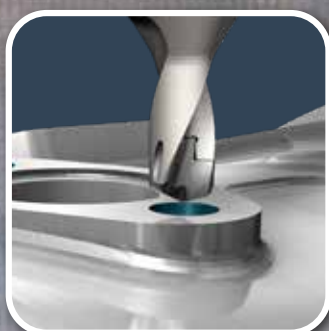
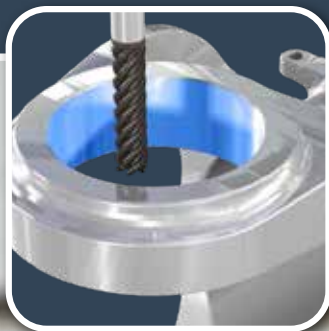
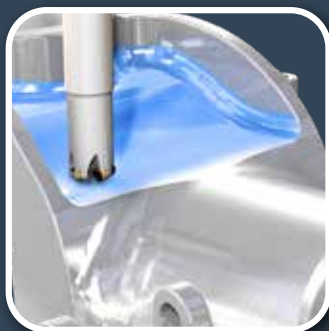
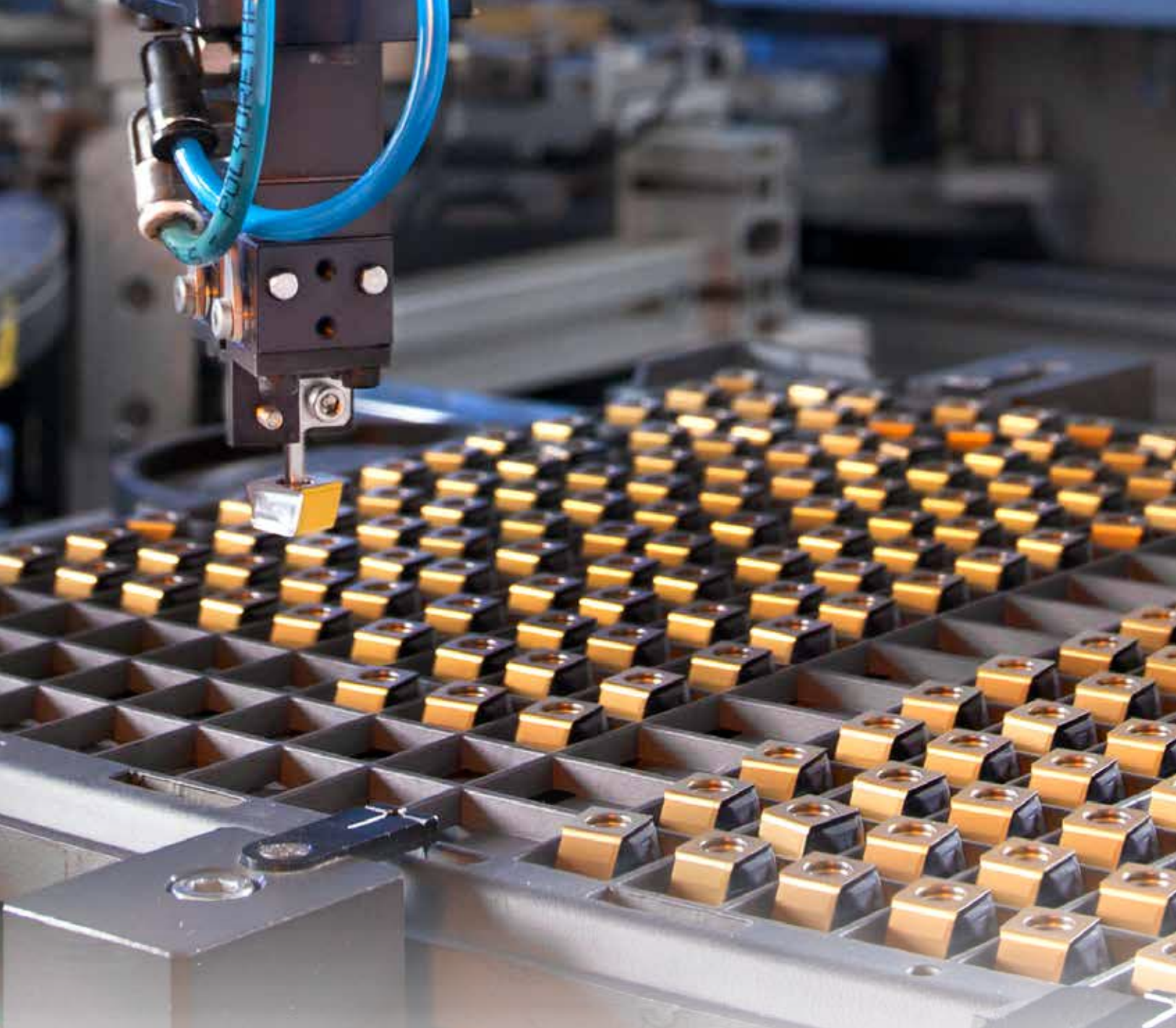


