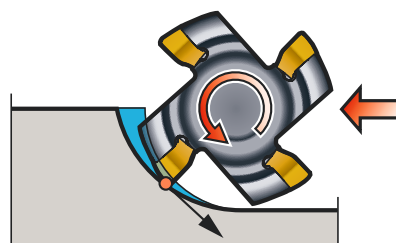
- При попутном фрезеровании толщина стружки на входе зуба в резание максимальна. В таком случае удается избежать высоких температур в зоне резания и минимизировать склонность материала к упрочнению.

При фрезеровании жаропрочных сплавов твердосплавными пластинами всегда применяйте попутное фрезерование.

 Встречное фрезерование



 Попутное фрезерование



Обработка фрезами со сменными неперетачиваемыми пластинами

Диаметр фрезы и положение при торцевом фрезеровании

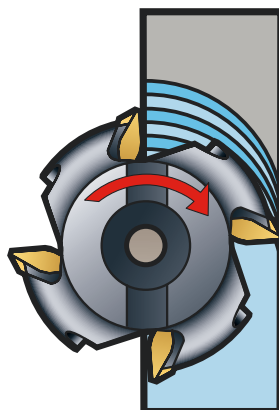
Выбор диаметра фрезы зависит, как правило, от ширины обрабатываемой заготовки, а также от мощностных характеристик оборудования. При этом, важным фактором, определяющим успешное выполнение операции, является взаимное расположение обрабатываемой поверхности и фрезы.

При обработке за один проход, рекомендуется использовать фрезу, диаметр которой на 20 -30 % больше ширины заготовки. Фрезу следует располагать несимметрично, так, чтобы стружка на выходе была возможно тоньше. Если необходимо произвести несколько проходов, то ширина радиального врезания (a_e) должна составлять 75% от диаметра фрезы. При этом формирование стружки и нагрузка на режущую кромку будут оптимальными.

Избегайте симметричного расположения оси фрезы по оси заготовки.

Условия входа и выхода при резании

Каждый раз, когда зуб фрезы врезается в заготовку, пластина подвергается ударной нагрузке. Для процесса фрезерования очень важно обеспечить наилучший контакт режущих кромок с обрабатываемым материалом при входе и выходе каждого зуба. Правильное положение фрезы является важным и позволяет избежать получения толстой стружки при выходе.



При контурном фрезеровании положение фрезы можно определить заранее, а при торцевом фрезеровании положение фрезы относительно заготовки меняется и может быть неблагоприятным на некоторых участках траектории.

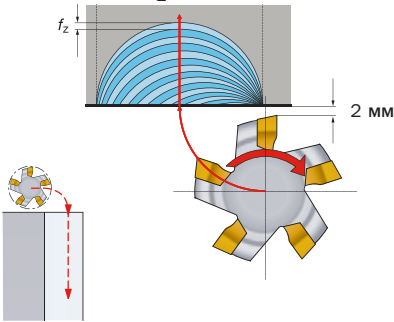
1) ширина радиального врезания (a_e) не должна превышать 75% от диаметра фрезы и не должна быть менее 30% - когда менее двух зубьев находится в

резании (если $z_n > 2$).

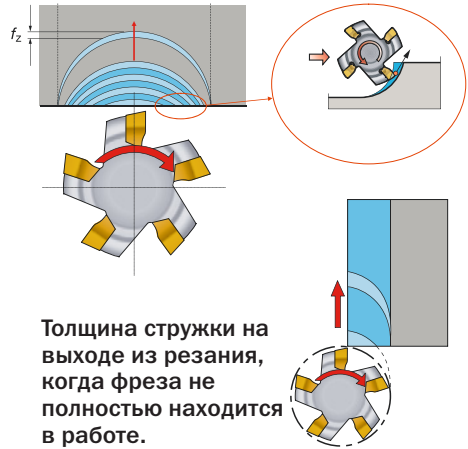
- 2) фрезу следует сместить с оси симметрии заготовки, что позволит получить практически нулевую толщину стружки при выходе из резания.
- 3) для того, чтобы фреза плавно входила в резание, вход в заготовку следует тщательно программировать, используя один из приведенных ниже способов:

Накатывание

$$\text{Прог. рад.} = \left(\frac{D_e}{2}\right) + 2$$



Снижение подачи на входе

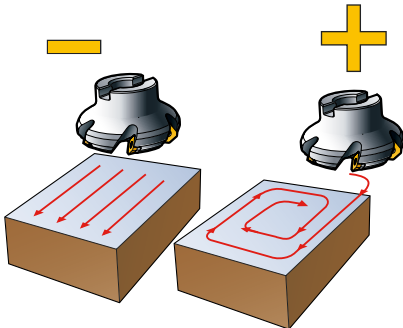


Толщина стружки на выходе из резания, когда фреза не полностью находится в работе.

При фрезеровании больших плоскостей, траекторию инструмента следует выбрать так, чтобы контакт фрезы с заготовкой не прерывался, обходя поверхность по периметру, а не за несколько отдельных проходов. При смене направления обработки, выбирайте радиусную траекторию инструмента, чтобы

не останавливать движение фрезы и избежать нежелательной вибрации.

Ниже представлены изношенные пластины после обработки сплава Waspalloy с одинаковыми режимами резания и стойкостью, которые демонстрируют преимущество обработки с постоянным контактом фрезы с заготовкой.



Многопроходная обработка (вход/выход).



Постоянный контакт, замкнутая траектория.

Торцевое фрезерование твердосплавными пластинами

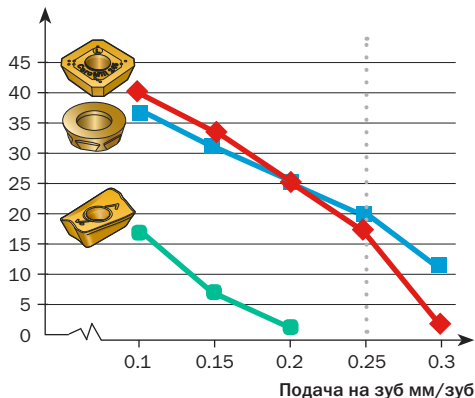
Влияние типа пластины

При обработке жаропрочных сплавов выбор типа пластины влияет на толщину стружки, силы резания и стойкость.

D_c 50 мм, v_c 30 м/мин, a_e 32 мм (70%), a_p 2 мм

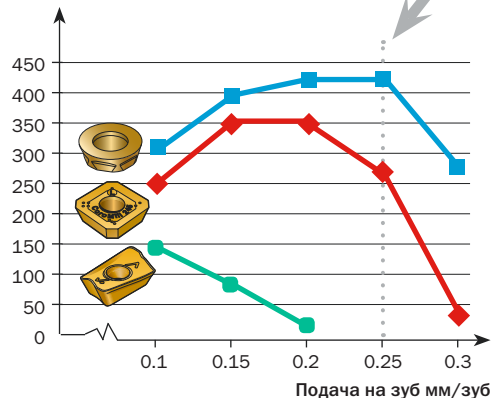
Материал: Inconel 718 (42 HRC)

Время резания (мин)



- R245-050Q22-12H, $z_p = 5$, R245-12T3E-ML GC2040
- R300-063Q22-12H, $z_p = 7$, R300-1240E-MM GC2040
- R390-050Q22-11H, $z_p = 7$, R390-11T308E-ML GC2040

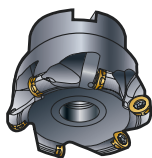
Удельный съем металла, см³



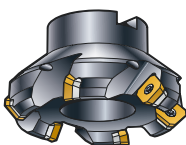
Рекомендация – для торцевого фрезерования жаропрочных сплавов используйте фрезы с круглыми пластинами обеспечивающие естественное утончение стружки,

например, CoroMill 300.

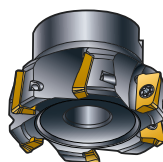
Первый выбор
круглые пластины
CoroMill® 300



Альтернативный выбор
 $\kappa_r = 45^\circ$
CoroMill® 245



Допустимый вариант
 $\kappa_r = 90^\circ$
CoroMill® 390



Виды износа при фрезеровании жаропрочных сплавов

Износ по задней поверхности

Быстрый износ по задней поверхности, вызывающий ухудшение качества обработанной поверхности или выход размера за пределы поля допуска.

Причина: слишком большая скорость резания или недостаточная износостойкость.

Устранение: уменьшить скорость резания.
Выбрать более износостойкую марку сплава.

Причина: слишком малая толщина стружки.

Устранение: увеличить подачу.

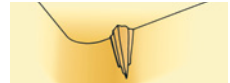
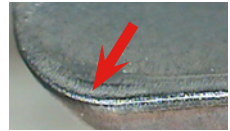
Образование проточкины

Образование проточкины снижает качество обработанной поверхности и приводит к опасности скола режущей кромки.

Причина: самоупрочнение обрабатываемого материала.

Устранение: выберите круглую пластину/уменьшите a_p .

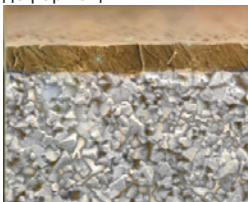
Наиболее распространенными критериями износа являются чрезмерный износ по задней поверхности, образование проточкины на режущей кромке, ухудшение качества обработки или выход за поле допуска. Другими факторами являются наличие лунки по передней поверхности и разрушение режущей кромки сколом. Жаропрочные сплавы склонны самоупрочняться, что приводит к образованию проточкины режущих кромок на глубине резания при повторных проходах.



Первый выбор

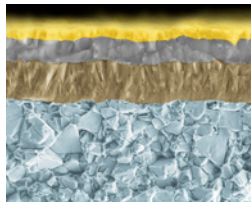
GC1030

Твердый сплав с покрытием PVD-TiAlN, предназначенный для фрезерования жаропрочных сплавов на средней скорости. Хорошая стойкость к образованию наростов на режущей кромке и пластической деформации.



S40T

Высокопрочный твердый сплав с тонким покрытием CVD, стойкий к вибрации и другим тяжелым условиям резания. Обеспечивает долгий срок службы оборудования и надежен в работе.



Дополнительные:

S30T

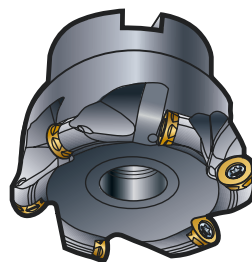
Сочетание микроразностного твердого сплава и износостойкого покрытия PVD дает очень острые режущие кромки, устойчивые к усталостным изменениям материала и микровыкрашиванию. Увеличивает срок службы инструмента на повышенных скоростях резания.

GC2040

Прочный сплав с покрытием MT-CVD, предназначенный для фрезерования литейных жаропрочных сплавов. Высокая жаростойкость.

CoroMill®300 – фреза с круглыми пластинами для торцевого фрезерования

При обработке жаропрочных сплавов используются фрезы CoroMill 300 с тремя основными геометриями:



CoroMill® 300

Хорошие условия



Хорошая острота и точность режущей кромки. Положительная геометрия с усиленной кромкой. Предпочтительная геометрия при обработке сплавом S30T.

Первый выбор



Хорошая острота и точность режущей кромки в сочетании с надежностью. Предпочтительная геометрия при обработке сплавом S40T.

Тяжелые условия



Подходит для стандартных условий. Сплав GC2040 обеспечивает большую прочность кромки по сравнению с геометриями E-PL и E-MM.

Рекомендации по выбору сплава и геометрии пластины

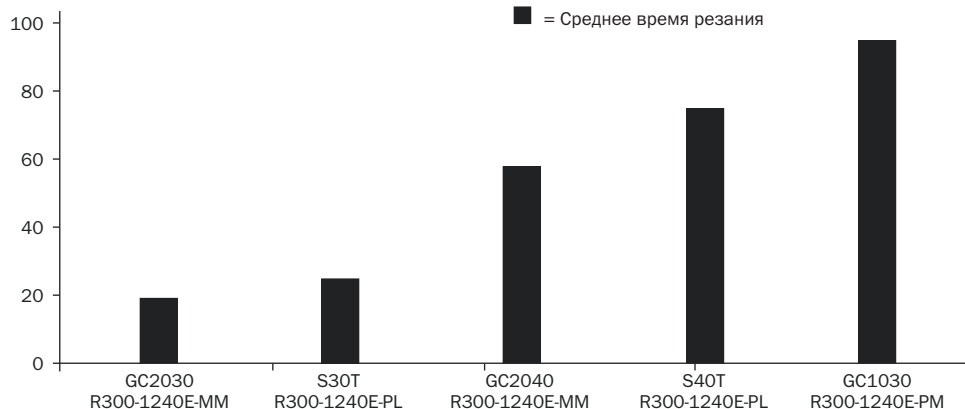
Инструмент R300-063Q22-12H

Z_n 7, D_c 51 мм, v_c 30 м/мин, a_e 36 мм,

a_p 1.5 мм, f_z 0.2 мм/зуб, h_{ex} 0.12 мм

Материал: Inconel 718 (40 HRC)

Время резания (мин)



Рекомендации: наибольший срок службы и общее количество удаленного металла обеспечивает режущая пластина GC1030 E-PM.

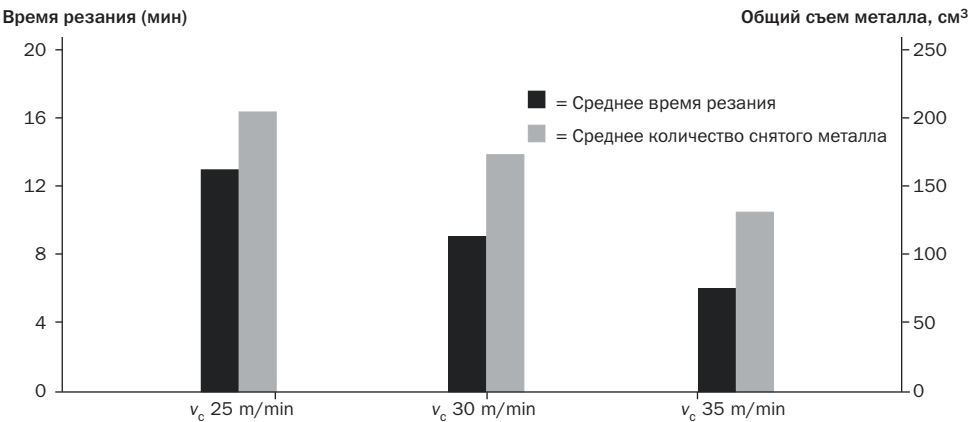
Влияние скорости резания, v_c

Скорость резания и твердость материала в наибольшей степени влияют на стойкость инструмента при обработке жаропрочных сплавов. Температуры в зоне резания при обработке жаропрочных сплавов обычно составляют от 750 до 1020°C. Они достаточно высоки, поэтому

окисление и самоупрочнение также начинают влиять на общий износ инструмента.

Данные ниже показывают, что увеличение скорости резания на 5 м/мин снижает стойкость и общий съём материала одной кромкой примерно на 30%.

Инструмент R300-063Q22-12Н, пластина R300-1240E-PL S40T
 z_n 7, D_c 51 мм, a_g 36 мм, a_p 2 мм,
 f_z 0.24 мм/зуб, h_{ex} 0.18 мм,
Материал: Inconel 718 (44 HRC)



Рекомендации: при черновой обработке твердосплавными режущими пластинами скорость не должна превышать (меньшее значение соответствует более твердым материалам):

Первый выбор:

GC1030 макс. v_c 30-35 м/мин

S40T макс. v_c 25-30 м/мин

Дополнительные:

S0T макс. v_c 30-35 м/мин

GC2040 макс. v_c 25-30 м/мин

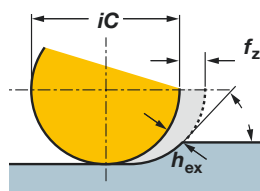
Влияние подачи на зуб, f_z

Как и для заготовок из других материалов, при обработке жаропрочных сплавов подача и глубина резания являются важными факторами, влияющими на стойкость. Фактическое значение подачи на зуб высчитывается исходя из максимальной толщины стружки (h_{ex}) – она отклоняется от подачи и зависит от двух факторов:

Используемый угол в плане (κ_r)

Для пластин с углом в плане 45° и для круглых пластин происходит утонение стружки, что позволяет увеличить подачу по сравнению с пластинами с углом в плане $\kappa_r = 90^\circ$.

Максимальная толщина стружки $h_{ex} = f_z \times \sin \kappa_r$



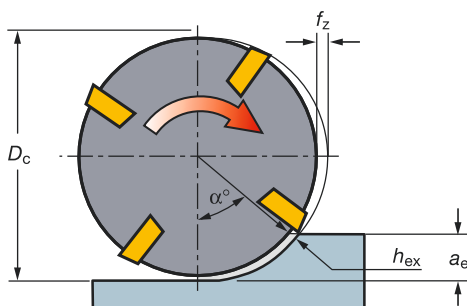
Круглые пластины

$$h_{ex} = f_z \times \sqrt{\frac{4a_e}{iC} - \left(\frac{2a_e}{iC}\right)^2}$$

Ширина обработки (a_e)/радиальная ширина

Радиальная ширина, (a_e/D_c)

Это ширина детали в резании по отношению к диаметру фрезы. Это расстояние по обрабатываемой поверхности, которое покрывается инструментом. Когда a_e меньше половины диаметра, максимальная толщина стружки уменьшается по отношению f_z – таким образом, можно увеличить подачу.

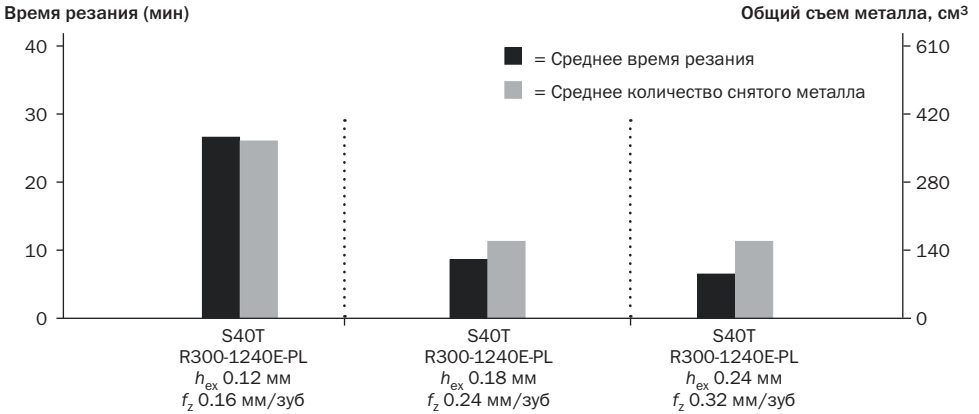


Соотношение глубины резания и диаметра, a_e/D_c	Угол в плане, α	Корректирующий коэффициент, f_n	f_z мм/зуб дает толщину стружки в мм:		
			h_{ex} 0.1	h_{ex} 0.15	h_{ex} 0.2
0.25	60°	1.16	0.12	0.17	0.23
0.2	53°	1.25	0.13	0.19	0.25
0.15	46°	1.4	0.14	0.21	0.28
0.1	37°	1.66	0.17	0.25	0.33
0.05	26°	2.3	0.23	0.34	0.46

Влияние геометрии пластины на подачу

Выбор геометрии в зависимости от подачи на зуб

Инструмент R300-063Q22-12H, z_n 7, D_c 51 мм, v_c 30 м/мин,
 a_e 36 мм, a_p 2 мм,
 Материал: Inconel 718 (44 HRC)



Рекомендация – наибольшая производительность и удельный съём металла были получены при использовании E-PL геометрии и подачи на зуб 0,16 мм (0,12 мм h_{ex}).

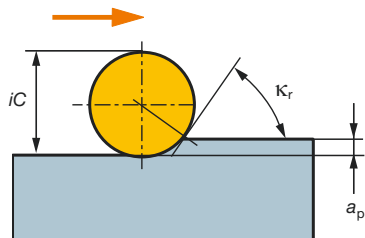
Геометрия	Мин.	Мах.
E-PL	0.08 мм	0.18 мм
E-MM	0.1 мм	0.3 мм
M-PM	0.15 мм	0.3 мм

Влияние угла в плане

При торцевом фрезеровании жаропрочных сплавов выбор правильной глубины резания и угла в плане влияет на стойкость и производительность. Несмотря на наличие ограничений на глубину резания при использовании фрез с круглыми пластинами, они все же наиболее предпочтительны для обработки жаропрочных сплавов.

В отличие от титановых корпусных деталей авиационных двигателей, элементы из жаропрочных сплавов имеют геометрию, которая требует высокого удельного съема металла, но при незначительной глубине резания, например, лопатки, обечайки и т.д. Это позволяет оптимизировать угол в плане при различной глубине резания.