# Справочное руководство ISCAR Обработка титана







## Стандарт качества

Компания ISCAR сертифицирована Институтом стандартов на полное соответствие стандартам управления качеством, охраны окружающей среды, труда и безопасности. Выпущенный инструмент всегда проходит проверку перед отправкой заказчику. Контроль качества проводится на всех этапах: металлургическая лаборатория, проверка сырья, испытания в режиме реального времени, проверка эксплуатационных параметров инструмента в центре механической обработки и окончательное тестирование. На склад компании ISCAR поступает только тот инструмент, который успешно прошел все испытания..

Предисловие .....	2
Символы и обозначения.....	3
Список сокращений.....	4
<b>СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНА .....</b>	<b>5</b>
<b>ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ ТИТАНА .....</b>	<b>7</b>
<b>ФРЕЗЕРОВАНИЕ ТИТАНА .....</b>	<b>9</b>
МАРКИ ТВЕРДОГО СПЛАВА ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ТИТАНА .....	9
КАК ВЫБРАТЬ ПРАВИЛЬНУЮ МАРКУ ТВЕРДОГО СПЛАВА?.....	11
ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ФРЕЗЕРОВАНИЮ ТИТАНА .....	13
ИСХОДНЫЕ РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ .....	16
ФРЕЗЫ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНА .....	33
Фрезы с наборной режущей кромкой для уступов и широких кромок.....	33
Фрезерование с охлаждением под высоким давлением (НРС) .....	35
Фрезерование титана с быстрой подачей.....	38
Высокоскоростное фрезерование титана .....	43
<b>СВЕРЛЕНИЕ ТИТАНА .....</b>	<b>47</b>
СВЕРЛЕНИЕ НЕГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ .....	49
СВЕРЛЕНИЕ ЦЕНТРОВЫХ ОТВЕРСТИЙ .....	50
ВЫБОР СВЕРЛА.....	51
ИСХОДНЫЕ РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ ДЛЯ СВЕРЛЕНИЯ .....	52
<b>РАЗВЕРТЫВАНИЕ ТИТАНА.....</b>	<b>54</b>
ИСХОДНЫЕ РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ ДЛЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ.....	56

## ПРЕДИСЛОВИЕ

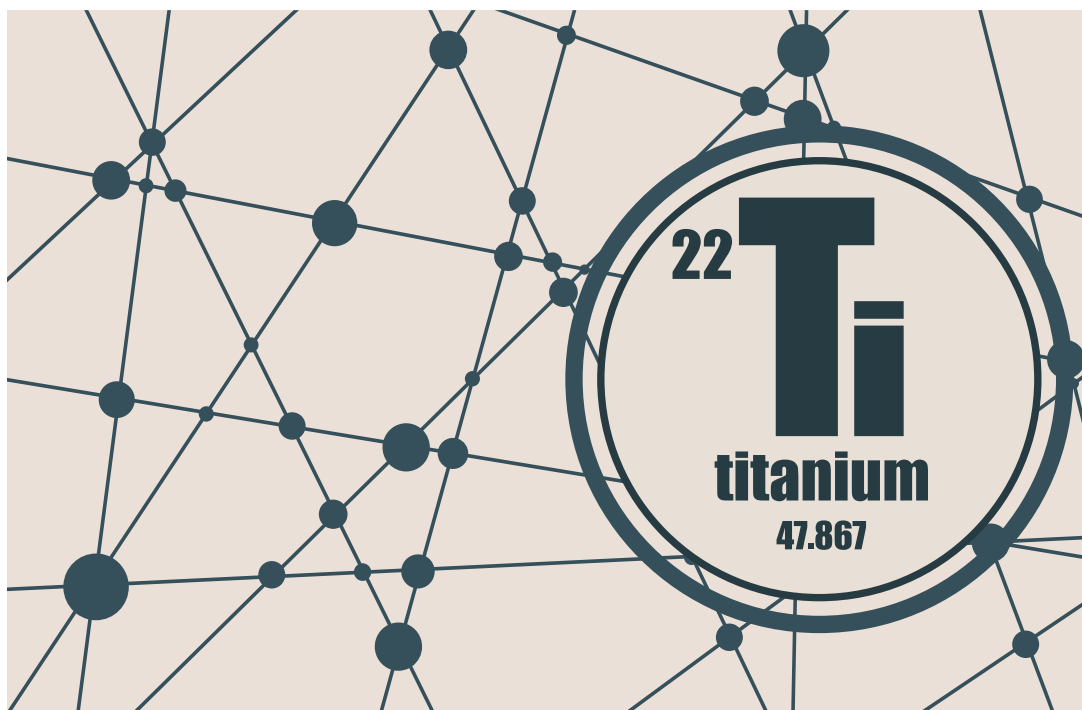
Титан и сплавы на его основе широко используются в современной промышленности. Исключительное соотношение прочности и веса, высокая коррозионная стойкость и производительность в различных температурных диапазонах делают эти материалы незаменимыми в аэрокосмической и химической отраслях, судостроении и медицине. Элементы рамы воздушного судна, диски и лопатки компрессора, крышки, гребные винты и ортопедические имплантаты – вот некоторые примеры деталей из титана и его сплавов.

Несмотря на эти неоспоримые преимущества, титан и титановые сплавы имеют свои определенные недостатки. Плохая обрабатываемость является одним из них. Действительно, мифические гиганты Титаны, в честь которых был назван новый легкий металл, открытый в конце 18-го века, тоже были несовершенны.

Производители режущего инструмента вкладывают большие усилия в продукцию, предназначенную для обработки титана. Мы рассматриваем задачу создания такой продукции в качестве основного направления работы. Наши исследования и разработки направлены на то, чтобы обеспечить промышленность эффективным и надежным режущим инструментом для производительной обработки титана. Повышению эффективности обработки также способствует правильный выбор инструмента и работа с ним. Мы надеемся, что это краткое руководство будет полезным справочным инструментом и поможет в обработке титана современным инструментом ISCAR.

Основная цель руководства – помочь в выборе наиболее подходящего инструмента и быстро найти режимы резания для вашей операции. Здесь также содержится дополнительная информация об обрабатываемости титана, инструментальных материалах, охлаждении, профессиональные термины и исторические факты.

С наилучшими пожеланиями,  
команда ISCAR,  
Ваш партнер в области интеллектуальной обработки.



## СИМВОЛЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ\*

*В руководстве используются метрические единицы измерения и их эквиваленты США. Как правило, эти символы следуют после метрических и заключаются в скобки.*

AE	угол зацепления,
a	припуск на механическую обработку за один проход, мм
ae	ширина (радиальная глубина) резания, мм
ap	осевая глубина резания, мм
ap <sub>max</sub>	максимальная осевая глубина резания, мм
c	соотношение ширины резания ae к номинальному диаметру инструмента d
d	номинальный диаметр инструмента, мм
de	эффективный диаметр, мм
f	подача, мм/об
fz	подача на зуб, мм/зуб
fzo	базовая (начальная) подача, мм/зуб
fz <sub>min</sub>	минимальная подача на зуб, мм/зуб
fz <sub>max</sub>	максимальная подача на зуб, мм/зуб
fz <sub>av</sub>	средняя арифметическая подача на зуб, мм/зуб
hm	средняя толщина стружки, мм
h <sub>max</sub>	максимальная толщина стружки, мм
Ke	коэффициент перекрытия
Kf	коэффициент прочности зуба
Kh	коэффициент вылета
Km	коэффициент обрабатываемости
Ks	коэффициент стабильности
n	скорость вращения (частота вращения шпинделя), rpm (об/мин)
Q	скорость съема металла (MRR), см <sup>3</sup> /мин
Vo	базовая скорость резания, м/мин
Vc	скорость резания, м/мин
Vf	скорость подачи (величина подачи), мм/мин
V <sub>HP</sub>	скорость резания с охлаждением под высоким давлением, м/мин
α <sub>r</sub>	угол врезания
χ	главный угол в плане