Соотношение глубины резания и диаметра a_p/iC	Глубина резания для диаметра пластины, в мм				Угол в плане κ_r
	8	10	12	16	
0.25	2	2.5	3	4	60°
0.2	1.6	2	2.4	3.2	53°
0.15	1.2	1.5	1.8	2.4	46°
0.1	0.8	1	1.2	1.6	37°
0.05	0.4	0.5	0.6	0.8	26°



Рекомендации по выбору сплава и геометрии пластины

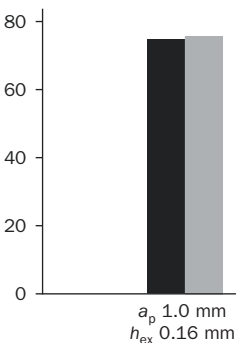
Инструмент R300-063Q22-12H, пластина R300-1240E-MM 2040

z_n 7, D_c 51 мм, v_c 30 м/мин,

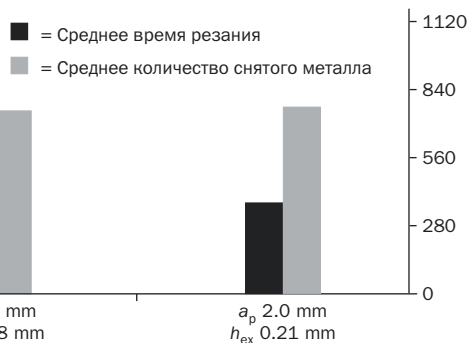
a_e 36 мм, f_z 0.3 мм/зуб

Материал: Inconel 718 (40 HRC)

Время резания (мин)



Общий съем металла, см³

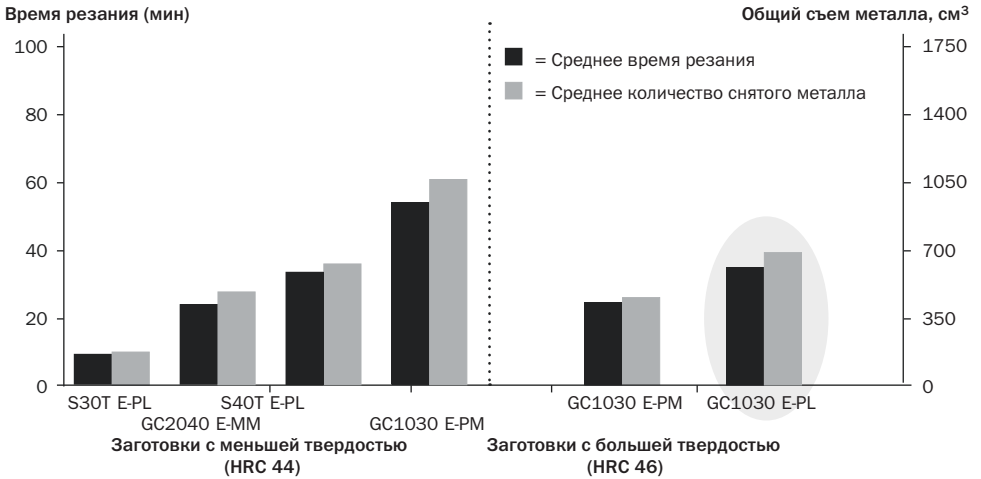


Рекомендация. Наиболее эффективная глубина резания 1 мм, при этом угол в плане равен 33 градусам при использовании круглой пластины.

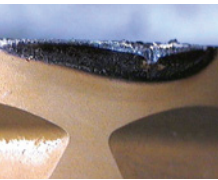
Влияние твердости обрабатываемого материала, сплава и геометрии, E-PL 1030

Можно заметить, что новый сплав 1030 и геометрия E-PL в более твердых материалах выдерживают нагревание при резании гораздо лучше, чем сплав S40T и геометрия E-PL. Более твердая основа сплава и оптимальная микрогеометрия сплава 1030T обеспечивают большую стойкость к образованию проточки и пластической деформации.

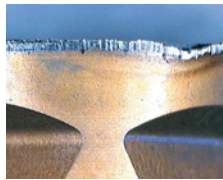
Инструмент R300-063Q22-12H,
 D_c 51 мм, f_z 0.24 мм/зуб, h_{ex} 0.18 мм,
 a_p 2 мм, a_e 36 мм, v_c 30 м/мин
 Материал: Inconel 718



Твердость 40 HRC

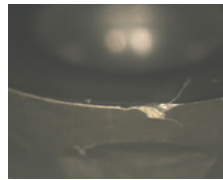


E-MM 2040 – 25 мин

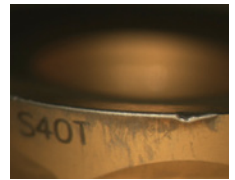


E-PM 1030 – 55 мин

Твердость 44 HRC



E-PL S30T – 10 мин



E-PL S40T – 33 мин

Твердость 46 HRC



E-PM 1030 – 24 мин

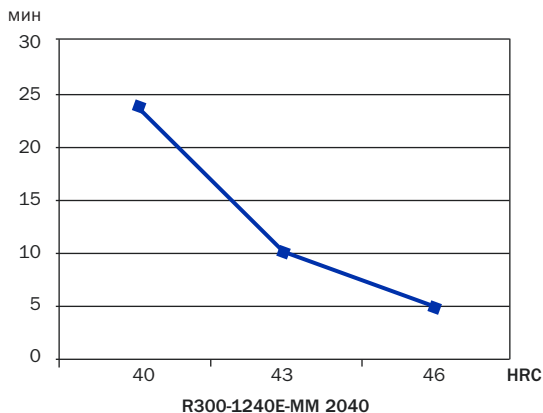


E-PL 1030 – 36 мин

Влияние твердости обрабатываемого материала

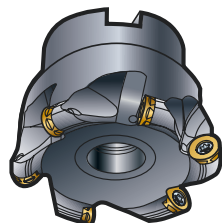
Даже небольшие изменения твердости материала значительным образом сказываются на стойкости инструмента.

Инструмент R300-063Q22-12Н,
 D_c 51 мм, f_z 0.24 мм/зуб, h_{ex} 0.18 мм,
 a_p 2 мм, a_e 36 мм, v_c 30 м/мин
Материал: Inconel 718



Выводы. Торцевое фрезерование жаропрочных сплавов с использованием твердосплавных пластин

- CoroMill 300 (фреза с круглыми пластинами) обеспечивает оптимальную обработку.
- Сплав S40T/GC1030 имеет лучшие характеристики.
- Используйте геометрию E-MM/E-PL, кроме случаев максимальной толщины снимаемой стружки (>0.3 мм/зуб). В таких случаях M-MM обеспечивает большую прочность кромки.
- Увеличение скорости резания значительно снижает стойкость; 25 м/мин – наилучшее соотношение стойкости и производительности.
- Фрезы с мелким шагом зубьев с подачей СОЖ через шпиндель обеспечивают максимальную производительность.
- Стойкость инструмента уменьшается с увеличением осевой глубины резания (a_p). Производительность снятия материала меняется не так сильно, и при глубине резания $a_p = 1$ мм составляет на 30% больше, чем при глубине 1,5 мм.
- Оптимальные параметры:



CoroMill® 300

Пластина GC1030 E-PM

Скорость подачи 0.2 мм/зуб
Скорость резания 25 м/мин
Осевая глубина резания 1 мм

Оптимальная прочность/надежность

Пластина S40T E-PL

Скорость подачи 0.2 мм/зуб
Скорость резания 25 м/мин
Осевая глубина резания 1 мм

Оптимальная производительность/стойкость

Пластина CoroMill® 390 – концевые фрезы/фрезы для обработки уступов

Угол в плане 90° наименее подходит для фрезерования жаропрочных сплавов из-за предрасположенности к образованию проточин.

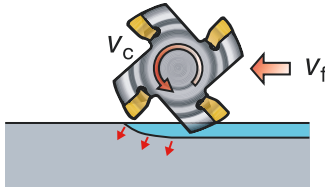
Тем не менее, в некоторых случаях, например для крепежных кронштейнов, корпусов, колец (волнообразный профиль), круговой

интерполяции больших отверстий, прорезания пазов и т.п., требуется фрезерование уступов и контурная обработка.

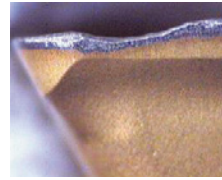
Выбор сплава, геометрии, режимов резания зависит от относительной ширины фрезерования.

Чистовая обработка/фрезерование кромок – фрезерование с небольшой шириной

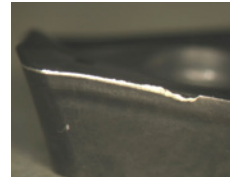
$a_e = 12.5\% \text{ от } D_c$.



Сплав GC2040 E-ML



Сплав S30T E-PL



Фрезерование кромок с незначительной шириной

Инструмент R390-025A25-11H

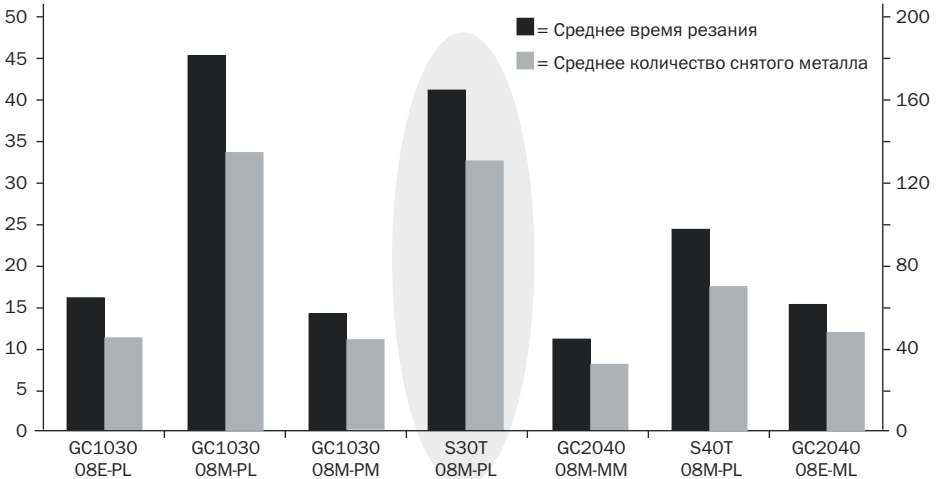
$z_n 4, D_c 25 \text{ мм}, v_c 35 \text{ м/мин}, a_e 3.1 \text{ мм} (12.5\% \text{ от } D_c),$

$a_p 5 \text{ мм}, h_{ex} 0.07 \text{ мм}, f_z 0.11 \text{ мм/зуб}$

Материал: Inconel 718 (40 HRC)

Время резания (мин)

Общий сьем металла, см³



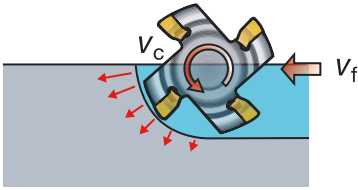
Рекомендация. При незначительной ширине (12.5%) рекомендуется использовать сплав и геометрию S30T M-PL.



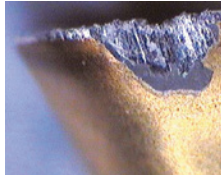
CoroMill® 390

Торцевое фрезерование или большая относительная ширина фрезерования

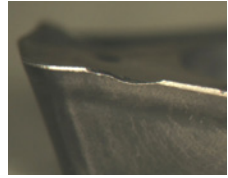
a_e = от 25 до 75% от D_c .



Сплав GC1030 M-PL



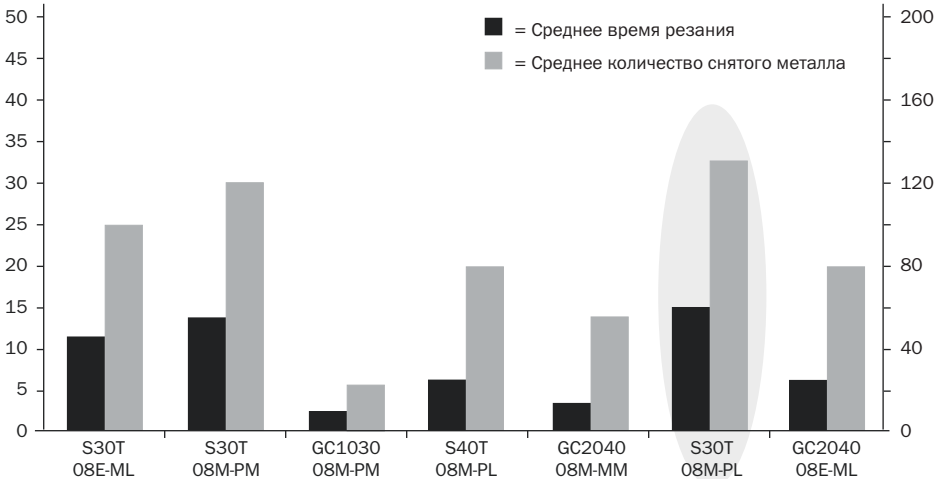
Сплав S30T E-PL



Большая ширина фрезерования/тяжелые условия

Инструмент R390-025A25-11H
 z_n 4, D_c 25 мм, v_c 35 м/мин, a_e 19 мм (75% от D_c),
 a_p 5 мм, h_{ex} 0.07 мм, f_z 0.07 мм/зуб
 Материал: Inconel 718 (40 HRC)

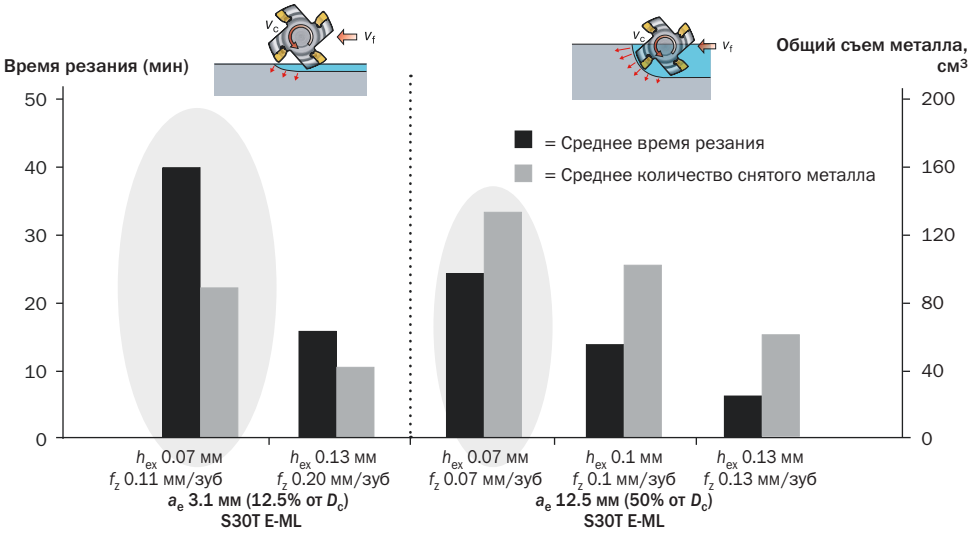
Время резания (мин)



Рекомендация. Наилучшая стойкость при относительной ширине фрезерования 75% была получена при использовании пластины S30T M-PL.

Влияние толщины стружки, h_{ex}

Инструмент R390-025A25-11H
 z_p 4, D_c 25 мм, v_c 25 м/мин, a_p 5 мм,
 Материал: Inconel 718 (44 HRC)



Рекомендация

Для незначительной радиальной ширины, сплав/геометрия S30T E-ML, толщина стружки 0,07 мм.

Для увеличенной радиальной ширины, сплав/геометрия S30 E-ML, толщина стружки 0,1 мм.

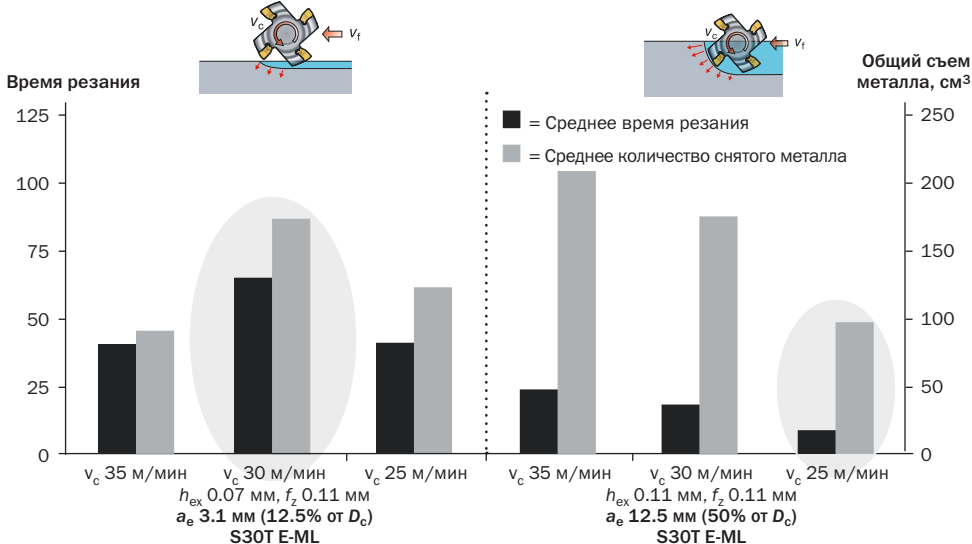
Влияние скорости резания, v_c

Нужно очень аккуратно выбирать скорость резания для торцевого фрезерования жаропрочных сплавов. При увеличении ширины фрезерования необходимо понизить скорость резания.

Инструмент R390-025A25-11H

z_n 4, D_c 25 мм, a_p 5 мм,

Материал: Inconel 718 (40 HRC)



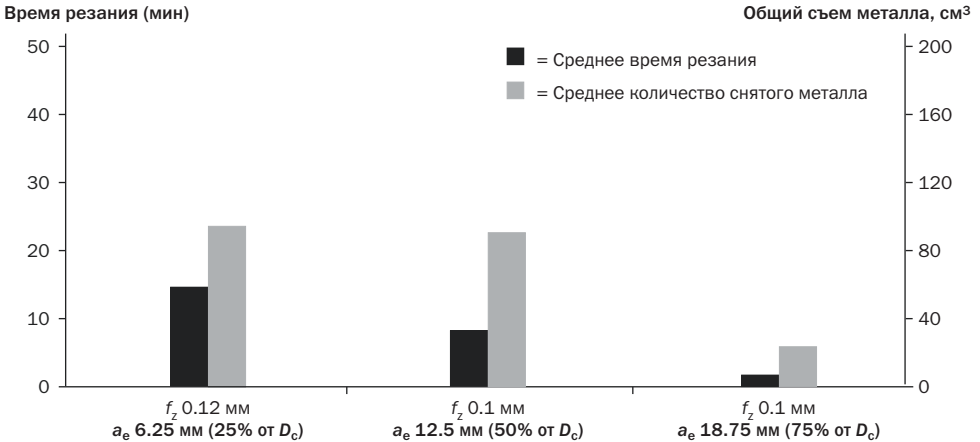
Рекомендация

Наибольшая стойкость и общий сьем металла были получены при использовании S30T E-ML при скорости резания 25 м/мин. Наиболее эффективная пластина при увеличенной скорости резания - S30T E-ML. Достигнута скорость резания 35 м/мин, при ширине фрезерования 50% подаче на зуб 0,1 мм.

Соотношение ширины фрезерования и диаметра фрезы (a_e/D_c)

На графике ниже видно, что фрезерование при большей ширине резания приводит к уменьшению срока службы до значения при неблагоприятных условиях 75% a_e/D_c .

Инструмент R390-025A25-11H, пластина GC2040 E-ML,
 z_n 4, D_c 25 мм, v_c 30 м/мин, a_e 12.5 мм (50% от D_c), h_{ex} 0.1 мм, a_p 5 мм,
Материал: Inconel 718 (40 HRC)



Рекомендация: Производительность снятия материала достигается при рекомендуемой ширине фрезерования около 50% от диаметра инструмента.

Выводы. Фрезерование жаропрочных сплавов концевыми фрезами/ фрезами для обработки уступов

Фрезерование концевыми фрезами/ обработка отверстий по контуру

- Сплав S30T оптимален для незначительной относительной ширины.
- Для сплава S30T геометрия E-ML подходит лучше вне зависимости от условий резания.
- $a_e = 12.5\%$ от D_c , f_z 0,11 мм (h_{ex} 0,07 мм)



CoroMill® 390

Большая ширина фрезерования / обработка пазов / винтовая интерполяция

- При большей ширине оптимален сплав S30T с геометрией E-ML.
- $a_e = 50\%$ от D_c , f_z 0,1 мм (h_{ex} 0,1 мм)

Фрезерование с использованием керамических пластин

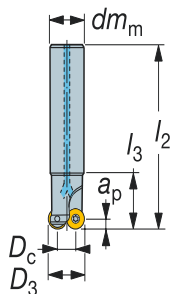
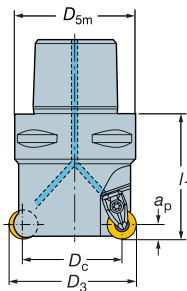
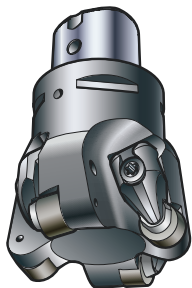
Отличительной особенностью режущего инструмента с керамическими пластинами является намного большая стойкость к воздействию высоких температур по сравнению с твердосплавными пластинами. Это свойство керамических пластин используется при фрезеровании жаропрочных сплавов, так как температуры резания очень высоки. Скорость фрезерования керамическими пластинами обычно в 20 – 30 раз больше скорости обработки твердосплавными пластинами, что, несмотря на низкую подачу, приводит к высокой производительности. Керамические пластины склонны к образованию проточки, именно поэтому главным образом используются круглые пластины, чтобы обеспечить малый угол в плане. Обработка керамическими пластинами отрицательно влияет на структуру

поверхностного слоя детали, поэтому они не могут использоваться для чистовой обработки окончательного контура детали.

Из-за недостатка прочности керамики, для снижения склонности к образованию проточки, используются круглые пластины.

Основное применение инструмента с керамическими пластинами – это обработка корпусных деталей авиационных двигателей и деталей бурового оборудования из-за большого удельного съема металла по сравнению с твердосплавными пластинами, когда припуск на обработку значителен.

Ассортимент фрез. Фрезы с керамическими пластинами входят в специальную программу, чтобы заказать их, пожалуйста, обратитесь в ближайшее представительство фирмы Sandvik Coromant.