\* метрическая система мер

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

A	отжиг (отожженный)
ASTM	американское общество по испытаниям материалов
AM	аддитивное производство
BASCA	бета-отжиг с последующим медленным охлаждением и старением (бета-отожженный, медленно охлажденный и состаренный)
Bling	кольцо с лопатками
Blisk	диск с лопатками
Blotor	ротор с лопатками
Blum	барaban с лопатками
BUE	образование нароста на режущей кромке
CAD/CAM	автоматизированное проектирование и управление производством
CBN	кубический нитрид бора
CNC	ЧПУ (числовое программное управление)
CVD	химическое осаждение из паровой фазы
DA	двойной отжиг
Dia.	диаметр
DOC	глубина резания
ELI	ультрамелкозернистый
FF	быстрая подача*
HFM	фрезерование с большой подачей
HPC	охлаждение под высоким давлением
HSM	высокоскоростная обработка
HSS	быстрорежущая сталь
IBR	ротор с интегрированными лопатками (IBR)
ISO	Международная организация по стандартизации
MTB	станкостроители
MRR	скорость съема металла
PCD	поликристаллический алмаз
PVD	физическое осаждение из паровой фазы
R	прокатывание
SCEM	монолитная твердосплавная фреза
STA	термообработка на твердый раствор и старение
UHPC	сверхвысокое давление охлаждающей жидкости
WOC	ширина резания

\* быстрая подача – синоним большой или высокой подачи



## СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНА

В металлообработке под словом «титан» подразумевается не столько чистый титан, сколько его сплавы. По большей части промышленность потребляет только сплавы. Легирование титана направлено на получение новых сплавов с различными свойствами и возможностью термообработки некоторых из них. Типовые легирующие элементы – алюминий, ванадий, молибден, железо, хром и другие. Даже небольшая доля этих элементов может резко изменить свойство сплава.

Чистый титан может существовать в двух кристаллических формах: низкотемпературная  $\alpha$ -фаза с гексагональной плотноупакованной кристаллической решеткой и высокотемпературная  $\beta$ -фаза с объемно-центрированной кубической решеткой. Легирующие элементы в титановых сплавах приводят к увеличению  $\alpha$ -фазы или  $\beta$ -фазы. Элементы, которые усиливают или стабилизируют фазу называются стабилизаторами:  $\alpha$ -стабилизаторы или  $\beta$ -стабилизаторы. Например, алюминий, азот и свинец –  $\alpha$ -стабилизаторы, а ванадий и молибден –  $\beta$  стабилизаторы. Некоторые элементы, добавляемые в титановые сплавы, не усиливают ни  $\alpha$ - , ни  $\beta$ -фазу, но они важны как «нейтральные» элементы, которые придают сплаву определенные свойства.

По металлургическим характеристикам титан делится на следующие группы:

- Коммерчески чистый титан (нелегированный), обладающий хорошей коррозионной стойкостью, но низкой прочностью.
- $\alpha$ -сплавы (альфа-сплавы), состоящие только из  $\alpha$ -фазы и имеющие множество  $\alpha$ -стабилизаторов, которые характеризуются сохранением прочности при относительно высоких температурах.
- Псевдо- $\alpha$ -сплавы (псевдо-альфа-сплавы), которые представляют собой  $\alpha$ -сплавы с небольшим добавлением  $\beta$ -стабилизаторов и имеют хорошее сопротивление ползучести при рабочих температурах 450 °С -550 °С.
- $\alpha$ - $\beta$ -сплавы (альфа-бета-сплавы), пожалуй, самая распространенная группа, которая представляет собой тип смеси обеих фаз и содержит  $\alpha$ - и  $\beta$ -стабилизаторы. Сплавы этой группы пригодны для термической обработки и старения для повышения прочности.
- $\beta$ -сплавы (бета-сплавы) включают достаточно большое количество  $\beta$ -стабилизаторов для получения структуры  $\beta$ -фазы после обработки или даже в некоторых случаях – охлаждения. Группа характеризуется высокой прокаливаемостью и, следовательно, высокой прочностью. Однако увеличение количества легирующих элементов приводит к повышению плотности. Кроме того, увеличение прочности при термообработке на твердый раствор и старении приводит к снижению пластичности.

Псевдо- $\beta$ -сплавы (псевдо-бета-сплавы) иногда отделены от группы, потому что они не сохраняют структуру  $\beta$ -фазы после обработки полностью.

Как правило,  $\alpha$ -сплавы имеют лучшую пластичность, а  $\beta$ -сплавы – высокую прочность.  $\alpha$ - $\beta$ -сплавы по характеристикам находятся между ними (**Рис. 1**).

Существуют разные кодовые системы для обозначения титана. Например, Американское общество по испытанию материалов (ASTM) использует метод нумерации сплавов: сплав 1, сплав 2..., сплав 12...

В данном руководстве используется система обозначения по химическому составу, где показано процентное содержание основных легирующих элементов в сплаве. Например: «Ti6Al4V» или «Ti-6Al-4V» означает, что титановый сплав содержит 6% алюминия (Al) и 4% ванадия (V). Количество других легирующих элементов невелико, при необходимости его можно найти в подробном описании сплава. Оставшийся компонент – титан.

В таблице 1 приведены некоторые сплавы титана и их использование в промышленности.

**Таблица 1. Применение выбранных сплавов титана**

Группа	Обозначение	Условия	Примеры применения
Коммерчески чистый титан	ASTM сплавы 1-4	A	Медицинское оборудование, имплантаты, химическое оборудование, детали используемые в авиации и судостроении
$\alpha$ -титановые сплавы	Ti-5Al-2.5Sn	A	Самолеты (лопатки, трубопроводы), лопасти паровой турбины
псевдо- $\alpha$ -титановые сплавы	Ti-8Al-1Mo-1V Ti-6Al-1Mo-2Zr-1Ta	DA R	Каркас самолета Сварные детали, устойчивые к коррозии
$\alpha$ - $\beta$ -титановые сплавы	Ti-6Al-4V Ti-7Al-4Mo	A; STA STA	Лопатки турбин и компрессоров, диски, крепежные детали, детали ракет Планеры, детали ракет
$\beta$ -и псевдо- $\alpha$ -титановые сплавы	Ti-13V-11Cr-3Al Ti-10V-2Fe-3Al Ti-5Al-5Mo--5V-1Cr-1Fe Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr	A; STA STA A; STA STA	Крепежные детали, элементы напряженных конструкций, детали ракет Высокопрочные детали, планеры, шасси Высокопрочные детали, планеры, шасси Высокопрочные детали, планеры, шасси

A- отожженный, DA - двойной отжиг, R - прокатанный, STA – термообработка на твердый раствор и старение

Титан получил свое название в конце 18 века благодаря Мартину Клапроту, немецкому химику, одному из первооткрывателей титана. Клапрот нашел в руде оксид нового металла и дал ему имя мифических гигантов – Титанов. Однако есть и другая, более экзотическая версия, согласно которой «титан» был назван в честь Титании, королевы фей и жены короля Оберона в пьесе Уильяма Шекспира «Сон в летнюю ночь». Благодаря сказочной легкости в сочетании со способностью противостоять огромной нагрузке титан полностью оправдывает свое название.