S-R120R							
	D_3	Шар, (X)		D_c	Размер	D_{5m}	l_1
		Coromant Capto					
12	50	S-R120R-038C5-12X03	3	38	C5	50	70
	63	S-R120R-051C6-12X04	4	51	C6	63	70
	80	S-R120R-068C6-12X05	5	68	C6	63	72

Пластина	Прижим	Ключ	Опорная пластина	Винт опорной пластины	Ключ для винта опорной пластины
RNGN 120700	5412 034-021	5680 049-01	-	-	-
RNGN 120400	5412 034-021	5680 049-01	176.1-851	3213 010-206	174.1-870

CoroMill 300C							
	D_3	Шар, (X)		D_c	Размер	l_1	l_2
		Coromant Capto					
9	36	R300C-036C3-09M	4	27	C3	40	
9	44	R300C-044C4-09M	4	35	C4	40	
12	36	R300C-036C3-12M	3	24	C3	50	
12	44	R300C-044C4-12M	4	32	C4	50	
12	54	R300C-054C5-12M	4	42	C5	50	
		Цилиндрический хвостовик					
6	20	R300C-020A16-06M	3	14			120
6	25	R300C-025A20-06M	4	19			160
6	32	R300C-032A25-06M	4	26			200
9	25	R300C-025A20-09M	3	16			160
9	32	R300C-032A25-09M	3	23			200
9	40	R300C-040A32-09M	4	31			200
12	32	R300C-032A25-12M	3	20			200
12	40	R300C-040A32-12M	4	28			200
12	50	R300C-050A32-12M	4	38			200
		Крепление на оправке					
12	40	R300C-040Q16-12M	4	28		50	
12	50	R300C-050Q22-12M	4	38		50	

Пластина	Прижим	Ключ
RPNG 060300E	172.9-825-1	174.1-862
RPNG 090300E	172.9-826-1	174.1-863
RPNG 120400E	172.9-827-1	174.1-864

Использование СОЖ при обработке керамическими пластинами

При фрезеровании с применением керамических пластин не следует применять СОЖ. В этом случае использования СОЖ отрицательно влияет на стойкость инструмента. Это происходит вследствие теплового удара при охлаждении и нагревании в области зоны резания при входе и выходе режущей пластины из заготовки. При этом также усиливается отслаивание керамических режущих пластин.

Тем не менее, минимальное количество смазки может дать положительный результат, понизив температуру процесса.

Ниже приведено сравнение характера износа и стойкости керамических пластин при работе с СОЖ и без. Обе пластины работали равное время с одинаковыми режимами.

Без использования СОЖ



С использованием СОЖ



Влияние скорости резания, v_c

Фрезерование инструментом с керамическими пластинами производит меньше тепла, чем точение, благодаря прерывистому резанию. По этой причине при фрезеровании возможно использование скоростей от 700-1000 м/мин по сравнению с 200-300 м/мин при точении. Высокая скорость резания при фрезеровании керамическими пластинами повышает температуру стружки и заставляет ее давать

более сильную усадку.

Скорость резания необходимо уравновесить таким образом, чтобы выделялось достаточное количество тепла в области резания, но при этом не возникало чрезмерного износа керамических пластин. Слишком низкая скорость резания может привести к отслоению вершины пластины, слишком высокая скорость резания может привести к поломке пластины.

Отслоение вершины



Фреза с керамическими пластинами, сплав пластины СС6060, z_n 4, D_3 63 мм, v_c 700 м/мин, a_e 32 мм, f_z 0.1 мм/зуб, a_p 1.5 мм, Материал: Waspalloy

Равномерный износ по задней поверхности



Фреза с керамическими пластинами, сплав пластины СС6060, z_n 4, D_3 63 мм, v_c 1000 м/мин, a_e 32 мм, f_z 0.1 мм/зуб, a_p 1.5 мм, Материал: Waspalloy

Скорость резания – 1000 м/мин является наиболее приемлемой.

Влияние подачи на зуб, f_z

Как и при использовании круглых твердосплавных пластин, толщина стружки различается и зависит от угла в плане. При незначительном отношении глубины к диаметру пластины a_p/iC подачу можно увеличить для того, чтобы довести толщину стружки до желаемого уровня. Выбор

правильной величины максимальной толщины стружки h_{ex} при фрезеровании керамическими пластинами является очень важным. Всегда корректируйте подачу в зависимости от угла в плане и максимальной толщины стружки (h_{ex}).

Отслоение вершины/износ по задней поверхности



Фреза с керамическими пластинами, сплав пластины CC6060, z_n 4, D_3 63 мм, v_c 1000 м/мин, a_e 32 мм, f_z 0.12 мм/зуб, a_p 1.5 мм, Материал: Waspalloy

Подача на зуб слишком велика, что приводит чрезмерному нагреванию и отслоению вершины.

Равномерный износ по задней поверхности



Фреза с керамическими пластинами, сплав пластины CC6060, z_n 4, D_3 63 мм, v_c 1000 м/мин, a_e 32 мм, f_z 0.1 мм/зуб, a_p 1.5 мм, Материал: Waspalloy

Подача на зуб правильная, что приводит к равномерному износу.

Влияние угла в плане

Выбор правильных параметров глубины резания и угла в плане при фрезеровании жаропрочных сплавов оказывает большое влияние на стойкость и производительность. При фрезеровании керамическими

пластинами угол в плане очень важен из-за высокой склонности к образованию проточины; оптимальная глубина резания a_p при обработке от 1,5 до 2,5 мм ($\kappa_r = \text{от } 40^\circ \text{ до } 50^\circ$)

Сравнение керамической и твердосплавной пластин – фрезерование Inconel 718

Стремитесь к постоянному резанию, где это возможно обеспечьте мягкий вход в резание.

	Керамические пластины	Твердый сплав
Операция	Традиционное/ встречное фрезерование	Попутное фрезерование
СОЖ	Без СОЖ	С СОЖ
Тип пластины	RNGN 120700E 6060	R300-1240E-MM 2040
Скорость резания, v_c (м/мин)	1000	30
Диаметр, D_3 (мм)	63	63
Скорость вращения шпинделя, n (об/мин)	5052	152
Скорость подачи, f_z (мм/зуб)	0.1	0.3
Кол-во зубьев, z_n	4	6
Глубина резания, a_p (мм)	1.5	2
Ширина обработки, a_e (мм)	35	35
Скорость снятия материала, Q (см ³ /мин)	106	19
Стойкость, (мин)	3	25
Удельный съем металла, Q_t (см ³)	318	477

Выбор сплава и влияние направления фрезерования

D_3 63 мм, z_n 4, v_c 1000 м/мин, a_e 32 мм,
 f_z 0.11 мм/зуб, h_{ex} 0.07 мм, a_p 1.5 мм (без СОЖ)
 Материал: Inconel 718 (40 HRC)

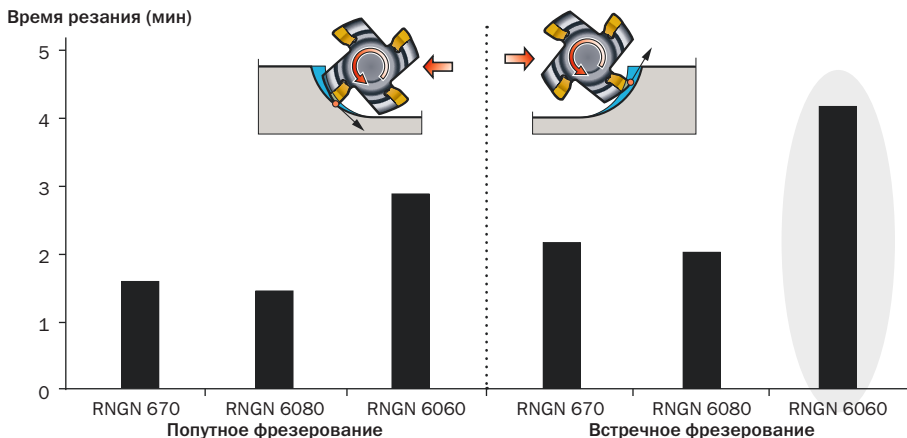


График показывает:

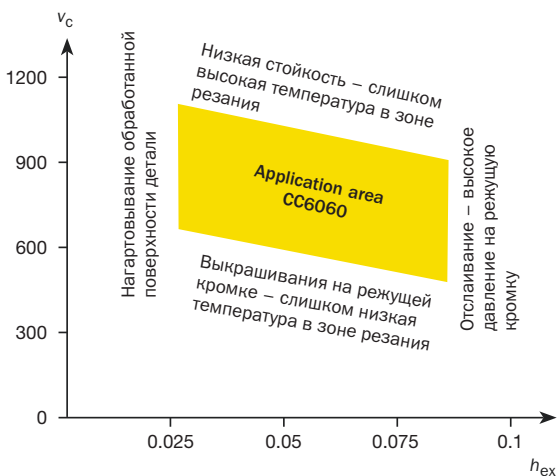
- Новая марка керамики Sialon CC6060 отличается превосходным качеством обработки.
- Встречное фрезерование обеспечивает большую стойкость и более прогнозируемый износ по сравнению с попутным фрезерованием. Это происходит из-за меньшей ударной нагрузки при входе в заготовку, что больше подходит для керамических пластин.

Рекомендации по выбору режима резания

Скорость должна быть достаточной для образования тепла, размягчающего стружку, но не вызывать разрушения керамических пластин.

Подачу f_z необходимо задавать такую, которая обеспечит толщину стружки h_{ex} , достаточно большую, чтобы исключить нагартовывание, но не вызывающую скалывание кромки.

Чем больше подача и глубина резания, тем меньше должна быть скорость резания v_c .

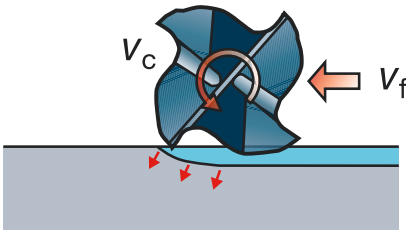


Использование цельных твердосплавных фрез CoroMill® Plura при обработке жаропрочных сплавов

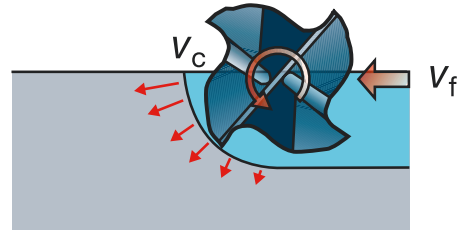
Вследствие способности сохранять высокую прочность при воздействии температуры жаропрочные сплавы являются одним из наиболее труднообрабатываемых типов материалов, налагающих наиболее жесткие требования в отношении режущего инструмента. В результате, скорости резания и удельный съем металла оказываются низкими, а стоимость обработки напротив возрастает.

Методы высокоскоростной обработки (HSM) являются высокоэффективными приемами повышения производительности фрезерования, особенно при обработке нежестких и тонкостенных заготовок. Большая скорость подачи препятствует распространению тепла в заготовке, так как время нахождения зуба в резании невелико, а нагретый материал постоянно удаляется из

зоны обработки, что выгодно отличает высокоскоростной процесс от традиционного. Также небольшая радиальная глубина резания позволяет уменьшить реальную толщину стружки и, тем самым, еще более увеличить подачу.



Подача опережает распространение тепла

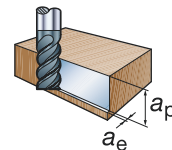


Традиционное фрезерование, более широкое распространение тепла

HSM требует высокой частоты вращения и осевой глубины резания (a_p), но малой ширины обработки (a_e) и подачи на зуб фрезы (f_z). Это возможно благодаря:

Фактор	Эффект	Преимущество
Малая толщина стружки	Сниженная скорость резания/ деформация	Более глубокое осевое резание
Малая дуга резания		
	Низкая температура в зоне резания	Более высокие скорости

При применении этого метода необходим станок с высокой скоростью вращения шпинделя и высокой динамикой подачи, но без особых требований к жесткости системы СПИД.

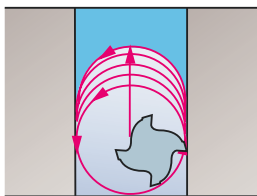


Технологические методы достижения эффекта HSM

Трохоидальное фрезерование

Высокопроизводительный метод черновой обработки закрытых полостей или пазов.

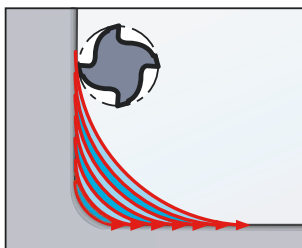
Заключается в программировании перемещения инструмента по спиральной траектории с постоянным шагом смещения в направлении паза или вдоль профиля.



Для реализации метода требуется специальная техника программирования и наличие возможностей к отработке такой программы у привода подачи станка.

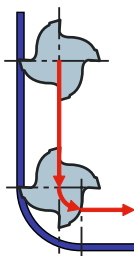
Послойное фрезерование

Метод полуступенчатой обработки заданного профиля. Припуск разделяется на множество проходов для уменьшения радиального врезания. Необходим станок с высокоскоростным динамичным приводом подачи и достаточной скоростью шпинделя.



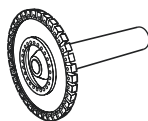
Профильная обработка

Метод финишной обработки при котором окончательный профиль получается сразу при ограниченном числе осевых врезаний. Для реализации метода требуется станок с высокой скоростью вращения шпинделя и возможностью одновременного перемещения по нескольким осям. Для обработки моноколес и импеллеров требуется 5-ти осевая обработка.



Типовые детали, где используется высокоскоростная обработка HSM.

Моноколеса, импеллеры, турбины низкого и высокого давления и детали выпускного сопла – вот некоторые типовые детали, при обработке которых использование цельных твердосплавных фрез CrorMill Plura и метода высокоскоростного фрезерования дает наибольший эффект.



Пазы на валах



Моноколеса и импеллееры



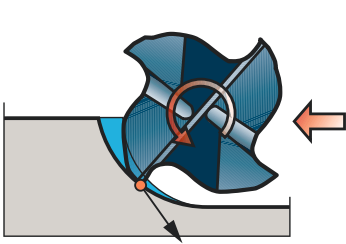
Углубления на обечайках

Рекомендации по применению

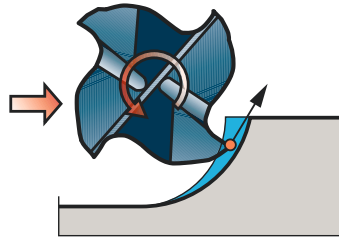
Попутное фрезерование

В большинстве случаев предпочтительно использовать попутное фрезерование, а не встречное. При входе в заготовку на попутном фрезеровании значение толщины стружки максимально, в то время как при встречном фрезеровании толщина стружки на входе равна нулю. Стойкость фрез при

встречном фрезеровании обычно ниже вследствие повышенного трения и образования тепла на входе зубьев в резание и динамических нагрузок на выходе. Отжим инструмента также возрастает при использовании встречного фрезерования.



Попутное фрезерование.



Встречное фрезерование.

Уменьшение отжима инструмента

Малая глубина радиального врезания (a_e) должна применяться всегда, когда необходимо избежать излишнего отжима инструмента и сохранить геометрическую точность обработки. Также важно выбирать инструмент с возможно большим диаметром

сердцевины, как обладающий наибольшей изгибной жесткостью.

l = вылет

D_c = диаметр инструмента

F = радиальная сила

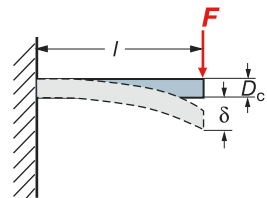
δ = отжим

E = модуль Юнга инструментального материала

$$\delta \approx \frac{F \times l^3}{E \times (\pi \times D_c^4)}$$

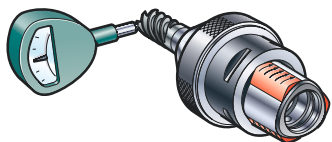
Уменьшение вылета инструмента на 20% снижает отжим на 50%.

Увеличение диаметра инструмента на 20% (например с 10 мм до 12 мм) снижает отжим на 50%.



Закрепление инструмента

Одним из основных критериев выбора как конструкции инструмента, так и способа его закрепления является обеспечение минимально возможного биения. Только точная соосность инструмента и шпинделя станка позволяет обеспечить постоянную толщину стружки и равномерную нагрузку на зубья фрезы. Полное радиальное биение (TIR) цельных фрез не должно превышать 10 микрон. Существует зависимость, что каждые дополнительные 10 микрон биения сокращают стойкость инструмента в 2 раза.



Силовой патрон CoroGrip® или термозажим обладают следующими преимуществами:

Минимальное биение

- повышение стойкости.

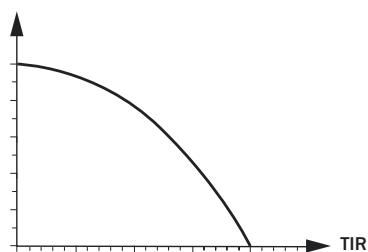
Высокая жесткость

- снижение вибрации и повышение допустимой глубины резания.

Большое усилие зажима

- сопротивление вытягиванию инструмента при больших нагрузках и крутых углах подъема винтовой линии зуба.

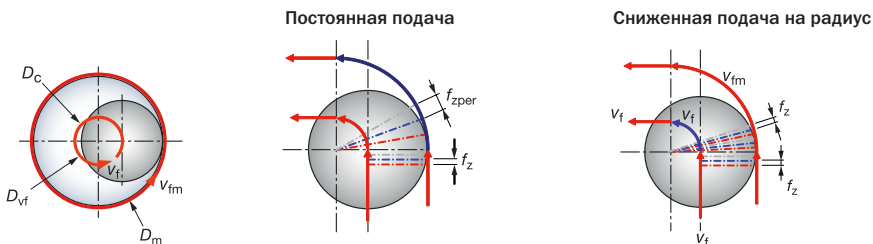
Стойкость



Программирование подачи (подача по центру инструмента или по контуру обработки)

Если при программировании задается скорость подачи по центру фрезы и не используется эквидистантная коррекция, то подачу необходимо снижать во время обработки скруглений (G2 или G3).

Снижение необходимо для компенсации большего пути по периферии фрезы по сравнению с перемещением ее центра при том же угловом смещении.



$$V_{fm} = n \times f_z \times z_n$$

$$D_{vf} = D_m - D_c$$

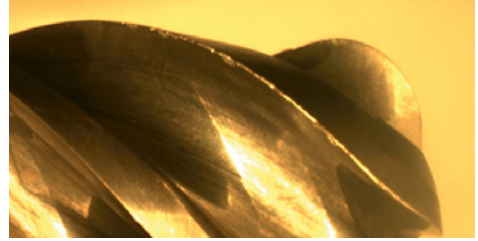
$$V_f = \frac{D_{vf}}{D_m} \times V_{fm}$$

Виды износа

При обработке жаропрочных материалов, таких как Incojet, цельными твердосплавными фрезами CoroMill Plug обычно наблюдается износ в виде микровыкрашиваний, и он превалирует над износом по задней поверхности. Сначала зуб начинает выкрашиваться по самой кромке, а затем износ разрастается вплоть до катастрофического разрушения. Переход от



выкрашивания к разрушению носит непредсказуемый, спонтанный характер и тем он опасен. Поэтому как только выкрашивания распространились по всей кромке, инструмент необходимо заменять. Отследить появление недопустимого износа инструмента можно также по звуку, указателю мощности резания или качеству обработанной поверхности.



Инструмент R216.24-12050-AK26P 1620, v_c 75 м/мин, h_{ex} 0.04 мм, a_p 10 мм, a_e 0.5 мм, f_z 0.1 мм/зуб, 15 минут в резании, Материал: Inconel 718 (42 HRC)

Оптимизированная фреза и параметры резания

Кол-во зубьев фрезы (z_n)

Никелевые сплавы, такие как Inconel, склонны к налипанию на режущие кромки, что чревато пакетированием стружки в стружечных канавках. Таким образом, даже в случае высокоскоростной обработки, когда путь резания мал и стружка короткая, существует опасность заполнения стружечных карманов многозубых фрез. Поэтому, несмотря на высокую эффективность финишной обработки, например, закаленных сталей, для обработки

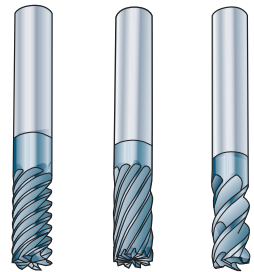
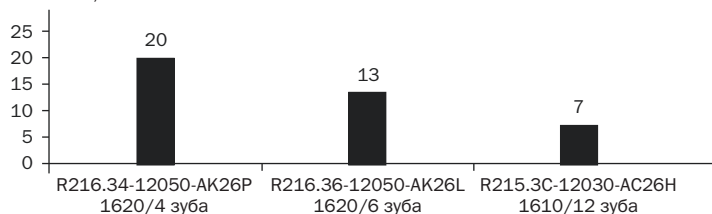
никелевых сплавов они не рекомендуются. Слишком тонкая стружка более склонна налипать на режущие кромки, что может привести к внезапной поломке инструмента. Таким образом следует в каждом конкретном случае находить баланс между производительностью многозубого инструмента и надежностью обработки при меньшем числе зубьев. Фрезы с четырьмя режущими зубьями представляются оптимальными для диаметров обработки от 8 до 12 мм. Показано сравнение для случая обработки концевыми фрезами.

Зависимость стойкости от количества зубьев,

v_c 100 м/мин, a_p 10 мм, h_{ex} 0.02 мм, a_e 0.5 мм, f_z 0.05 мм/зуб

Материал: Inconel 718 (42 HRC)

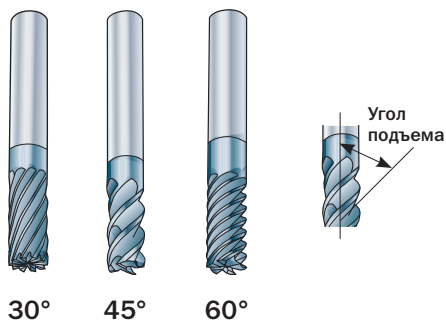
Стойкость, мин



Угол подъема винтовой линии зуба

Угол подъема винтовой линии зуба фрезы определяется как угол между направлением режущей кромки и осью инструмента. Угол винтовой линии зуба влияет на производительность обработки поскольку изменяет направление схода стружки и сил резания, а также определяет эффективную длину контакта зуба фрезы с заготовкой для данной глубины резания и ширины врезания.

Чем больше угол подъема винтовой линии, тем длиннее режущая кромка и тем выше стойкость инструмента. Также повышается плавность врезания зубьев и выхода зубьев из заготовки. Снижаются и радиальные усилия, отжимающие фрезу от заготовки. Как результата более мягкое резания с меньшим изгибом фрезы. Как правило, фрезы с большим углом подъема винтовой линии рекомендуются для чистовой обработки, а с меньшим для черновой, как более прочные. Фрезы с углов подъема винтовой линии 50



градусов оптимальны для фрезерования никелевых сплавов, когда радиальная глубина фрезерования (a_e) не превышает 20% от диаметра фрезы, например, при трохойдальном фрезеровании, контурной или послойной обработке.

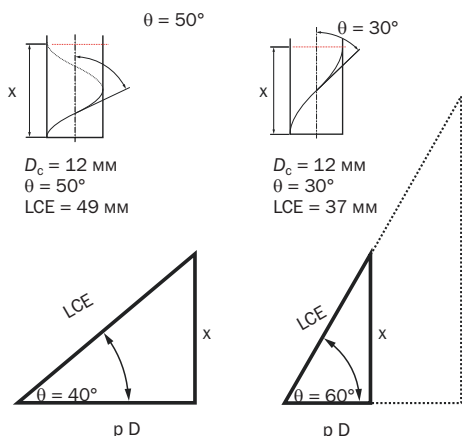


Диаграмма показывает увеличение эффективной длины режущих кромок (LCE) в зависимости от угла подъема винтовой линии зуба.

Увеличение угла подъема винтовой линии зуба также ведет к возрастанию осевых усилий резания, стремящихся вытянуть фрезу из патрона. Для предотвращения такого вытягивания следует использовать силовые патроны с большим усилием зажима, такие как CoroGrip или патроны с термозажимом.

Геометрия уголка

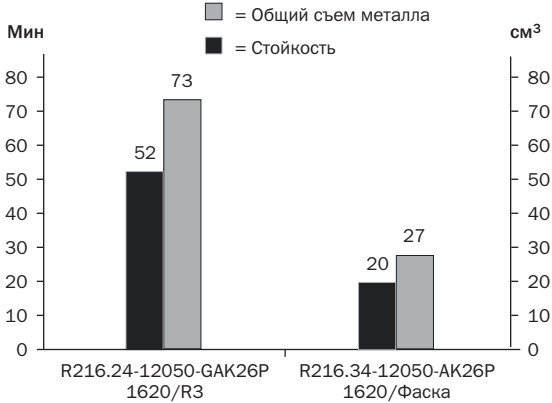
Основной вид износа, наблюдаемый при использовании HSM с Inconel, – это микровыкрашивание режущей кромки. Фрезы с радиусами на уголке, благодаря увеличенной прочности, всегда предпочтительнее остроугольных фрез.

Сравнение остроугольных фрез и фрез с радиусами на уголке

v_c 100 м/мин, a_p 10 мм, h_{ex} 0.02 мм,

a_e 0.5 мм, f_z 0.05 мм/зуб

Материал: Inconel 718



Скорость резания (v_c)

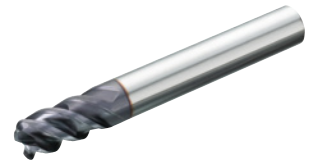
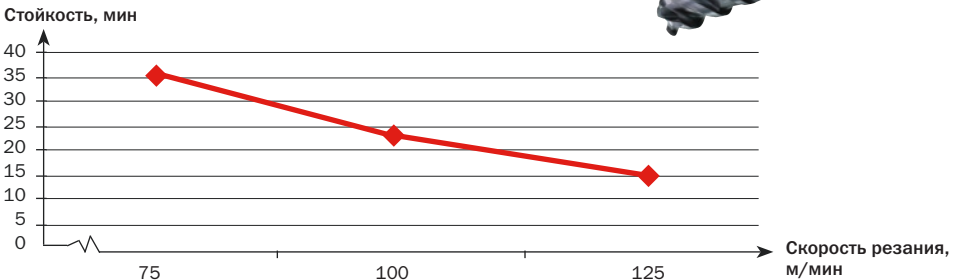
Из-за низкой величины относительного радиального врезания при высокоскоростной обработке можно значительно увеличить скорость резания (v_c). Скорость резания от 75 до 100 м/мин оптимальна для баланса производительности и стойкости. В таблице отражены особенности обработки в зависимости от скорости резания.

Стойкость в зависимости от скорости резания

R216.24-12050-GAK26P 1620, a_p 10 мм,

a_e 0.5 мм, h_{ex} 0.02 мм, f_z 0.05 мм/зуб

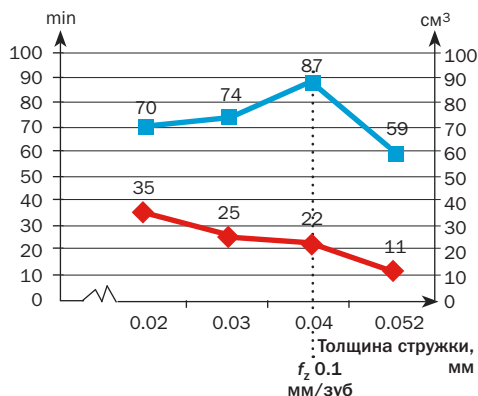
Материал: Inconel 718



Толщина стружки (h_{ex})

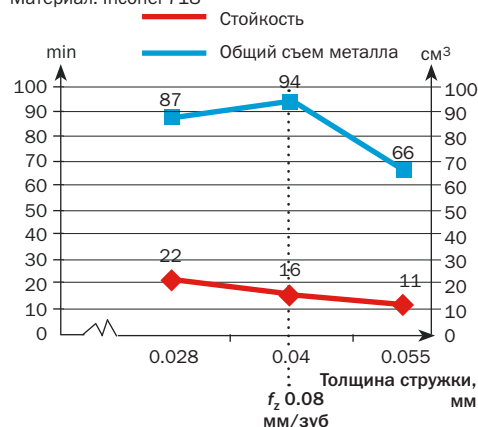
Малое радиальное врезание снижает толщину стружки по сравнению с подачей на зуб. Толщина стружки обычно оптимизируется во время чистовой обработки и при нарезании тонких слоев для случая трохoidalного фрезерования. На графике видно, что занижение толщины стружки приводит к снижению

Стойкость в зависимости от толщины стружки –
 a_e 0,5 мм (4% от D_c)
 R216.24-12050-GAK26P 1620
 v_c 75 м/мин, a_p 10 мм,
 Материал: Inconel 718

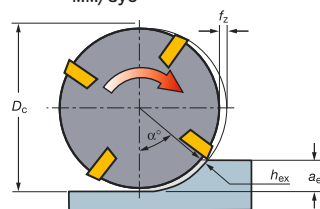


общего съема металла до износа инструмента, так как изнашивание в большей мере происходит из-за трения, а не из-за резания. В тоже время, стойкость снижается на 50%, когда толщина стружки возрастает с 0,04 до 0,052 мм (25%). Наилучшие результаты достигаются при толщине стружки 0,04 мм.

Стойкость в зависимости от толщины стружки –
 a_e 1,0 мм (8% от D_c)
 R216.24-12050-GAK26P 1620
 v_c 75 м/мин, a_p 10 мм
 Материал: Inconel 718



Толщина стружки зависит от подачи на зуб и от угла в плане (радиальное резание и диаметр фрезы).



Режущая кромка имеет оптимальную толщину стружки для каждой конкретной операции/материала (0,04 мм для инструмента CoroMill Plura в Inconel). Выбранный показатель подачи должен соответствовать оптимальной подаче для соответствующей ширины обработки (a_e).

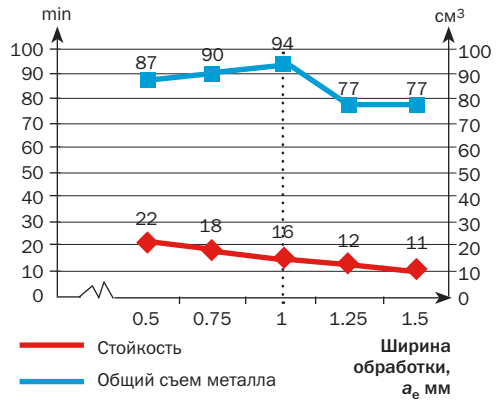
Соотношение глубины резания к диаметру a_e/D_c	Глубина резания для диаметра пластины, мм				Угол в плане α	Корректирующий коэффициент подачи	Подача f_z для толщины стружки 0,04 h_{ex}
	8	10	12	16			
20.0%	1.6	2	2.4	3.2	53°	1.3	0.05
17.5%	1.4	1.75	2.1	2.8	49°	1.3	0.05
15.0%	1.2	1.5	1.8	2.4	46°	1.4	0.06
12.5%	1	1.25	1.5	2	41°	1.5	0.06
10.0%	0.8	1	1.2	1.6	37°	1.7	0.07
7.5%	0.6	0.75	0.9	1.2	32°	1.9	0.08
5.0%	0.4	0.5	0.6	0.8	26°	2.3	0.09
2.5%	0.2	0.25	0.3	0.4	18°	3.2	0.13

Ширина обработки (a_e)

Как видно на графике, в процессе черновой обработки, при постоянной скорости и толщине стружки, максимального удельного съема металла удается достичь при радиальном врезании $a_e = 1,0$ мм.

Это составляет до 8% a_e/D_c , и данную величину следует брать за основу при черновой обработке.

Суммарный съем металла и стойкость в зависимости от радиального врезания
R216.24-12050-GAK26P 1620,
 v_c 75 м/мин, a_p 10 мм, h_{ex} 0.04 мм
Материал: Inconel 718



Трохоидальное фрезерование

Является общепринятым методом при обработке закаленных сталей и алюминия. Фрезерование этим способом не требует высокой жесткости оборудования и является высокопроизводительным и надежным методом, который лучше всего применять при окончательной обработке больших деталей, стоимость которых, как правило, высока и, соответственно, безопасность процесса имеет приоритетное значение.

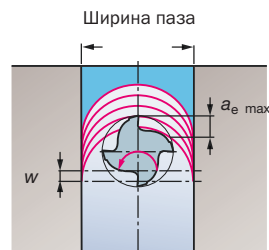
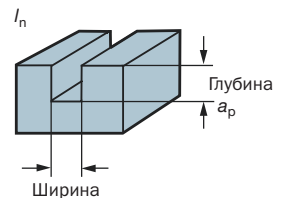
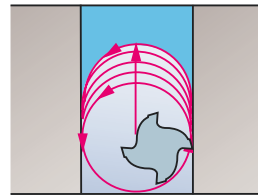
Выбор параметров

Как можно заметить, при трохоидальном фрезеровании максимальная ширина обработки — $a_{e \max}$ на равна запрограммированному шагу спирали — ' w '.

Максимальная ширина обработки (a_e) \max не должна превышать 20% вписанного диаметра пластины.

Начальные рекомендации для трохоидального фрезерования

Диаметр фрезы, мм	$D_c = 65\%$ ширины паза
Шаг спирали, мм	$w = 8\%$ D_c
Осевая глубина резания, мм	$a_p =$ от 1 до 1.5 x D_c
Скорость резания, м/мин	$v_c = 75$
Подача на зуб фрезы, мм	$f_z = 0.05$



Рекомендации по выбору инструментов для HSM

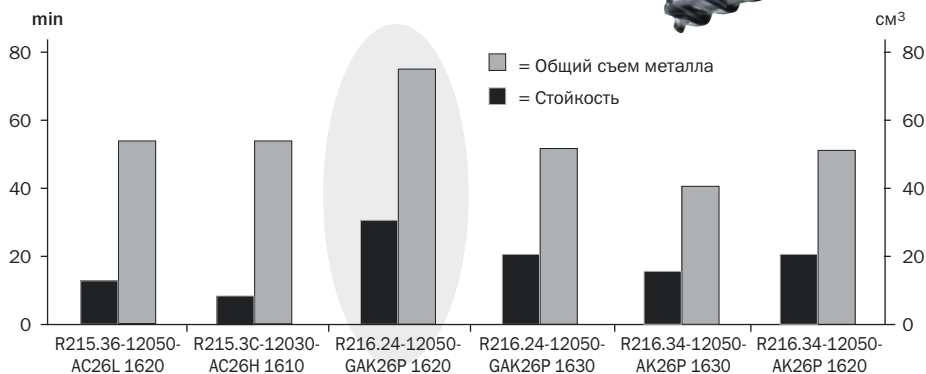
Как видно на графике, инструмент R216.24-12050-GAK26P 1620 является оптимальной фрезой для высокоскоростной обработки (HSM) Inconel.

Общий съем металла и стойкость в зависимости от радиального резания

Материал: Inconel 718

v_c 100 м/мин, a_e 0.5 мм, a_p 10 мм,

f_z 0.05 мм/зуб, h_{ex} 0.02 мм



Рекомендуемые начальные режимы резания для фрезерования жаропрочных сплавов инструментом CoroMill Plura

	v_c , М/МИН	a_p , ММ	a_e , ММ	h_{ex} ММ	f_z ММ/ЗУБ	Стойкость, МИН
Чистовая обработка	75	$1.5 \times D_c$	0.25 до 0.5	0.04	0.1	22
Черновая обработка	75	$1.5 \times D_c$	$8\% D_c$	0.04	0.08	16

Соотношение глубины резания к диаметру a_z/D_c	Глубина резания для диаметра пластины, мм				Угол в плане K_r	Корректирующий коэффициент подачи	Подача f_z для толщины стружки 0.04 h_{ex}
	8	10	12	16			
20.0%	1.6	2	2.4	3.2	53°	1.3	0.05
17.5%	1.4	1.75	2.1	2.8	49°	1.3	0.05
15.0%	1.2	1.5	1.8	2.4	46°	1.4	0.06
12.5%	1	1.25	1.5	2	41°	1.5	0.06
10.0%	0.8	1	1.2	1.6	37°	1.7	0.07
7.5%	0.6	0.75	0.9	1.2	32°	1.9	0.08
5.0%	0.4	0.5	0.6	0.8	26°	2.3	0.09
2.5%	0.2	0.25	0.3	0.4	18°	3.2	0.13

Выберите подачу в зависимости от радиальной глубины резания

Например, черновая обработка:

D_c 12 мм, a_e 0.9 мм, f_z 0.08 мм

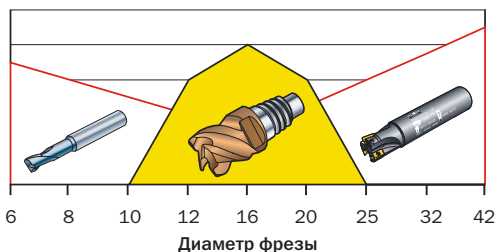
Например, чистовая обработка:

D_c 10 мм, a_e 0.25 мм, f_z 0.13 мм

Сменная фрезерная головка – CoroMill® 316 для обработки жаропрочных сплавов.

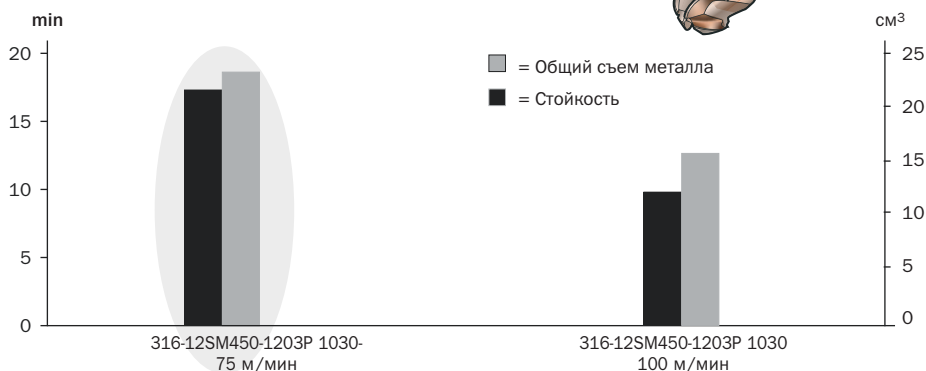
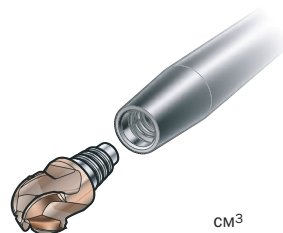
CoroMill 316 дополняет ряд уже используемых твердых сплавов. Геометрия режущей пластины основана на инструментах семейства CoroMill Plura.

- Применяется для общей черновой, получистовой и чистовой обработки.
- Представляет собой более экономичное решение по сравнению с CoroMill Plura для больших диаметров.
- Выпускается с различной геометрией и хвостовиками
- Подходит для обработки труднодоступных мест, например, глубоких карманов
- Обеспечивает точность обработки при больших вылетах



Общий съём металла и стойкость в зависимости от радиального резания

Материал: Inconel 718 (43 HRC)
 v_c 75/100 м/мин, a_e 0.5 мм, a_p 6.5 мм,
 f_z 0.05 мм/зуб, h_{ex} 0.02 мм



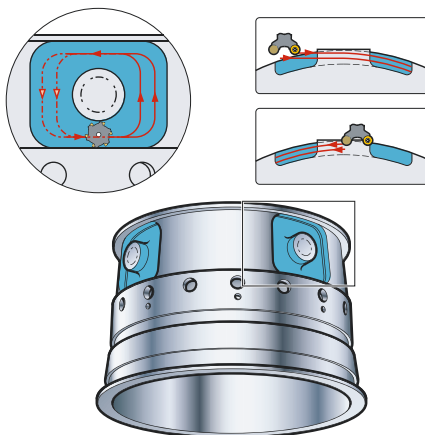
Рекомендуемые начальные параметры резания для фрезерования жаропрочных сплавов фрезой CoroMill 316

	v_c , м/мин	a_p , мм	a_e , мм	h_{ex} мм	f_z мм/зуб	Стойкость, мин
Чистовая обработка	75	>6.5	0.25 to 0.5	0.02	0.05	17

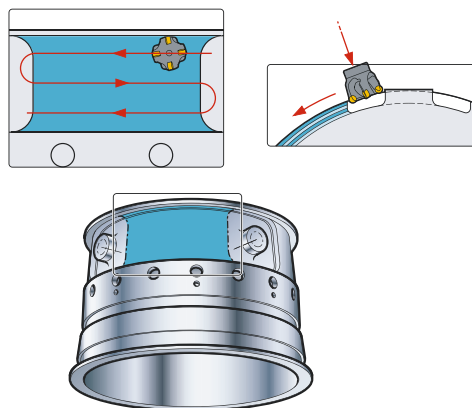
Технологические решения для различных деталей

Корпусные детали

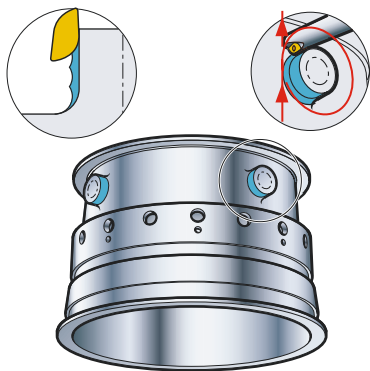
Операция	Черновое фрезерование периферии
Материал	Inconel 718
Фреза	R300-050Q22-12H
Диаметр фрезы, D_3	50 мм
Пластина	R300-1204E-PL 1030
Кол-во зубьев фрезы, z_n	5
Скорость резания, v_c	35 м/мин
Скорость вращения шпинделя, n	223 об/мин
Подача стола, v_f	311 мм/мин
Подача на зуб, f_z	0.25 мм
Глубина резания, a_p	2.5 мм
Ширина обработки, a_e	38 мм
Удельный съем металла, Q	27.7 см ³ /мин



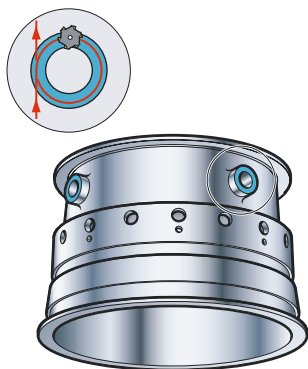
Операция	Черновое фрезерование нижнего пояса
Материал	Inconel 718
Фреза	S-R210R-068C6-12X05
Диаметр фрезы, D_3	80 мм
Пластина	RNGN 120700E 6060
Кол-во зубьев фрезы, z_n	5
Скорость резания, v_c	1000 м/мин
Скорость вращения шпинделя, n	4136 об/мин
Подача стола, v_f	2068 мм/мин
Подача на зуб, f_z	0.1 мм
Глубина резания, a_p	2 мм
Ширина обработки, a_e	50 мм
Удельный съем металла, Q	207 см ³ /мин



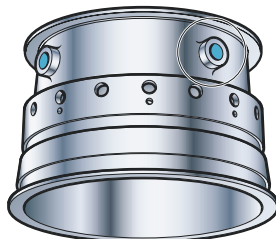
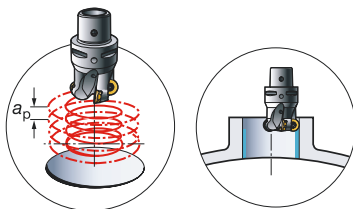
Операция	Обработка радиуса сопряжения
Материал	Inconel 718
Фреза	R216-20B25-050
Диаметр фрезы, D_c	20 мм
Пластина	R216-20T3E-M 2040
Кол-во зубьев фрезы, z_n	2
Скорость резания, v_c	50 м/мин
Скорость вращения шпинделя, n	447 об/мин
Подача стола, v_f	143 мм/мин
Подача на зуб, f_z	0.15 мм
Глубина резания, a_p	3 мм
Ширина обработки, a_e	3-5 мм
Удельный съём металла, Q	5 см ³ /мин