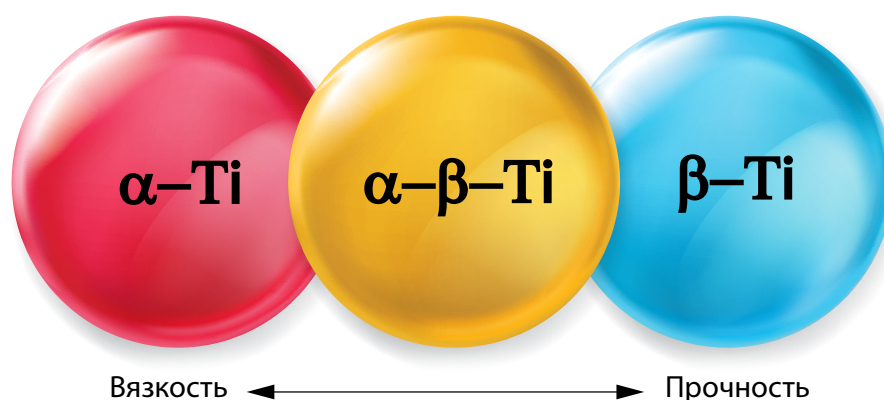


Рис. 1 Свойства вязкости и прочности титановых сплавов



# ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ ТИТАНА

Существует широко распространенное мнение о том, что с точки зрения обрабатываемости титан схож с аустенитной нержавеющей сталью. Такое утверждение может быть верно в отношении коммерчески чистого титана, а также, с некоторым допущением,  $\alpha$ - или даже  $\alpha$ - $\beta$ -сплавов; однако, оно в корне неверно применительно к  $\beta$ - и псевдо- $\beta$ - сплавам.

Титановые сплавы (которые мы будем называть титаном и отдельно указывать состав и свойства при необходимости) являются труднообрабатываемыми материалами, обрабатываемость зависит от различных факторов: химического состава, твердости, метода обработки.

Основные сложности при резании титана:

- Интенсивное тепловыделение приводит к чрезмерному адгезионному износу режущей кромки.
- Низкая теплопроводность приводит к плохой теплопередаче и замедленной теплоотдаче. Поэтому режущая кромка испытывает значительную тепловую нагрузку.
- «Пружинистость» титана из-за низкого модуля упругости способствует вибрации и ухудшает точность обработки и качество поверхности

Все эти факторы значительно сокращают срок службы инструмента и отрицательно влияют на производительность. Средние показатели в таблице 2 позволяют оценить обрабатываемость титана по сравнению с другими группами основных конструкционных материалов.

**Таблица 2. Обрабатываемость титана в сравнении с другими конструкционными материалами (средние показатели)**

Материал	Группы по ISO	Обрабатываемость, %
Нелегированная легкообрабатываемая сталь	<b>P</b>	100
Низколегированная отожженная сталь		60
Высоколегированная отожженная сталь		50
Аустенитная нержавеющая отожженная сталь	<b>M</b>	40
Коммерчески чистый титан	<b>S</b>	43
Титан Ti-6Al-4V, отожженный		25

Как уже упоминалось, обрабатываемость титана варьируется в зависимости от групп титана и сплавов внутри групп.

В таблице 3 представлено сравнение обрабатываемости различных представителей титана; на **Рис. 2** это показано графически.

*Титан - труднообрабатываемый материал, его обработка является сложной задачей.*

**Таблица 3. Оценка обрабатываемости сплавов титана (средние показатели)**

Группа	Обозначение	Условия*	Твердость	Обрабатываемость %
Чистый титан	Сплав 2		HB 150-200	170
$\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -титан	Ti-5Al-2.5Sn	A	HRC 31-34	115
	Ti-8Al-1Mo-1V	DA	HRC 34-36	110
$\alpha$ - $\beta$ -титан	Ti-6Al-4V	A	HRC 32-36	100
	Ti-8V-5Fe-1Al	A	HRC 34-38	97
	Ti-6Al-4V	STA	HRC 39-41	90
$\beta$ - и псевдо- $\beta$ -титан	Ti-10V-2Fe-3Al	STA	HRC 35-42	56
	Ti-13V-11Cr-3Al	A	HRC 39-41	53
	Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr	STA	HRC 36-44	51

\* A- отожженный, DA - двойной отжиг, STA - термообработка на твердый раствор и старение