Операция	Обработка торца соединения ИЗУ
Материал	Inconel 718
Фреза	R300-050Q22-08H
Диаметр фрезы, D_3	50 мм
Пластина	R300-0828E-PL 1030
Кол-во зубьев фрезы, z_n	8
Скорость резания, v_c	45 м/мин
Скорость вращения шпинделя, n	259 об/мин
Подача стола, v_f	622 мм/мин
Подача на зуб, f_z	0.26 мм
Глубина резания, a_p	0.7 мм
Ширина обработки, a_e	38 мм
Удельный съём металла, Q	17 см ³ /мин

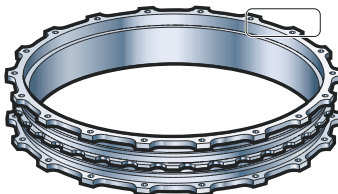
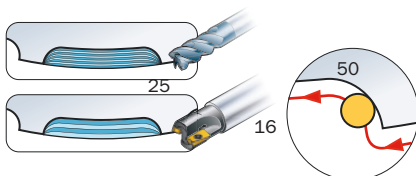


Операция	Отверстие в фундаментной (опорной) плите – Ø 59 мм – 20 мм глубина	
Метод	Винтовая интерполяция в сплошной материал	
траектории		
Материал	Inconel 718	
Фреза	CoroMill 300 R300-035C3-12H	
Диаметр фрезы, D_3	35 мм	
Пластина	R300-1240E-MM 2040	
Кол-во зубьев фрезы, z_n	4	
Скорость резания, v_c	25 м/мин	
Скорость вращения шпинделя, n	227 об/мин	
Подача стола, v_f	76 мм/мин	
Подача на зуб, f_z	0.2 мм	
Глубина резания, a_p	2 мм	
Ширина обработки, a_e	Полная	
Время	11 мин	
Удельный съем металла, Q	5 см ³ /мин	

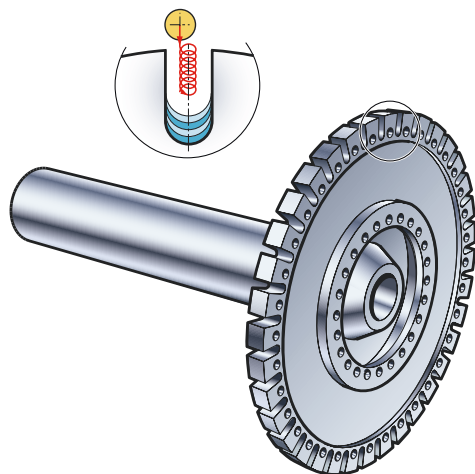


Кольца – волнообразные профили

Операция	Фрезерование зубьев кольца	
Материал	Inconel 718	
Фреза	CoroMill 390	CoroMill Plura
Диаметр фрезы, D_c	16 мм	12 мм
Пластина	R390-11T308M-PL 1030	R216.24-12050DAK26P
		1620
Кол-во зубьев фрезы, z_n	2	4
Скорость резания, v_c	30 м/мин	75 м/мин
Скорость вращения шпинделя, n	600 об/мин	2000 об/мин
Подача стола, v_f	120 мм/мин	637 мм/мин
Подача на зуб, f_z	0.1 мм	0.08 мм
Глубина резания, a_p	5 мм	5 мм
Ширина обработки, a_e	2 мм	1 мм
Удельный съем металла, Q	1.2 см ³ /мин	3.2 см ³ /мин



Операция	Обработка паза
Метод	Трохоидальное фрезерование
Материал Фреза	Inconel 718 R216.24-08050 ЕАК19Р 1620
Диаметр фрезы, D_c	8 мм
Кол-во зубьев фрезы, z_n	4
Скорость резания, v_c	75 м/мин
Скорость вращения шпинделя, n	3000 об/мин
Подача стола, v_f	200 мм/мин
Подача на зуб, f_z	0.05 мм
Глубина резания, a_p	8 мм
Ширина обработки, w	0.67 мм
Время	5.64 мин
Удельный съем металла, Q	1.0 см ³ /мин



Операция	Обработка моноколес Черновая обработка	Чистовая обработка
Метод	Плунжерное фрезерование	Фрезерование наклонным инструментом
Материал Фреза	Inconel 718 R230.24-16000-AP096H1 Xceed (фреза Gannet)	Inconel 718 Специальная коническая концевая фреза со сферическим концом
Диаметр фрезы, D_c	16 мм	7 мм
Кол-во зубьев фрезы, z_n	4	4
Скорость резания, v_c	50 м/мин	75 м/мин
Скорость вращения шпинделя, n	995 об/мин	3410 об/мин
Подача стола, v_f	60 мм/мин	546 мм/мин
Подача на зуб, f_z	0.015 мм	0.04 мм
Глубина резания, a_p	4.8 мм	0.23 мм
Ширина обработки, w	16 мм	0.5 мм
Удельный съем металла, Q	28 см ³ /мин	–

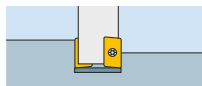


Рекомендуемые режимы резания



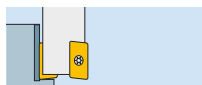
Торцевое фрезерование

Тип	Применение	Выбор инструмента	Максимальная глубина резания a_p мм	Ширина обработки a_e мм	Скорость резания v_c м/мин	Подача f_z мм/зуб
Круглые пластины	От низкой до средней a_p	CoroMill®300 R300-0828E-PL GC1030	1	70% от D_c	30	0.18
		R300-1240E-PL G1030	2.5		30	0.25
		R300-1240E-MM GC2040	2.5		25	0.25
		R300-1648E-MM GC2040	4		25	0.30
κ_r 45°	От средней до высокой a_p	CoroMill®245 R245-12T3E-ML GC2040	3		30	0.20
κ_r 90°	От уступа	CoroMill®390 R390-11T308E-ML GC2040	5		30	0.10



Фрезерование полного паза

Диаметр фрезы. D_c мм	Выбор инструмента	Максимальная глубина резания a_p мм	Скорость резания v_c м/мин	Подача f_z мм/зуб
16–40 25–40	CoroMill®390 R390-11T308E-ML GC2040	8	25–35	0.10
	R390-170408E-ML GC2040	14	25–35	0.10
6–20	CoroMill®Plura R216.24-xx050-AKxxP GC1620	0.5 x D_c	75	0.05



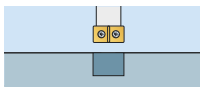
Обработка стенки

Диаметр фрезы. D_c мм	Выбор инструмента	Максимальная глубина резания a_p мм	Ширина обработки a_e/D_c	Скорость резания v_c м/мин	Максимальная толщина стружки h_{ex} мм
16–40 16–40 25–40 25–40	CoroMill® 390 конц. R390-11T308M-PL GC1030	8	12.50%	35	0.10
	R390-11T308E-ML GC2040	8	50–75%	35	0.07
	R390-17408M-PL GC1030	14	12.50%	35	0.10
	R390-17408E-ML GC2040	14	50–75%	35	0.07
6–20 6–20	CoroMill® Plura R216.24-xx050-AKxxP GC1620 R216.24-xx050-AKxxP GC1620	2 x D_c 2 x D_c	8%	75	0.04



Фрезерование керамикой

Тип	Применение	Выбор инструмента	Максимальная глубина резания a_p мм	Ширина обработки a_e мм	Скорость резания v_c м/мин	Подача f_z мм/зуб
Круглая	от низких до средних a_p	Фрезерование керамикой RNGN 120700E CC6060	2.0	70% of D_c	1000	0.10



Фрезерование открытых пазов

Диаметр		Трехсторонние фрезы CoroMill®331		Скорость резания v_c м/мин	Максимальная толщина стружки h_{ex} мм
Фреза мм	Ширина мм	Тип пластины N331	Круглая пластина		
6–8	80–200	N/L/R331.1A-04-WL GC1030		35	0.07
8–10	80–200	N/L/R331.1A-05-WL GC1030		35	(N/L/R331.1A)
10–15	80–200	N/L/R331.1A-08-WL GC1030	RCHT 10T3M0-PL GC1030	35	
15–20.5	100–315	N/L/R331.1A-11-WL GC1030	RCHT 1204M0-PL GC1030	35	0.12 (RCHT)
20.5–26.5	160–315	N/L/R331.1A-14-WL GC1030	RCHT 1606M0-PL GC1030	35	

Изготовление отверстий в жаропрочных сплавах

Виды отверстий и способы их изготовления

Отверстия в деталях из жаропрочных сплавов можно разделить на 5 отдельных классов:

Отверстия > Ø 16 мм для сборки (монтажа)

В аэрокосмических двигателях: в корпусных деталях, фланцах, кольцах, дисках, валах и т.д. обычно высверливают много одинаковых, сравнительно маленьких отверстий. Для изготовления отверстий такого диаметра, с некоторым ограничением, обычно используют твердосплавные сверла.

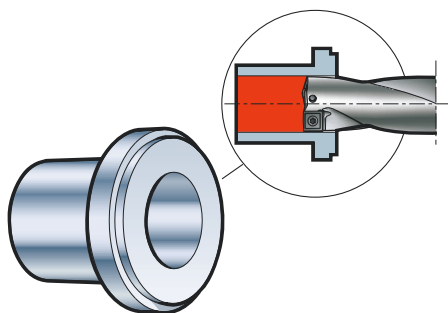
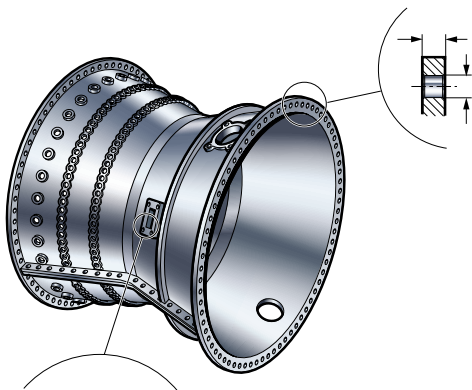
Для того чтобы обеспечить качество и стабильность ответственных деталей, изготовление отверстия проходит 5 этапов:

1. сверление
2. растачивание (используя фрезу соответствующего размера), чтобы получить соосность
3. чистовое растачивание (используя фрезу соответствующего размера)
4. фронтальное снятие фасок
5. обратное снятие фасок

Так как это одна из заключительных станочных операций, то надежность является первостепенным фактором. А поскольку в одной детали могут быть сотни отверстий, эта операция может быть весьма продолжительна.

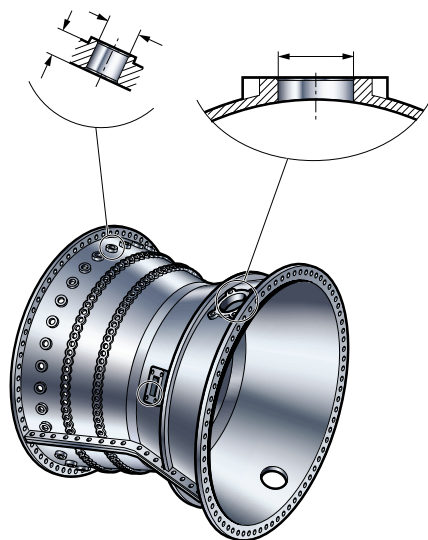
Отверстия Ø 12 - Ø 60 мм в деталях с жесткой конструкцией

Детали в нефтегазовой и подшипниковой промышленности, а также в общем машиностроении обладают, как правило, высокой жесткостью. Поэтому для первой черновой обработки используются сверла со сменными пластинами, как на токарных станках, так и на многоцелевых станках. Последующие операции могут включать растачивание или развертывание.



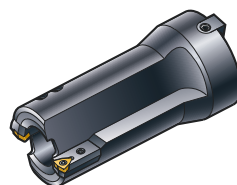
Отверстия $\varnothing 20 - \varnothing 80$ мм в тонкостенных или нежестких деталях

Для образования отверстий в корпусе турбины двигателя с тонкими стенками и большим диаметром отверстий на бобышках применяется винтовая интерполяция. Хотя по сравнению со сверлением этот способ медленнее, его преимущество заключается в небольшой осевой силе резания, что обеспечивает максимальную надежность обработки.



Сквозные отверстия $\varnothing 60 - 110$ мм глубиной до 4 диаметров

В нефтегазовой и подшипниковой промышленности, где необходимы трубы и кольца, применяется трепанирующее сверление на токарном станке, чтобы сохранить сердцевину для изготовления других деталей из-за высокой себестоимости. Этот метод также снижает затраты энергии и время производства. Для изготовления более глубоких отверстий используется трепанирующее сверление с двух сторон.

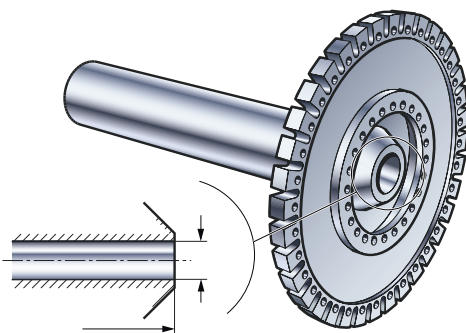


Глубокие отверстия более 10 диаметров

Валы, используемые в нефтегазовой промышленности и в аэрокосмических двигателях, имеют глубокие отверстия. Для их изготовления необходимы сверла со сменными пластинами, а также уплотненная кондукторная втулка или предварительно обработанное пилотное отверстие.

Для чистовой обработки отверстия после сверления используется antivибрационный расточной инструмент со встроенным демпфером, либо специальные расточные головки с опорными вкладышами.

Раньше для выполнения этой операции использовались специализированные сверлильные/расточные станки. В настоящее время их заменяют токарно-фрезерными или многоцелевыми станками.



Инструмент для изготовления отверстий

Сверление

Твердый сплав CoroDrill Delta-C R846	диам. 3.0 - 20.0 мм
Сменная неперетачиваемая пластина CoroDrill 880	диам. 14.0 - 63.5 мм
Глубокое отверстие CoroDrill 800	диам. 25 - 65 мм
T-Max 424.10	диам. 63.5 - 130* мм



Диаметр отверстия

T-Max U 416.7	диам. 60 - 110* мм
---------------	--------------------



Винтовая интерполяция в сплошной материал

CoroMill Plura R216.34		
CoroMill 390-11	Диаметр инструмента от 16 до 40 мм	диам. >28 мм
CoroMill 300-12	Диаметр инструмента от 25 до 80 мм	диам. >38 мм



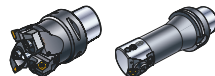
Фрезерование по круговой интерполяции в предварительно просверленном отверстии

Окончательный диаметр		
CoroMill Plura	Диаметр инструмента от 4 до 20 мм	диам. >5 мм
CoroMill 390	Диаметр инструмента от 16 до 40 мм	диам. >20 мм
Обратное снятие фасок		
CoroTurn XS +		диам. >7 мм
Coromant Capto		диам. >11.7 мм
CoroMill 327		диам. >27 мм
Снятие фасок U-Max		диам. >27 мм
Резьбофрезерование		
CoroMill Plura	Диаметр инструмента от 6 до 20 мм	диам. ≥M4



Растачивание (вращается инструмент)

CoroBore 820 – черновая обработка	диам. 35 - 260 мм
CoroBore 825 – чистовая обработка	диам. 23 - 167 мм



Растачивание (вращается деталь)

CoroTurn RC	Диаметр оправки 25 до 50 мм	диам. >32 мм
CoroTurn 107	Диаметр оправки 6 до 40 мм	диам. >8.5 мм
CoroTurn SL	Диаметр оправки 16 до 60 мм	диам. >20 мм



Антивибрационные расточные оправки Silent Tools

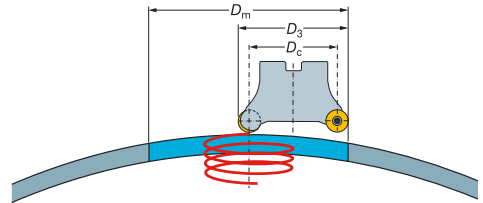
CoroTurn SL	Диаметр оправки 16 до 60 мм	диам. >20 мм
CoroTurn SL-QC	Диаметр оправки 80 до 300 мм	диам. >100 мм



*Большой диаметр при необходимости.

Винтовая интерполяция в сплошной материал

При фрезеровании отверстий можно одной фрезой выполнять отверстия разных размеров. При такой обработке осевые силы резания незначительны, и не возникает проблемы прерывистого сверления, неизбежного при обработке криволинейной поверхности, например для такой детали, как корпус турбины двигателя.

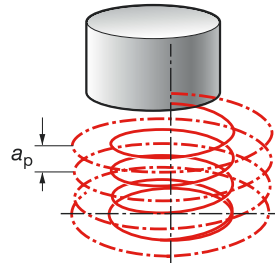


$$\text{Max } D_3 = \frac{D_m}{2} + 0.5iC$$

$$\text{Min } D_m = (D_3 - 0.5iC) \times 2$$

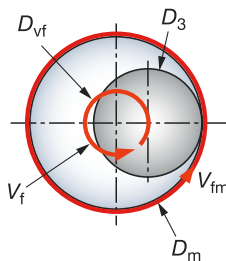
Режущий инструмент и диаметр отверстия

Для работы с наклонным и винтовым врезанием фреза должна иметь режущие кромки, выступающие за торцевую поверхность корпуса. Выбор диаметра очень важен, особенно при сплошном сверлении. Диаметр режущего инструмента за вычетом радиуса пластины не должен превышать половины диаметра отверстия. Это необходимо для того, чтобы гарантировать отсутствие повреждений корпуса фрезы.



Шаг интерполяции

Осевое перемещение фрезы ограничено максимально допустимой глубиной резания (a_p) для пластины. Например, для круглых пластин – $0.15 \times iC$.



Скорость подачи

При внутренней обработке скорость подачи должна быть снижена из-за того, что периферия инструмента движется быстрее его осевой линии. Программирование скорости подачи (мм/мин) на большинстве фрезерных станков/система CAM основано на осевой линии шпинделя и требует пересчета вручную.

Подача по траектории центра инструмента – D_{vf}
 $D_{vf} = D_m - D_3$

Пример

D_m	= 58	a_p	= 2
D_3	= 35	z_n	= 4
V_c	= 25	n	= 227
f_z	= 0.2	v_{fm}	= 182
D_{vf}	= 18	v_f	= 76

Запрограммированная скорость подачи

- v_{fm} – при использовании коррекции на радиус
- v_f – при использовании подачи центра инструмента

$$v_{fm} = n \times f_z \times z_n$$

$$v_f = \frac{D_{vf}}{D_m} \times v_{fm}$$

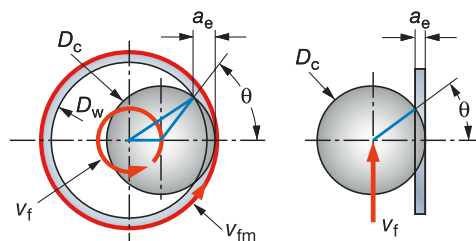
Фрезерование по круговой интерполяции предварительно просверленного отверстия

Чистовую обработку отверстия можно выполнить с помощью фрезерования по круговой интерполяции вместо растачивания, в зависимости от требований к поверхности обработки. Скорость подачи при внутренней обработке (v_f) должна быть меньше по сравнению с подачей при фрезеровании вдоль прямой.

$$f_z = \frac{f_z}{\sin\theta}$$

$$v_{fm} = n \times f_z \times z_n$$

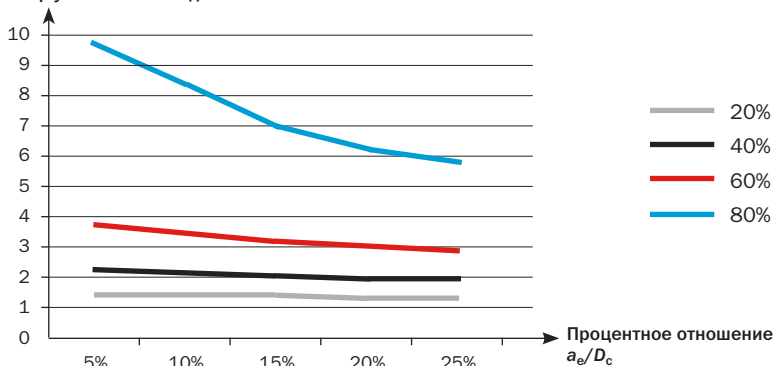
$$v_f = \frac{D_{vf}}{D_m} \times v_{fm}$$



- Периферия инструмента движется быстрее осевой линии инструмента. Программирование скорости подачи (мм/мин) на большинстве фрезерных станков и САМ систем основано на осевой линии шпинделя.
- Ширина обработки (a_e) увеличивается по сравнению с охватом при резании под прямым углом, увеличивая толщину стружки, h_{ex} .
- Влияние этих двух факторов возрастает с увеличением диаметра режущего инструмента по отношению к размеру отверстия.
- Правильное снижение подачи по сравнению с резанием под прямым углом можно выбрать на диаграмме.
- Для повышения надежности обработки, в случае когда $D_c = 0.4 \times D_m$ необходимо уменьшение подачи на 50% от нормы.

Снижение подачи центра фрезы для различных соотношений диаметра отверстия к диаметру фрезы (D_c/D_m) из условия сохранения толщины стружки.

Фактор уменьшения подачи

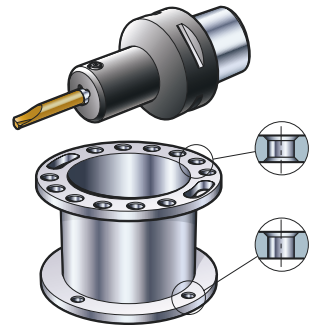


Обратное снятие фасок/снятие заусенцев

При обработке деталей авиационных двигателей, одной из сложных, но часто забываемых операций является снятие заусенцев в отверстиях.

Применение CoroMill 327 или CoroTurn XS для обратного снятия фасок позволяет увеличить производительность, обеспечивая повторяемый и механизированный и безопасный процесс за счет отсутствия необходимости удаления заусенцев вручную или применения специального инструмента.

Следует использовать переходную втулку Coromant Capto CoroTurn XS, которая позволяет обеспечить надлежащий зазор при использовании резца в качестве вращающегося инструмента.



CoroTurn® XS

Переходная втулка	Пластина	Минимальный размер отверстия	Максимальная глубина отверстия
C4-CXS-47-05	CXS-05T045-20-5215R CXS-05T045-20-5220R	7	15 20
C4-CXS-47-06	CXS-06T045-20-6220R CXS-06T045-20-6225R	8	20 25
C4CXS-47-07	CXS-07T045-20-7220R CXS-07T045-20-7240R	9	20 40

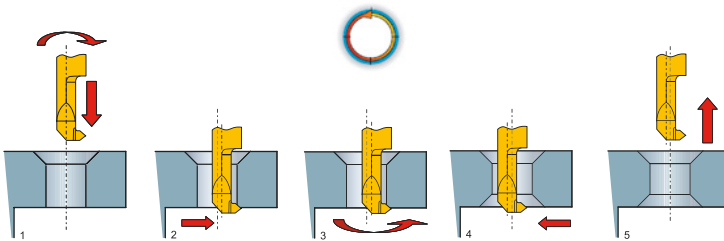


CoroMill® 327

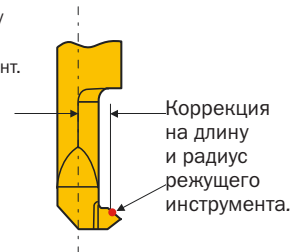
Переходная втулка	Пластина	Минимальный размер отверстия	Максимальная глубина отверстия
06	327R06-12045-CH	11.7	40
12	327R12-20045-CH	21.7	85



Порядок программирования технологического процесса



1. Расположите над высверливаемым отверстием по центру режущий инструмент со скоростью вращения (v_c 75) и продвигайтесь в осевом направлении, чтобы зенковать на требуемую глубину (Z = высота фланца – размер фаски).
2. Подавайте инструмент с учетом коррекции на радиус режущего инструмента (Y = радиус отверстия).
3. Интерполяция 360° (f_z 0.1 мм).
4. Вернитесь к центру отверстия.
5. Отведите инструмент.

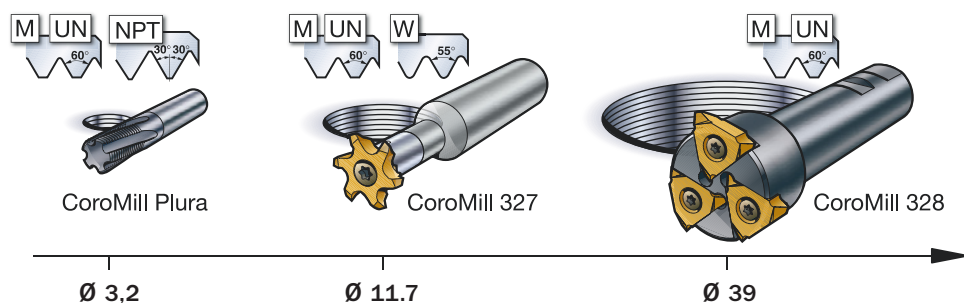


Резьбофрезерование

В корпусных деталях авиационных двигателей многие отверстия должны иметь резьбу. Обработка резьбы небольших отверстий может оказаться сложной операцией, которую выполняют с использованием метчика. Однако при работе с жаропрочными сплавами, этот процесс может быть осложнен защемлением стружки, что приводит к поломке метчика и, в конечном счете, к дорогостоящему ремонту детали. Резьбофрезерование – это еще один способ нарезания резьбы.

В программе Sandvik Coromant есть инструменты для резьбофрезерования - CoroMill 327 и CoroMill 328, позволяющие получать резьбу последовательными проходами, по одному витку, а так же CoroMill® Plura, с возможностью получения резьбы на всю глубину.

Все инструменты позволяют получить резьбу разного диаметра, но одинакового шага без смены инструмента.



	CoroMill® Plura	CoroMill® 327	CoroMill® 328
Шаг	0.7 – 3 мм 28 – 10 т.п.и.	1 – 4.5 мм 24 – 5 т.п.и.	1.5 – 6 мм 16 – 4 т.п.и.
Диаметр фрезы (D_C), мм	3.2 – 19	11.7 – 21.7	39 – 80

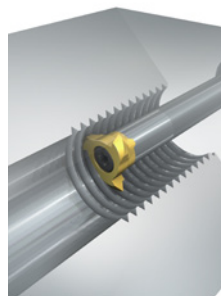
Резьбофрезерование методом последовательных проходов

CoroMill® 327

Фреза CoroMill®327 предназначена для отверстий диаметром более 12 мм и имеет режущие пластины для нарезки метрической, UN- и дюймовой резьбы.

Торцевое закрепление пластин, а так же специальные пазы, выполненные на опорной поверхности пластины, обеспечивают жесткость инструмента. Возможность внутренней подачи СОЖ повышает эффективность эвакуации стружки, являясь гарантией надежной и высокопроизводительной обработки. Пластины к фрезе CoroMill 327 выполняется из универсального сплава GC1025, применяемого для всех типов материалов

CoroMill 327 выполняется со стальными или цельными твердосплавными хвостовиками Weldon.



CoroMill® 328

Фреза CoroMill 328 предназначена для обработки метрической и UN-резьбы в отверстиях диаметром более 39 мм. Пластины с 3 режущими кромками устанавливаются в специальные гнезда, что обеспечивает точную и надежную установку. Фрезы в основном предназначены для резьб с крупным шагом. Пластины к фрезе CoroMill 328 выполняются из универсального сплава GC1025, применяемого для всех типов материалов

CoroMill 328 имеет хвостовик Weldon, крепление на оправке и отверстие со шпоночным пазом.

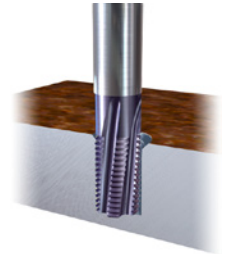


Резьбофрезерование на всю длину режущей части инструмента

CoroMill® Plura

Цельный твердосплавный инструмент, позволяющий нарезать профиль резьбы за один проход. Данная фреза позволяет получить полный профиль для метрической 60°, UNC/UNF и NPT резьбы.

CoroMill® Plura предназначена для мелких резьб, изготавливается из двух универсальных сплавов, с внутренним подводом СОЖ или без него. Наиболее подходящий инструмент для массового производства.



Важные замечания

Для получения наилучших результатов при резьбофрезеровании всегда необходимо учитывать следующее:

Выбор диаметра фрезы:

- Меньший диаметр фрезы позволяет получить более точный профиль резьбы.

Траектория движения инструмента:

- Инструмент позволяет нарезать правую и левую резьбу, поднимаясь или опускаясь в отверстие соответственно.
- При врезании и выходе из материала фреза должна двигаться по дуге.

Учитывайте при расчете подачи на зуб:

- для повышения качества резьбы, всегда выдерживайте низкую подачу на зуб (небольшую толщину стружки h_{ex}).

Используйте программное обеспечение для расчета правильного значения необходимой подачи:

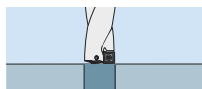
- Это гарантирует правильной нагрузки на инструмент.

Необходимость выполнения несколько проходов:

- При сложных случаях, для повышения качества резьбы может потребоваться разделить операцию на несколько проходов.

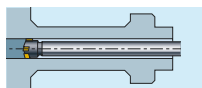
Примечание. Детальная информация по резьбофрезерованию содержится в Руководстве по нарезке резьбы, C-2920:031. Более подробную информацию можно получить в местном представительстве Sandvik Coromant.

Рекомендуемые режимы резания



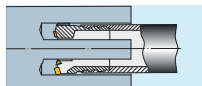
Сверление неглубоких отверстий

Рабочий диаметр фрезы D_c мм	Выбор инструмента	Скорость резания v_c м/мин	Подача f_n мм/об
3– 6 6–10 10–14 14–20	CoroDrill®Delta-C R846 Сплав GC1220, давление СОЖ от30 до 40 bar max биение 0.02 мм	20–30	0.06–0.10 0.08–0.12 0.10–0.14 0.12–0.16
14–44	CoroDrill®880 Периферийная пластина – LM H13A Центральная пластина – LM 1044	20–30	0.04–0.10



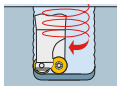
Сверление глубоких отверстий

Рабочий диаметр фрезы D_c мм	Выбор инструмента	Скорость резания v_c м/мин	Подача f_n мм/об
25–43 43–65	CoroDrill®800 Центральная пластина – GC1025 Промежуточная пластина – GC1025 Периферийная пластина – GC1025 Защитный опорный вкладыш – PM1	15–25	0.09–0.25 0.20–0.30
63.5–184	T-Max 424.10 Центральная пластина, -23 GC1025 Промежуточная пластина, -23 GC1025/H13A Периферийная пластина, -23 H13A Защитный опорный вкладыш – S2	20–30	0.15–0.30



Трепанирующее сверление

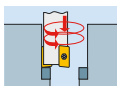
Рабочий диаметр фрезы D_c мм	Выбор инструмента	Скорость резания v_c м/мин	Подача f_n мм/об
60–110 (большой размер при необходимости)	T-Max U 416.7 WCMX 06T308R-53 1020	25	0.10



Винтовая интерполяция в сплошной материале

Выбор режущего инструмента	Рабочий диаметр фрезы	Минимальный диаметр отверстия $D_{m \min}$, мм	Выбор пластины	Максимальная глубина резания, a_p (мм)	Скорость резания v_c (м/мин)	Подача* f_z (мм/зуб)
CoroMill®390 концевая фреза	16	26	R390-11T331E-ML 2040	2	30	0.10
	20	34				
	25	44				
	32	58				
	40	74				
CoroMill®300	25	38	R300-1240E-MM 2040	2	30	0.20
	32	52				
	34	56				
	35	58				
	40	68				
	42	72				
	50	88				
	52	92				
	63	114				
	66	120				
80	148					

*Уменьшите подачу при программировании подачи центра инструмента.



Фрезерование по круговой интерполяции в предварительно просверленном отверстии

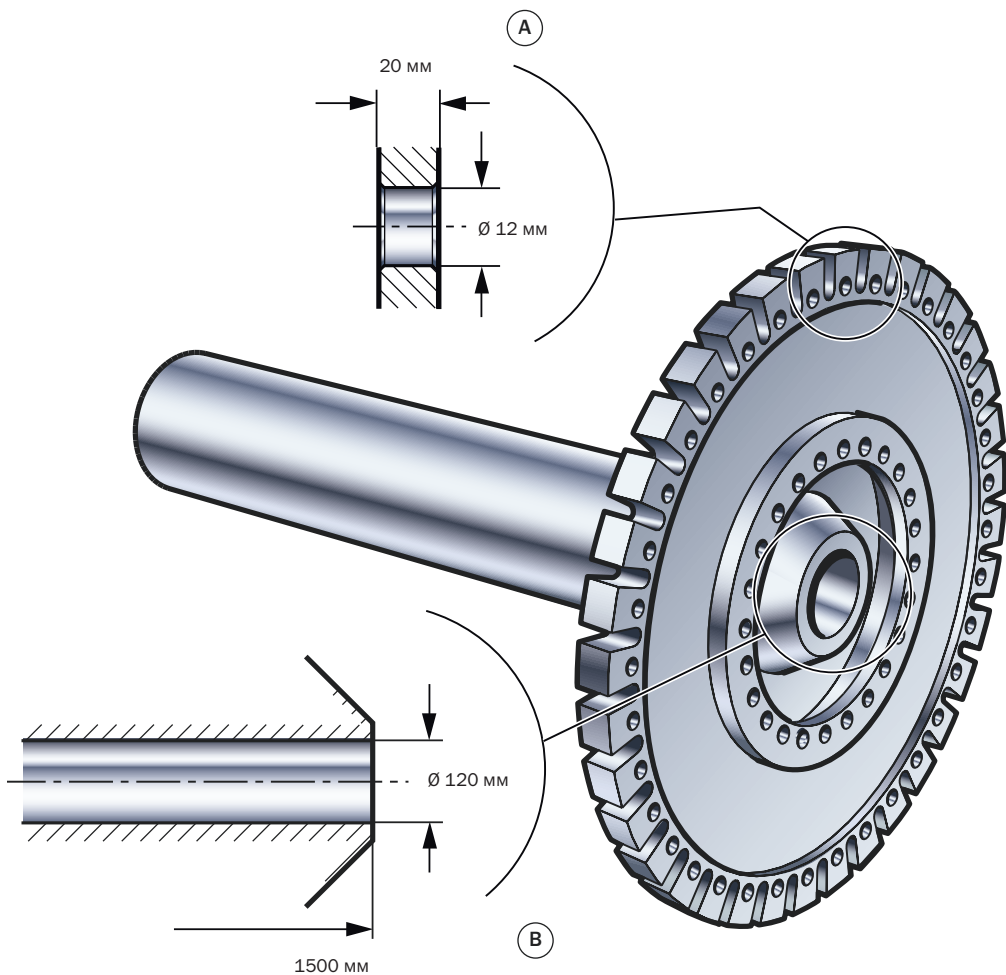
Рабочий диаметр фрезы (режущего инструмента) D_c мм	Минимальный диаметр отверстия $D_c = 80\% D_m$ D_m мм	Выбор инструмента	Максимальная глубина резания/ шаг a_p мм	Скорость резания v_c м/мин	Оптимальная радиальная глубина резания a_e мм	Подача* f_z мм/зуб	Коэффициент снижения подачи в зависимости от отношения диаметра инструмента к диаметру отверстия D_c/D_m			
							80%	60%	40%	20%
		CoroMill®Plura								
4	5	R216.23-04050CAK11P 1620	4	75	0.3	0.08	7.6	3.4	2	1.4
5	6.25	R216.23-05050CAK13P 1620	5		0.4					
6	7.5	R216.24-06050CAK13P 1620	6		0.5					
8	10	R216.24-08050EAK19P 1620	8		0.6					
10	12.5	R216.24-10050EAK22P 1620	10		0.8					
12	15	R216.24-12050GAK26P 1620	12		1.0					
		CoroMill®390								
		R390-11T308M-PM 1030								
16	20	R390-11T308M-PM 1030	10	30	2.0	0.1				
20	25				2.5					
25	31				3.1					
32	40				4.0					
40	50				5.0					

*Уменьшите подачу при программировании подачи центра инструмента.

Вал

Inconel 718

S 20.22



Изготовление отверстий в аэрокосмической промышленности – детали авиационных двигателей

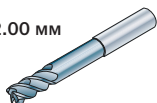
ОПЕРАЦИЯ А

Ø 12 мм, глубина отверстия 20 мм

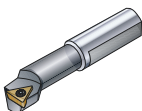
1. Сверление
CoroDrill Delta-C R846 – Ø 11.00 мм
R846-1100-30-A1A 1220
 v_c 25 м/мин
 f_z 0.1 мм/об



2. Чистовое растачивание
Вариант 1
CoroMill Plura R216.24 – Ø 12.00 мм
R216.24-12050САК26Р 1620
 v_c 40 м/мин
 f_n 0.2 мм/зуб



2. Чистовое растачивание
Вариант 2
Расточная оправка R429
Пластина TCEX 06T1 02L-F 1105
 v_c 35 м/мин
 f_n 0.08 мм/зуб



3. Снятие фасок
Пластина 327R06-1212045-CN 1025
Корпус 327-12В30ЕС-06
 v_c 75 м/мин
 f_z 0.1 мм/зуб



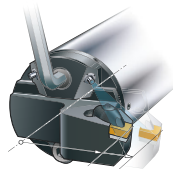
ОПЕРАЦИЯ В

Ø 120 мм, глубина отверстия 1500 мм

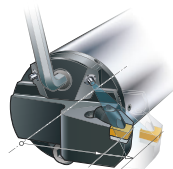
1. Сверление
T-Max 424.1 DHD, Ø 110 мм
 v_c 43 м/мин
 f_n 0.23 мм/об



2. Черновое растачивание – отверстие Ø 119.5 мм
CoroTurn SL – оправка Silent Tools, Ø 80 мм
DNMG 150608-23 1105
 v_c 40 м/мин
 f_n 0.2 мм/об
 a_p 2.0 мм



3. Чистовое растачивание – отверстие Ø 120.0 мм
CoroTurn SL – расточная оправка Silent Tools, Ø 80 мм
DNMG 150608-SM 1105
 v_c 40 м/мин
 f_n 0.2 мм/об
 a_p 0.25 мм

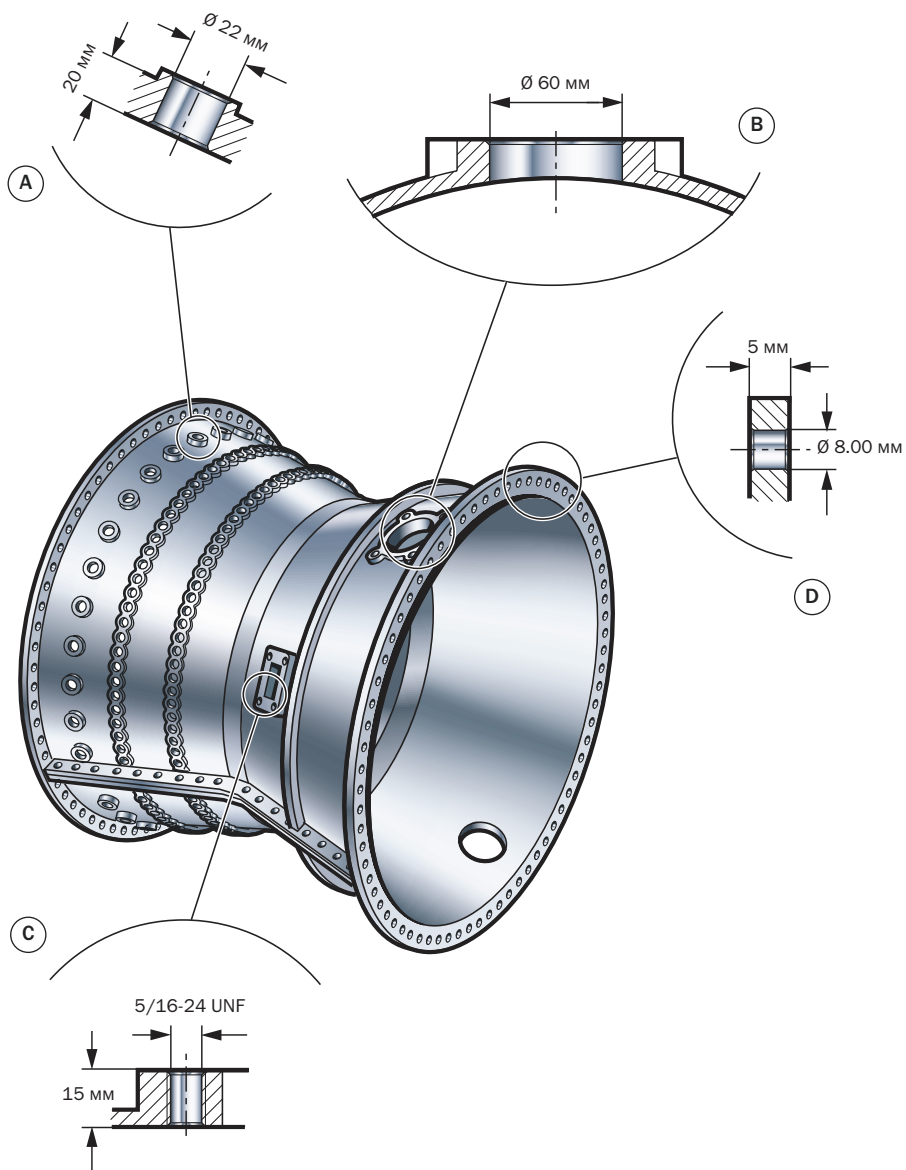


Типовые решения

Корпусные детали

Waspalloy

S CMC 20.22



Изготовление отверстий в аэрокосмической промышленности – детали авиационных двигателей

ОПЕРАЦИЯ А

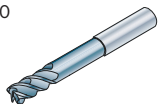
Ø 22 мм, глубина отверстия 20 мм

1. Сверление
CoroDrill 880 – Ø 21.00 мм
Центр. пластина – LM 1044
Перифер. пластина – LM 1044
 v_c 30 м/мин
 f_n 0.05 мм/об



2. Круговая интерполяция – отверстие Ø 22 мм
CoroMill Plura R216.24 – Ø 12.00 мм
R216.24-12050CAK26P 1620

v_c 75 м/мин
 a_p 0.5 мм
 f_z 0.1 мм/зуб
 a_p 10 мм



3. Обработка фасок

Coromant Capto
CoroTurn XS
C4-CXS-47-06
CXS-06T045-20-6225R 1025
 v_c 75 м/мин
 f_z 0.1 мм/зуб