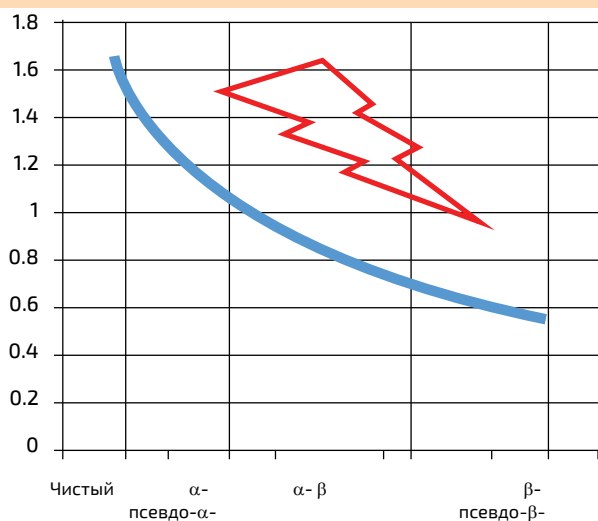
**Шкала обрабатываемости**

Рис. 2 Обрабатываемость групп титана (средние показатели)

*β-стабилизаторы повышают прочность и увеличивают удельную силу резания. Как правило, структура β-фазы ухудшает обрабатываемость и обработка β-титана является более сложной.*

Широкое использование титана в промышленности, особенно в аэрокосмическом секторе, привело к углубленному изучению обработки титана и вызвало серьезные изменения в технологии. Производители разработали надежные процессы резания и подняли производительность обработки титана на новый уровень. Сократились производственные затраты и возник импульс для широкого проникновения титана в новые конструкции. Например, сегодня обработка Ti-6Al-4V, наиболее часто используемого сплава титана, не вызывает трудностей, хотя 15-20 лет это была вовсе не простая задача.

Возрос интерес к более прочным сплавам с плохой обрабатываемостью. Эти сплавы привлекли внимание конструкторов в качестве облегченной альтернативы стали и нержавеющей стали, но низкая производительность обработки стала камнем преткновения. Промышленность столкнулась с проблемой обработки титановых сплавов, таких как Ti-10V-2Fe-3Al и Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr (VST 5553), которые являлись ключевыми элементами различных конструкций. С одной стороны, производители станков (MTB) достигают впечатляющих успехов в создании высокоэффективного оборудования. Многоосевые станки последнего поколения предназначены для производства больших партий и оснащены приводом с высоким крутящим моментом, передовым программным обеспечением ЧПУ и адаптивными блоками управления, а также подачей СОТС под высоким давлением. С другой стороны, отстающий прогресс в области режущего инструмента стал препятствием для полноценного использования преимуществ новых станков.

Поиск путей сокращения производственного разрыва установил строгие требования к режущему инструменту. Инструмент, который часто кажется второстепенным звеном в технологической цепочке, фактически играет роль главного фактора, который может повысить производительность обработки титана и, в первую очередь, его труднообрабатываемых сплавов.

Есть несколько вариантов совершенствования режущего инструмента. Основные направления его развития связаны с материалами, из которых он создан и его конструкцией (геометрией).

# ФРЕЗЕРОВАНИЕ ТИТАНА

## Твердые сплавы для фрезерования титана

Фрезы со сменными пластинами ISCAR изготавливаются из нескольких видов сплавов, разработанных специально для обработки материалов группы ISO S, включая титан.

Некоторые из сплавов являются основными; остальные - дополнительными.

Рис. 3 характеризует область применения сплавов в соответствии с ISO 513.

*Производители изделий из титана надеются, что аддитивное производство (АП) ознаменует собой начало изменений в технологии. АП позволяет получить форму детали, близкую к окончательной, благодаря чему существенно сократится процесс обработки. Отпадет необходимость удаления большого объема материала при черновой обработке, тяжелые станки просто исчезнут. Несмотря на большой успех АП, эксперты считают, что внедрение этого инновационного и перспективного метода займет время. Строгие требования безопасности в авиакосмической промышленности, которая является основным потребителем титановых компонентов, требуют особой осторожности при внедрении новых идей.*

МАРКИ ТВЕРДОГО СПЛАВА ДЛЯ ГРУППЫ ISO S								
<b>S05</b>								
<b>S10</b>								
<b>S15</b>		IC808						
		IC908			IC380			
<b>S20</b>			IC840				IC5820	
						IC330		IC830
<b>S25</b>				IC882		IC328		IC928
<b>S30</b>								

Основной сплав

Дополнительный сплав

Обработка SUMO TEC после нанесения покрытия

Обработка после нанесения покрытия

IC380 – для фрезерования Ti при стабильных условиях

Рис. 3 Сплавы фрезерных пластин для обработки титана

Основные сплавы – IC808 / IC908 (самые твердые сплавы), IC882 (самые прочные сплавы) и IC840, который по своим характеристикам находится между ними.