ОПЕРАЦИЯ В

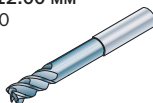
Ø 60 мм, глубина отверстия 20 мм

1. Винтовая интерполяция – отверстие Ø 59 мм
CoroMill 300 – Ø 35 мм
R300-12400E-MM 2040
 v_c 25 м/мин
 f_z 0.2 мм/зуб
 a_p 2.0 мм



2. Круговая интерполяция - отверстие Ø 60 мм
CoroMill Plura R216.24 – Ø 12.00 мм
R216.24-12050CAK26P 1620

v_c 75 м/мин
 f_z 0.1 мм/зуб
 a_p 10 мм



3. Обработка фасок

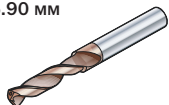
Coromant Capto
CoroTurn XS
C4-CXS-47-06
CXS-06T045-20-6225R 1025
 v_c 75 м/мин
 f_z 0.1 мм/зуб



ОПЕРАЦИЯ С

5/16-24 UNF, глубина отверстия 15 мм

1. Сверление
CoroDrill Delta-C R846 – Ø 6.90 мм
R846-0690-30-A1A 1220
 v_c 25 м/мин
 f_n 0.1 мм/об



2. Обработка фасок

Coromant Capto
CoroTurn XS
C4-CXS-47-05
CXS-05T045-20-5220R 1025
 v_c 75 м/мин
 f_z 0.1 мм/зуб



3. Резьбофрезерование

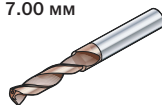
CoroMill Plura
R217.33C060240AC13N 1630
 v_c 75 м/мин
 f_z 0.07 мм/зуб



ОПЕРАЦИЯ D

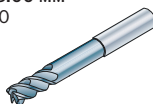
Ø 8 мм, глубина отверстия 5 мм

1. Сверление
CoroDrill Delta-C R846 – Ø 7.00 мм
R846-0700-30-A1A 1220
 v_c 25 м/мин
 f_n 0.1 мм/об



2. Чистовое растачивание

CoroMill Plura R216.24 – Ø 8.00 мм
R216.24-12050CAK26P 1620
 v_c 40 м/мин
 f_z 0.2 мм/зуб



3. Обработка фасок

Coromant Capto
CoroTurn XS
C4-CXS-47-05
CXS-05T045-20-5220R 1025
 v_c 75 м/мин
 f_z 0.1 мм/зуб



Основные термины и определения

Точение

Термины и размерность

D_m = Диаметр отверстия	мм	f_n = Подача на оборот	мм/об
v_c = Скорость резания	м/мин	κ_r = Угол в плане	град.
n = Частота вращения шпинделя	об/мин	R_{max} = Глубина профиля	мкм
T_c = Время резания	мин	r_c = Радиус при вершине	мм
Q = Производительность снятия материала	см ³ /мин	a_p = Глубина резания	мм
l_m = Длина обработки	мм	h_{ex} = Максимальная толщина стружки	мм
P_c = Потребная мощность	кВт	SCL = Спиральный путь резания	м
$k_{c0,4}$ = Удельная сила резания на толщину стружки 0,4 мм	Н/мм ²		

Формулы

Скорость резания (м/мин)

$$v_c = \frac{D_m \times \pi \times n}{1000}$$

Частота вращения шпинделя (об/мин)

$$n = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D_m}$$

Производительность снятия материала (см³/мин)

$$Q = v_c \times a_p \times f_n$$

Потребная мощность (кВт)

$$P_c = \frac{v_c \times a_p \times f_n \times k_{c0,4}}{60 \times 10^3} \left[\frac{0.4}{f_n \times \sin \kappa_r} \right]^{0.29}$$

Время резания (мин)

Константа n

$$T_c = \frac{l_m}{f_n \times n}$$

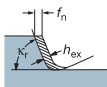
Глубина профиля (мкм)

$$R_{max} = \frac{f_n^2 \times 125}{r_c}$$

Максимальная толщина стружки

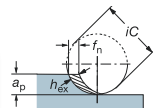
Форма пластины:
C, D, S, T, V, W

$$h_{ex} = f_n \times \sin \kappa_r$$



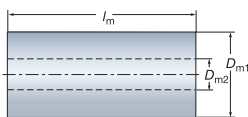
Круглые пластины

$$h_{ex} = f_n \times \sqrt{\frac{4a_p}{iC} - \left(\frac{2a_p}{iC}\right)^2}$$



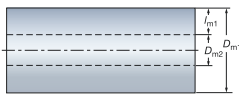
SCL (спиральный путь резания) – исходные данные в (мм) – результат в (м)

Точение и растачивание



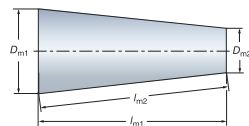
$$SCL = \frac{D_m \times \pi}{1000} \times \frac{l_m}{f_n}$$

Торцевое фрезерование



$$SCL = \left(\frac{D_{m1} + D_{m2}}{2} \times \frac{\pi}{1000} \right) \times \frac{l_{m1}}{f_n}$$

Цилиндрическое фрезерование



$$SCL = \left(\frac{D_{m1} + D_{m2}}{2} \times \frac{\pi}{1000} \right) \times \frac{l_{m2}}{f_n}$$

Время резания (мин)

$$T_c = \frac{SCL}{v_c}$$

Расчет: l_{m2}

$$l_{m2} = \sqrt{(l_{m1})^2 + \left(\frac{D_{m1} - D_{m2}}{2} \right)^2}$$

Фрезерование

Термины и размерность

D_{cap} = Фактический диаметр резания при глубине резания, a_p	мм	v_f = Подача стола (скорость подачи)	мм/мин
l_m = Длина обработки	мм	h_{ex} = Максимальная толщина стружки	мм
D_{ap} = Максимальный рабочий диаметр на определенной глубине резания	мм	h_m = Средняя толщина стружки	мм
a_p = Глубина резания	мм	z_c = Эффективное число зубьев	шт.
a_e = Ширина обработки	мм	k_{c1} = Удельная сила резания (для $h_{\text{ex}} = 1$ мм)	Н/мм ²
v_c = Скорость резания	м/мин	n = Скорость вращения шпинделя	об/мин
Q = Производительность снятия материала	см ³ /мин	P_c = Потребная мощность	кВт
T_c = Время резания	мин	κ_r = Главный угол в плане	град.
z_n = Общее число зубьев во фрезе	шт.	m_c = Увеличение удельной силы резания (k_c) как функция толщины стружки	
f_z = Подача на зуб фрезы	мм	iC = Диаметр вписанной окружности пластины	
f_n = Подача на оборот	мм	γ_0 = Передний угол	

Формулы

Скорость резания (м/мин)

$$v_c = \frac{D_{\text{cap}} \times \pi \times n}{1000}$$

Скорость вращения шпинделя (об/мин)

$$n = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D_{\text{cap}}}$$

Подача стола (скорость подачи)
(мм/мин)

$$v_f = f_z \times n \times z_n$$

Подача на зуб фрезы
(мм)

$$f_z = \frac{v_f}{n \times z_c}$$

Подача на оборот
(мм/об)

$$f_n = \frac{v_f}{n}$$

Производительность снятия материала
(см³/мин)

$$Q = \frac{a_p \times a_e \times v_f}{1000}$$

Удельная сила резания
(Н/мм²)

$$k_c = k_{c1} \times h_m^{-m_c} \times \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right)$$

Средняя толщина стружки (мм)
(торцово-цилиндрическое фрезерование),
когда $a_e/D_c \leq 0.1$

$$h_m \approx f_z \sqrt{\frac{a_e}{D_{\text{cap}}}}$$

Средняя толщина стружки (мм),
когда $a_e/D_c \geq 0.1$

$$h_m = \frac{\sin \kappa_r \times 180 \times a_e \times f_z}{\pi \times D_{\text{cap}} \times \arcsin\left(\frac{a_e}{D_{\text{cap}}}\right)}$$

Время резания
(мин)

$$T_c = \frac{l_m}{v_f}$$

Потребная мощность
(кВт)

$$P_c = \frac{a_p \times a_e \times v_f \times k_c}{60 \times 10^6}$$

Жаропрочные сплавы – таблица перекрестных ссылок

Обрабатываемый материал	Торговая марка	Твердость по Бринеллю НВ		код	Номинальный состав примерное содержание в %							
		После отжига	После отпуска (подвергнутые старению)		Ni	Cr	Co	Fe	Mo	C	Mn	
Сплавы на никелевой основе	Haynes 75	-	-	MC S2.0.Z.AN CMC 20.2	76.0 ¹⁾	20.0	-	5.0	-	0.11	1.0 ³⁾	
	Haynes 263	-	-		52.0 ¹⁾	20.0	20.0	0.7 ²⁾	6.0	0.06	0.6 ³⁾	
	Haynes 625	-	-		62.0 ¹⁾	21.0	1.0 ²⁾	5.0 ²⁾	9.0	0.1	0.5 ³⁾	
	Haynes X-750	-	-		70.0 ¹⁾	16.0	1.0 ²⁾	8.0	-	0.08	0.35 ²⁾	
	Haynes 718	-	-		52.0 ¹⁾	18.0	1.0 ³⁾	19.0	3.0	0.05	0.35 ²⁾	
	Incoloy 864	-	-		30.0-38.0	20.0-25.0	-	Баланс	4.0-4.8	0.08 ²⁾	1.0 ³⁾	
	Nimocast PE10	-	-	MC S2.0.Z.AN CMC 20.2	56.4	20.0	-	-	6.0	-	-	
	Nimocast PD16	-	-		43.8	16.5	-	34.0	-	0.06	-	
	Nimocast PK24	-	-		61.1	9.5	15.0	-	9.0	0.17	-	
	Nimocast 842	-	-		57.7	22.0	10.0	-	-	0.3	-	
	Nimocast 713	-	-		72.6	13.4	-	-	-	0.12	-	
	Refractalloy 26	-	-		36.1	17.21	18.51	Баланс	2.62	0.03	0.55	
	Rene 63	-	-	MC S2.0.Z.AG CMC 20.2	Баланс	14.0	15.0	3.5	6.0	0.05	0.1	
	Rene 77	-	-		Баланс	15.0	15.0	0.4	4.2	0.07	0.1	
	Rene 80	-	-		Баланс	14.0	9.5	-	4.0	0.17	-	
	Rene 95	500	300		64.5	14.0	8.0	-	3.5	0.15	-	
	Rene 100	-	-		Баланс	10.0	15.0	-	3.0	0.18	-	
	Rene 125	-	-		Баланс	8.9	10.0	-	2.0	0.1	-	
TRW 1800	-	-	70.0		13.0	-	-	-	0.1	-		
TRW VIA	-	-	Баланс		6.0	7.5	-	2.0	0.13	-		
Hastelloy B*	140	-	67.0 ²⁾		1.0 ³⁾	2.5	5.0	28.0	0.05 ²⁾	1.0 ²⁾		
После отжига или отпуска в расплаве солей	Hastelloy S*	200	-		MC S2.0.Z.AN CMC 20.21	67.0 ¹⁾	16.0	2.0 ²⁾	3.0 ²⁾	15.0	0.02 ²⁾	0.5
	Hastelloy W*	-	-	63.0 ¹⁾		5.0	2.5	6.0	24.0	0.12 ²⁾	1.0 ²⁾	
	Hastelloy X*	160	-	47.0 ¹⁾		22.0	1.5	18.0	9.0	0.1	1.0 ²⁾	
	Haynes HR-120	-	-	37.0		25.0	3.0 ²⁾	33 ¹⁾	2.5 ²⁾	0.05	0.7	
	Haynes HR-160	-	-	37.0 ¹⁾		28.0	2.0 ²⁾	2.0 ²⁾	1.0 ²⁾	0.05	0.5	
	Haynes 214*	-	-	75.0 ¹⁾		16.0	-	3.0	-	0.05	0.5 ²⁾	
	Haynes 230	-	-	57.0 ¹⁾		22.0	5.0 ²⁾	3.0 ²⁾	2.0	0.1	0.5	
	Haynes 242*	-	-	65.0 ¹⁾		8.0	2.5 ²⁾	2.0 ²⁾	25.0	0.03 ²⁾	0.8 ²⁾	
	Incoloy 825*	180	-	MC S2.0.Z.AN CMC 20.21	38.0-46.0	19.5-23.5	-	min 22.0	2.5-3.5	0.05 ²⁾	1.0 ²⁾	
	Incoloy 890	-	-		42.5	25.0	-	Баланс	1.5	0.1	1.0 ²⁾	
	Incoloy 909	-	-		35.0-40.0	-	12-16.0	Баланс	-	0.06 ²⁾	-	
	Incoloy 330	-	-		34.0-37.0	17-20.0	-	Баланс	-	0.08 ²⁾	2.0 ²⁾	
	Inconel 600*	170	-		72.0	14.0-17.0	-	6-10	-	0.15 ²⁾	1.0 ²⁾	
	Inconel 601*	150	-		58.0-63.0	21.0-25.0	-	3)	-	0.1 ²⁾	1.0 ²⁾	
	Inconel 603 XL	-	-		Баланс	15.0-23.0	-	-	4.0 ²⁾	0.3 ²⁾	0.3 ²⁾	
	Inconel 617*	-	-		min 44.5	20.0-24.0	10-15	3.0 ²⁾	8-10	0.05-1.5	1.0 ²⁾	
	Inconel 625*	180	-		MC S2.0.Z.AN CMC 20.21	min 58.0	20.0-23.0	1.0 ²⁾	5.0 ³⁾	8-10	0.1 ²⁾	0.5 ²⁾
	Inconel 690	-	-			min 58.0	27.0-31.0	-	7.0-11.0	-	0.05 ²⁾	0.5 ²⁾
Inconel 693	-	-	3)	27.0-31.0		-	2.5-6.0	-	0.15 ²⁾	1.0 ²⁾		
Nimonic 75*	170	-	Баланс	18.0-21.0		-	5.0 ²⁾	-	0.08-0.15	1.0 ²⁾		
Udimet 520	-	-	Баланс	18.0-20.0		11.014.0	-	5.5-7.0	0.02-0.06	-		
Udimet 720	-	-	Баланс	15.5-16.5		14.0-15.5	-	2.75-3.25	0.01-0.02	-		
Udimet D-979	-	-	42.0-48.0	14.0-16.0		-	Баланс	3.0-4.5	0.08 ²⁾	0.75 ²⁾		
Udimet R-41	-	-	Баланс	18.0-20.0		10.0-12.0	5.0 ²⁾	9.0-10.5	0.12 ²⁾	-		
Подвергнутые старению или отжигу в расплаве солей	Nimonic 86	-	-	MC S2.0.Z.AG CMC 20.22		Баланс	25.0	-	-	10.0	0.05	0.015
	Astroloy*	-	370			Баланс	15.0	17.0	-	5.0	0.04	-
	Hastelloy R-235*	-	310		61.0	15.0	2.5	10.0	5.5	0.15	0.25	
	Haynes R-41	-	-		52.0 ¹⁾	19.0	11.0	5.0	10.0	0.09	0.1 ²⁾	
	Incoloy 901*	180	300		44.3	12.5	-	34.0	6.0	0.05	0.24	
	Incoloy 903*	-	380		36.0-40.0	-	13.0-17.0	Баланс	-	-	-	
	Incoloy 907	-	-	35.0-40.0	-	12.0-16.0	Баланс	-	-	-		
	Incoloy 908	-	-	47.0-51.0	3.75-4.5	0.5 ²⁾	Баланс	-	0.03 ²⁾	1.0 ²⁾		
	Inconel 706*	-	-	MC S2.0.Z.AG CMC 20.22	39.0-44.0	14.5-17.5	1.0 ²⁾	Баланс	-	0.06 ²⁾	0.35 ²⁾	
	Inconel 718*	180	380		50.0-55.0	17.0-21.0	1.0 ²⁾	Баланс	2.8-3.3	0.08 ²⁾	0.35 ²⁾	
	Inconel 722*	-	380		Баланс	15.0	-	6.5	-	0.04	0.55	
	Inconel X-750*	-	390		min 70.0	14.0-17.0	1.0 ²⁾	5.0-9.0	-	0.06 ²⁾	1.0 ²⁾	
	Inconel 751**	-	-		min 70.0	14.0-17.0	-	5.0-9.0	-	0.1 ²⁾	0.5 ²⁾	
	Inconel 783*	-	-		26.0-30.0	2.5-3.5	3)	24-27.0	-	0.03 ²⁾	0.5 ²⁾	
Inconel HX	-	-	Баланс		20.5-23.0	0.5-2.5	17.0-20.0	8.0-10	0.05-1.15	1.0 ²⁾		
продолжение следует ...	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	

1) Баланс – содержание данного компонента компенсирует отклонения по содержанию других легирующих компонентов с целью получения желаемой структуры сплава.

2) Максимум

3) Остаток

* Эти сплавы могут упрочняться после отпуска (в процессе старения).

Si	Al	Ti	Другие	USA SAE	USA AMS	UK BS	France ANFOR	Germany Werkst. Nr	Germany DIN 1706	Другие
1.0 ²⁾	-	0.4	0.5 ²⁾	-	-	-	-	-	-	-
0.4 ²⁾	0.6 ²⁾	2.4 ²⁾	0.2 ²⁾	-	5886	-	-	-	-	N07263
0.5 ²⁾	0.4 ²⁾	0.4 ²⁾	3.7	-	5666	-	-	-	-	N06625
0.35 ²⁾	0.8	2.5	1.5	-	5542	-	NC15TNbA	-	-	N07750
0.35 ²⁾	0.5	0.9	5.109	-	5662/5664	-	-	-	-	N07718
0.6-1.0	-	0.4-1.0	-	-	-	-	-	-	-	S35135
-	-	-	9.0	-	-	HC202	NC20N13	-	-	-
-	1.2	1.2	-	-	5397	HC204	NK15CAT	LW2.4674	NiFe33Cr17Mo	-
-	5.5	4.7	1.0	-	-	3146	-	-	S-NiCr13Al16MoNb	-
-	-	-	-	5391A	-	HC203	NC13AD	2.4670	S-NiCr13Al16MoNb	SS071712
-	6.2	1.0	2.3	5931A	-	HC203	NC13AD	-	G-NiCr13Al16MoNb	-
0.23	0.21	2.66	0.019	-	-	-	Z6NKCDT38	-	-	-
0.2	3.8	2.5	3.5	-	-	-	-	-	-	-
0.1	4.3	3.3	-	-	-	-	-	-	-	-
-	3.0	5.0	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	2.5	3.5	-	-	-	NC14K8	-	-	-
-	5.5	4.7	-	-	-	-	-	-	NiCo15Cr10MoAlTi	-
-	4.7	2.5	4.05	-	-	-	-	-	-	-
-	6.0	0.06	10.5	-	-	-	-	-	-	-
-	5.4	1.0	6.3	-	-	-	-	-	NiTa9Co8W6CrAl	-
1.0 ²⁾	-	-	0.35 ²⁾	5396A	5396	-	ND37FeV	2.4800	S-NiMo30	N10001
0.4	0.25	-	1.035 ²⁾	-	-	-	-	-	-	-
1.0 ²⁾	-	-	0.6*	-	5755	-	-	-	-	N10004
1.0	-	-	0.6080 ²⁾	5390A	5390	-	NC22FeD	2.4603	-	N06002
0.6	0.1	-	3.404	-	-	-	-	-	-	N08120
2.75	-	0.5	2.0 ²⁾	-	-	-	-	-	-	N12160
0.2 ²⁾	4.5	-	0.12 ²⁾	-	-	-	-	-	DIN 177444 No 2.4646	N07214
0.4	0.3	-	14.035	-	5891	-	-	-	DIN 177444 No 2.4733	N06230
0.8 ²⁾	0.5 ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.5 ²⁾	0.2 ²⁾	0.6-1.2	3.0	-	-	30072-76	NC21FeDU	2.4858	NiCr21Mo	N08825
1.8	0.1	1.0 ²⁾	1.0	-	-	-	-	-	-	N08890
0.25-0.5	0.15 ²⁾	1.3-1.8	5.0	-	-	-	-	-	-	N19909
0.75-1.5	-	-	0.06*	-	-	-	-	1.4886	-	N08330
0.5 ²⁾	-	-	0.515 ²⁾	5540	5580	3072-76	NC15Fe	2.4816	NiCr15Fe	N06600
0.5 ²⁾	1.1-7	-	1.015 ²⁾	-	5715	-	-	2.4851	NiCr23Fe	N06601
2.0 ²⁾	0.5 ²⁾	0.5 ²⁾	0.1	-	-	-	-	-	-	-
1.0 ²⁾	0.8-1.5	0.6 ²⁾	1.0 ²⁾	-	-	-	-	2.4663a	-	N06617
0.5 ²⁾	0.4 ²⁾	0.4 ²⁾	4.0	-	5666	-	NC22FeDNB	2.4856	NiCr22Mo9Nd	N06625
0.5 ²⁾	-	-	0.515 ²⁾	-	-	-	-	2.4642	-	N06690
0.5 ²⁾	2.4-4	1.0 ²⁾	1.0	-	-	-	-	-	-	N06693
1.0 ²⁾	-	0.2-0.6	0.5 ²⁾	-	-	HR5, 203,-4	NC20T	2.4630	NiCr20Ti	N06075
-	1.8-2.3	2.9-3.25	1.0	-	-	-	-	-	-	-
-	2.25-2.75	4.75-5.25	1.5	-	-	-	-	-	-	-
0.75 ²⁾	0.75-1.3	2.7-3.3	4.0	-	-	-	-	-	-	N09979
-	1.4-1.8	3.0-3.3	0.01 ²⁾	-	-	-	-	-	-	N07041
-	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-
-	4.0	3.5	0.025	-	-	-	-	-	-	N13017
0.6	3.0	2.0	-	-	-	-	-	-	-	AISI 686
0.5*	1.5	3.1	0.006	-	-	-	-	-	-	-
0.12	0.15	2.7	0.15	-	5660	-	ZSNCDT42	LW2.4662	NiFe33Cr14MoTi	N09901
-	0.3-1.15	1.0-1.85	3.0	-	-	-	-	-	-	N19903
0.07-0.35	0.2 ²⁾	1.3-1.8	5.0	-	-	-	-	-	-	N19907
0.5 ²⁾	0.75-1.25	1.2-1.8	3.5	-	-	-	-	-	-	N09908
0.35 ²⁾	0.4 ²⁾	1.5-2	3.4	-	-	-	-	-	-	N09706
0.35 ²⁾	0.2-0.8	0.65-1.15	5.3	5383	5589	HR8	NC19FeNB	LW 2.4668	NiCr19Fe19NbMo	N07718
0.2	0.6	2.4	30.0	-	5541	-	NC16FeTi	-	NiCr16FeTi	N07722
0.5 ²⁾	0.4-1.0	2.25-2.75	1.5	5542G	5582	-	NC16FeTNb	2.4669	NiCr16FeTi	N07750
0.9-1.5	2.2-6	1.0	-	-	-	-	-	-	-	N07751
0.5 ²⁾	5.0-6.0	0.1-0.4	3.5	-	-	-	-	-	-	R30783
1.0 ²⁾	-	-	1.0	-	-	-	-	2.4665	-	N06002

Обрабатываемый материал	Торговая марка	Твердость по Бринеллю НВ		код	Номинальный состав примерное содержание в %							
		После отжига	После отпуска (подвернутые старению)		Ni	Cr	Co	Fe	Mo	C	Mn	
Подвернутые старению или отжигу в расплаве солей	Jethete M-252*	-	320	MC S2.0.Z.AG CMC 20.22	55.3	19.0	10.0	2.5	-	0.15	-	
	MAR-M 246*	-	270		59.5	9.0	10.0	-	2.5	0.15	-	
	MAR-M 421*	-	-		62.3	15.5	10.0	-	1.7	0.15	-	
	MAR-M 432*	-	-		52.3	15.5	20.0	-	-	0.15	-	
	Nimocast 80*	-	-		69.9	20.0	2.0	5.0	-	0.1	-	
	Nimocast 90*	-	-		52.9	20.0	16.5	5.0	-	0.1	-	
	Nimonic 80A*	-	350		Баланс	18.0-21.0	2.0 ¹⁾	3.0 ¹⁾	-	0.1	1.0 ¹⁾	
	Nimonic 81*	200	-		Баланс	30.0	2.0	1.0	0.3	0.05	0.5	
	Nimonic 90*	-	346		Баланс	18.0-21.0	15.0-21.0	1.5 ¹⁾	-	0.13 ¹⁾	1.0 ¹⁾	
	Nimonic 91	-	-		Баланс	27.0-30.0	19.0-21.0	1.0 ¹⁾	-	0.1 ¹⁾	1.0 ¹⁾	
	Nimonic 105*	-	320		Баланс	14.0-15.7	18.0-22.0	1.0 ¹⁾	4.5-5.5	0.12 ¹⁾	1.0 ¹⁾	
	Nimonic 115*	-	350		Баланс	14.0-16.0	13.0-15.5	1.0 ¹⁾	3.0-5.0	0.12-0.2	1.0 ¹⁾	
	Nimonic 901*	-	350	MC S2.0.Z.AG CMC 20.22	42.5	12.5	1.0 ¹⁾	Баланс	5.75	0.1 ¹⁾	0.5 ¹⁾	
	Nimonic 263*	-	275		Баланс	19.0-21.0	19.0-21.0	0.7 ¹⁾	5.6-6.1	0.04-0.08	0.6 ¹⁾	
	Nimonic PE16*	-	250		Баланс	42.0-43.0	15.5-17.5	2.0 ¹⁾	Баланс	2.8-3.8	0.04-0.06	0.2 ¹⁾
	Nimonic PK33*	-	350		Баланс	16.0-20.0	12.0-16.0	1.0 ¹⁾	5.0-9.0	0.07 ¹⁾	0.5 ¹⁾	
	Rene 41	-	-		Баланс	19.0	11.0	3.0	9.75	0.05	-	
	Waspaloy	-	-		Баланс	18.0-21.0	12.0-15.0	2.0 ¹⁾	3.5-5.0	0.02-0.1 ¹⁾	1.0 ¹⁾	
Waspaloy*	-	-	Баланс		58.0b	19.0	13.5	2.0 ¹⁾	4.3	0.08	0.1 ¹⁾	
GMR 235*	-	310	MC S2.0.C.NS CMC 20.24		63.3	15.5	-	10.0	5.2	0.15	0.25	
GMR 235D*	-	-		4.5	15.5	-	4.5	5.0	0.15	-		
IN-100*	-	350		61.6	12.5	18.5	-	3.2	0.07	1.2		
Jessop G39*	130	-		67.5	19.5	-	5.0	3.0	0.5	-		
Jessop G64*	220	-		60.7	11.0	-	2.0	3.0	0.15	-		
Jessop G81*	-	300		79.3	20.0	13.0	-	-	0.05	-		
MAR-M 200*	-	-		69.4	9.0	10.0	-	-	0.15	-		
Air Resist 13	-	-		MC S3.0.Z.AG CMC 20.3	-	21.0	Баланс	-	-	0.45	-	
Air Resist 213	-	-	-		19.0	Баланс	-	-	0.18	-		
Altemp S 816	-	-	20.0		20.0	47.6	-	4.0	4.0	-		
FSX 414	-	-	10.0		29.0	Баланс	-	-	0.25	-		
HS 25	-	-	10.0	20.0	Баланс	-	-	0.10	-			
HS 30	-	-	MC S3.0.Z.AG CMC 20.3	16.0	24.0	51.4	1.0	6.0	-	0.6		
HS31	-	-		10.0	25.0	Баланс	1.5	-	0.50	-		
HS36	-	-		10.0	18.0	53.1	2.0	-	15.0	1.5		
Jessop 832	-	-		12.0	19.0	44.0	17.0	2.0	-	0.8		
Jessop 834	-	-		12.0	19.0	42.0	20.0	2.0	-	-		
Jessop 875	-	-		-	21.0	66.0	-	-	11.0	-		
Jetalloy 209	-	-	MC S3.0.Z.AG CMC 20.3	10.0	20.0	52.0	1.0	-	15.0	-		
L-251	-	-		10.0	19.0	Баланс	1.0	-	-	-		
M 203	-	-		24.5	19.5	Баланс	1.0	-	2.15	0.8		
M 204	-	-		24.5	18.5	Баланс	1.6	-	-	-		
M 205	-	-		24.5	18.5	Баланс	1.6	-	2.75	-		
MAR-M 302	-	-	MC S3.0.Z.AG CMC 20.3	-	21.5	Баланс	-	-	0.85	-		
MAR-M 322	-	-		-	21.5	Баланс	0.75	-	-	0.1		
MAR-M 509	-	-		10.0	23.5	Баланс	-	-	-	0.1		
MAR-M 905	-	-		20.0	20.0	Баланс	-	-	-	-		
MAR-M 918	-	-		20.0	20.0	Баланс	-	-	0.05	-		
Refractaloy 70	-	-		20.0	21.0	46.0	0.5	8.0	4.0	-		
V-36	-	-	20.0	25.0	43.2	2.4	4.0	2.0	0.6			
WI-52	-	-	MC S3.0.Z.AG CMC 20.3	0.5	21.0	62.6	2.0	-	11.0	0.25		
Jessop X-40	-	-		10.0	25.0	Баланс	1.5	-	0.50	0.5		
Jessop X-45	-	-		10.5	25.5	Баланс	2.0	-	0.25	-		
Jessop X-50	-	-		20.5	25.5	40.3	4.0	-	12.0	-		
Jessop X-63	-	-		10.0	25.0	57.6	1.0	6.0	-	-		

1) Максимум

* Эти сплавы могут упрочняться после отпуска (в процессе старения).

Si	Al	Ti	другие	USA SAE	USA AMS	UK BS	France ANFOR	Germany Werkst. Nr	Germany DIN 1706	другие
-	1.0	2.5	-	-	5551	-	-	2.4916	G-NiCr19Co	N07252
-	5.5	1.5	1.5	-	-	-	-	2.4675	NiCo10W10Cr9AlTi	-
-	4.25	1.75	1.75	-	-	-	-	-	NiCr16Co10WAlTi	-
-	2.5	4.3	2.0	-	-	-	-	-	NiCo20Cr16WAlTi	-
-	1.2	2.5	-	-	-	3146	NC 20 TA	2.4631	NiCr20TiAl	-
-	1.3	2.4	-	-	-	-	NC 20 K17 TA	2.4632	NiCr20Co18Ti	-
1.0 ¹⁾	1.0-1.8	1.8-2.7	0.17	-	-	Hr 410,601	NC20TA	2.4631	NiCr20TiAlk	N07080
0.5	0.9	1.8	0.26	-	-	-	-	-	-	-
1.0 ¹⁾	1.0-2.0	2.0-3.0	0.39 ¹⁾	-	-	Hr 2, 202	Nc20ATV	2.4632	NiCr20Co18Ti	N07090
1.0 ¹⁾	0.9-1.5	1.9-2.7	1.6	-	-	-	-	-	-	-
1.0 ¹⁾	4.5-4.9	0.9-1.5	0.4 ²⁾	-	-	HR 3	NCKD20ATV	2.4634	NiCo20C15MoAlTi	-
1.0 ¹⁾	4.5-5.5	3.5-4.5	0.4 ²⁾	-	-	HR4	NCK15ATD	2.4636	NiCo15Cr15MoAlTi	-
0.4 ¹⁾	0.35 ¹⁾	2.9	0.6 ²⁾	5660C	5661A	-	ZSNCDT42	2.4662	NiCr15MoTi	N09901
0.4 ¹⁾	0.6 ²⁾	1.9-2.4	0.3 ²⁾	-	-	HR10	NCK20D	2.4650	NiCr15Co19MoTi	N07263
0.5 ¹⁾	1.1-1.3	1.1-1.3	0.6 ²⁾	-	-	HR207	NW11AC	-	NiFe33Cr17Mo	-
0.5 ¹⁾	1.7-2.5	1.5-3.0	0.27 ¹⁾	-	-	-	NC19DUV	-	NiCr20Co16MoTi	-
-	1.6	3.5	0.007	-	5399	-	NC19KDT	2.4973	NiCr19Co11MoTi	N07041
0.75 ¹⁾	1.2-1.6	2.75-3.25	0.6	-	-	-	-	2.4654	-	N07001
0.15 ¹⁾	1.5	3.0	0.16 ¹⁾	-	5544	-	NC20K14	LW 2.4668	NiCr19Fe19NbMo	-
0.6	3.0	2.0	0.06	-	-	-	-	-	-	AISI: 686
-	3.5	2.5	0.05	-	-	-	-	-	NiCr16MoAl	-
0.5	5.0	4.75	-	-	5397	HC204	NK15CAT	LW 2.4674	NiCo15Cr10MoAlTi	N13100
-	-	-	4.5	-	-	-	-	-	NiCr20MoW	-
-	6.0	-	4.0	-	-	-	-	-	NiCr11AlWNb	-
-	1.3	2.3	-	-	-	-	-	-	NiCr20Co18Ti	-
-	5.0	2.0	1.0	-	-	-	NKW10CAtaHf	-	NIW13Co10Cr9AlTi	-
-	3.5	-	0.1	-	-	-	-	-	-	-
-	3.5	-	0.1	-	5537C	-	KC20WN	-	CoCr20W15Ni	-
-	-	-	0.4	-	-5534	-	-	LW 2.4989	CoCr20Ni20W	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	5537C	5759	-	KC20WN	LW 2.4964	CoCr20W15Ni	AISI:670
0.6	-	-	0.4	5380	-	-	-	-	CoCr26Ni14Mo	R30030
-	-	-	0.5	5382	ASTM A567	3146	KC25NW	LW 2.4670	CoCr25NiW	R30031
-	-	-	0.4	-	-	-	-	-	CoCr19W14NiB	-
0.3	-	-	3.5	-	-	-	-	-	CoCr19Fe16NiMoVNB	-
-	-	-	6.5	-	-	-	-	-	CoCr19Fe20NiMoVNB	-
-	-	-	2.45	-	-	-	-	-	CoCr21W11Nb	-
-	-	2.0	0.02	-	5772	-	KC22WN	-	CoCr22W14Ni	-
-	-	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-
1.0	24.5	0.07	-	-	-	-	-	-	-	-
1.0	-	0.07	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	0.07	1.67	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	9.0	-	-	-	-	-	CoCrW10TaZrB	-
0.1	0.75	1.0	6.75	-	-	-	-	-	CoCr22W9TaZrNb	-
0.1	0.2	0.6	4.0	-	-	3146-3	-	-	CoCr24Ni10WtaZrB	-
-	0.5	0.05	7.6	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	CoCr20Ni20Ta	-
-	-	-	0.08	-	-	-	-	-	-	-
0.5	-	-	2.29	-	-	-	-	-	CoCr25Ni20MoWNB	-
0.25	-	-	2.45	-	-	-	-	-	CoCr21Mo11W	-
0.5	-	-	0.5	-	5382	3156-2	-	LW 2.4670	CoCr25NiW	ASTM: A567
-	-	-	8.6	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	0.75	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	0.45	-	-	-	-	-	-	-

Обрабатываемый материал	Торговая марка	Твердость по Бринеллю НВ		код	Номинальный состав примерное содержание в %							
		После отжига	После отпуска (подвергнутые старению)		Ni	Cr	Co	Fe	Mo	C	Mn	
После отжига или отпуска в расплаве солей	J1650	-	-	MC S3.0.Z.AG CMC 20.3	27.0	20.0	Баланс	-	-	0.2	-	
	Haynes 25*	-	-		10.0	20.0	51.0 ¹⁾	3.0 ²⁾	-	0.1	1.5	
	Haynes 188*	-	-		22.0	22.0	39.0 ¹⁾	3.0 ²⁾	-	0.1	1.25 ²⁾	
	Undimet 188*	-	-		20.0-24.0	20.0-24.0	Баланс	3.0 ²⁾	-	0.05-0.15	1.25 ²⁾	
	Undimet L-605*	-	-		9.0-11.0	19.0-21.0	Баланс	3.0 ²⁾	-	0.05-0.15	1.0-2.0	
Подвергнутые старению	HS6*	-	-	MC S3.0.Z.AG CMC 20.32	2.5	28.0	60.5	3.0	-	5.0	-	
	HS21*	-	-		3.0	27.0	Баланс	1.0	5.0	-	0.6	
	J1570*	-	350		28.0	20.0	43.0	2.0	-	7.0	-	
Сплавы на основе железа закаленные и мартенситные (мартенсит отпуска) > 0.12%С	Greek Ascology	-	300	MC S.N.N.N.N CMC 05.3	2.0	12.0	-	Баланс	-	0.19	-	
	Jethete M 152**	-	300		2.5	12.0	-	Баланс	1.7	0.15	-	
Сплавы на основе железа дисперсионно-твердеющая сталь	Crucible A286*	-	250	MC M1.0.Z.PH CMC 05.4	25.0	14.0	-	Баланс	1.3	0.05	1.3	
	Discaloy 24*	-	280		26.0	13.5	-	Баланс	2.7	0.04	0.9	
	Discaloy 16-25-6*	-	290		25.0	16.0	-	Баланс	6.0	0.12	1.35	
	Unitemp 212*	-	280		25.0	16.0	-	Баланс	-	0.08	0.05	
	Incoloy A-286	-	280		25.5	15.0	-	Баланс	1.25	-	-	
	665B*	-	280		26.0	13.5	-	Баланс	1.5	0.08	-	
	19-9-DL*	-	250		9.0	18.5	-	Баланс	1.4	0.3	1.5	
	17-4-PH*	-	250		MC P5.0.Z.PH CMC 05.4	4.0	16.5	-	Баланс	-	0.7	1.0
	Udimar 250*	-	-			17.0-19.0	-	7.0-8.5	Баланс	4.6-5.1	0.03 ²⁾	0.1 ²⁾
		Udimar 300*	-		-	MC P3.3.Z.AN CMC 05.4	18.0-19.0	-	8.0-9.5	Баланс	4.6-5.2	0.03 ²⁾
После отжига или отпуска в расплаве солей	Incoloy 800**	184	-	MC S1.0.U.AN CMC 20.11	30-35.0	19-23.0	-	мин 39.5	-	0.1 ²⁾	-	
	Incoloy 803	-	-		32-37.0	25-29.0	-	Баланс	-	0.06-0.1	1.5 ²⁾	
	Incoloy DS**	180	-		34.5-41	17-19.0	-	Баланс	-	0.01	0.8-1.5	
	Sanicro 30**	150	-		34.0	22.0	-	Баланс	-	0.03	0.55	
	Ni10 36	-	-		36.0	0.25	-	Баланс	-	0.05	0.50	
	Ni10 42	-	-	42.0	0.25	1.0	Баланс	-	0.005	0.8		
Подвергнутые старению или отпуску в расплаве солей и подвергнутые старению	Haynes 556*	-	260	MC S1.0.U.AG CMC 20.12	20.0	22.0	18.0	31.0 ¹⁾	3.0	0.1	1.0	
	Multimet 155*	-	260		20.0	21.0	20.0	30.0 ¹⁾	3.0	0.12	1.5	
	N155*	-	260		20.0	21.0	20.0	Баланс	3.0	0.15	1.5	
	N156*	-	260		33.0	17.0	24.0	Баланс	3.0	0.33	-	
	S 590*	-	270		20.0	21.0	20.0	Баланс	4.0	0.43	-	

1) Баланс – содержание данного компонента компенсирует отклонения по содержанию других легирующих компонентов с целью получения желаемой структуры сплава.

2) Максимум

* Эти сплавы могут упрочняться после отпуска (в процессе старения).

** Эти сплавы не могут упрочняться после отпуска (в процессе старения)

Si	Al	Ti	другие	USA SAE	USA AMS	UK BS	France ANFOR	Germany Werkst. Nr	Germany DIN 1706	другие
-	-	3.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.4 ²⁾	-	-	15.0	5537C	5759	-	KC20WN	LW 2.4964	CoCr20W15Ni	R30605
0.35	-	-	14.03	-	5772	-	KC22WN	-	CoCr22W14Ni	R30188
0.2-0.5	-	-	15.0	-	-	-	-	-	-	R30188
0.4 ²⁾	-	-	16.0	-	-	-	-	-	-	R30605
-	-	-	1.0	-	5373	-	-	-	-	R30006
0.6	-	0.25	-	-	5385	3531	-	-	CoCr28Mo	R30021
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	3.15	-	5508	-	-	-	-	S41880
-	-	-	0.3	-	5718	-	Z12 CND12	LW 1.4939	-	-
0.5	0.2	2.1	-	J467	5525	HR5152	Z06 NCT25	LW 1.4980	-	ASTM: 368
0.8	0.1	1.7	-	(J467)	5733	-	Z3 NCT25	LW 1.4943	-	S66220
0.7	-	0.3	0.4	-	5725	-	Z3 NCT25	-	-	-
0.15	0.15	4.0	0.5	-	-	-	-	-	-	-
-	-	2.1	-	5525	5726	HR 51-2	Z 3 NCT 25	1.4980	X5NiCrTi2615	S66286
-	-	2.85	-	J467	5543	-	-	1.4943	-	S66545
0.6	-	0.25	1.75	-	5526	-	-	LW 1.4984	-	S63198
1.0	-	-	3.57	J467	5604	-	-	1.4542	XCrNiCuNb174	S17400
0.1 ²⁾	0.05-0.15	0.3-0.5	0.02 ²⁾	-	-	-	-	-	-	K92890
0.1 ²⁾	0.05-0.15	0.55-0.8	0.02 ²⁾	-	-	-	-	-	-	K93120
-	0.15-0.6	0.15-0.6	-	-	-	-	-	1.4876	X10NiCrAlTi3220	N08800
1.0 ²⁾	0.15-0.6	0.15-0.6	-	-	-	-	-	-	-	S35045
1.9-2.6	-	0.2	0.5	-	-	-	-	1.4864	X12NiCrSi3616	-
0.55	0.3	0.5	0.1	-	-	-	-	1.4558	X2NiCrAlTi3220	-
0.25	0.10	0.10	0.14	-	-	-	-	1.3912	-	K93600
0.03	0.15	-	-	-	-	-	A54-301	1.3917	-	K94100
0.4	0.2	-	3.34	-	5877	-	-	-	-	R30556
1.0 ²⁾	-	-	3.65	-	5769	-	-	1.4971	X12CrCoNi2120	R30155
0.5	-	-	1.0	-	5768	-	-	1.4971	X12CrCoNi2120	R30155
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	5770	-	-	1.4977	X40CoCrNi2020	R30590

Примечания

A series of horizontal dotted lines for taking notes.

Примечания

A series of 20 horizontal dotted lines for writing notes.

Благодарность

Некоторые части этой публикации являются результатами технических исследований, проведенных AMRC* при финансовой поддержке компании Sandvik Coromant.

* Центр перспективного проектирования производственного оборудования (AMRC) – это товарищество, основанное на общих научных достижениях, компетентности и технических инновациях промышленных партнеров, а также на исследованиях мирового уровня на факультете машиностроения университета Шеффилда.

Sandvik Coromant Россия/СНГ
127018, Москва
ул. Полковая, 1, ООО "Сандвик"
www.sandvik.coromant.com/ru
coromant.ru@sandvik.com

C-2920:034 RUS/01 Бумага подлежит утилизации.
Напечатано в Швеции, AB Sandvikens Tryckeri. © AB Sandvik Coromant 2010.08



Your success in focus