Дополнительные сплавы демонстрируют хорошие результаты на конкретных операциях, например, IC380 впечатляет своими характеристиками при фрезеровании в стабильных условиях, и, следовательно, может быть использован для обработки титана.



Рис. 4 Пластины красновато-коричневого цвета, напоминающего бронзу

**Некоторые факты о твердых сплавах**

Твердый сплав – это сочетание трех элементов: подложка из карбида вольфрама, которая изготавливается по технологии спекания (порошковая металлургия), износостойкое покрытие, последующая обработка покрытия. В некоторых случаях пластины могут быть без покрытия, в других – с покрытием.

Технология SUMO TEC представляет собой специальную обработку пластин после нанесения покрытия. Она увеличивает срок службы инструмента и повышает его надежность. Передняя поверхность пластины становится однородной, сводятся к минимуму внутренние напряжения, трещины и вкрапления в покрытии. Сход стружки становится плавным и увеличивается срок службы инструмента.

Сплавы ISCAR PVD с покрытием IC840 и IC882 отличаются красновато-коричневым цветом, напоминающим бронзу. Периферийные грани пластин, изготовленных из сплава с покрытием SUMO TEC CVD IC 5820, также имеют коричневый оттенок. Эти "бронзовые" сплавы сразу же нашли применение во фрезеровании материалов ISO 5 (титан и жаропрочные сплавы) и ISO M (аустенитная и аустенитная / ферритная нержавеющая сталь). В ISCAR уверены, что вышеупомянутые «бронзовые» твердые сплавы (**рис. 4**) принесут производителям преимущества премиум-класса при изготовлении деталей из титана.

Хотя выбор твердых сплавов для монолитных концевых фрез (SCEM) и фрезерных головок MULTI-MASTER несколько ограничен, этого достаточно для производства широкой номенклатуры инструмента для эффективной обработки титана различными методами, включая высокоскоростную обработку (HSM).

На **рис. 5 и 6** показана область применения сплавов в соответствии с ISO 513.

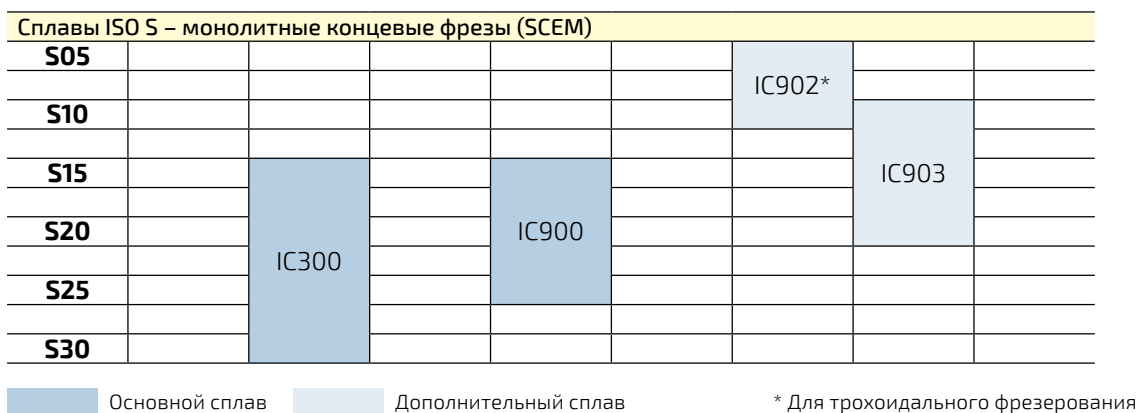


Рис. 5 Твердые сплавы ISCAR для SCEM

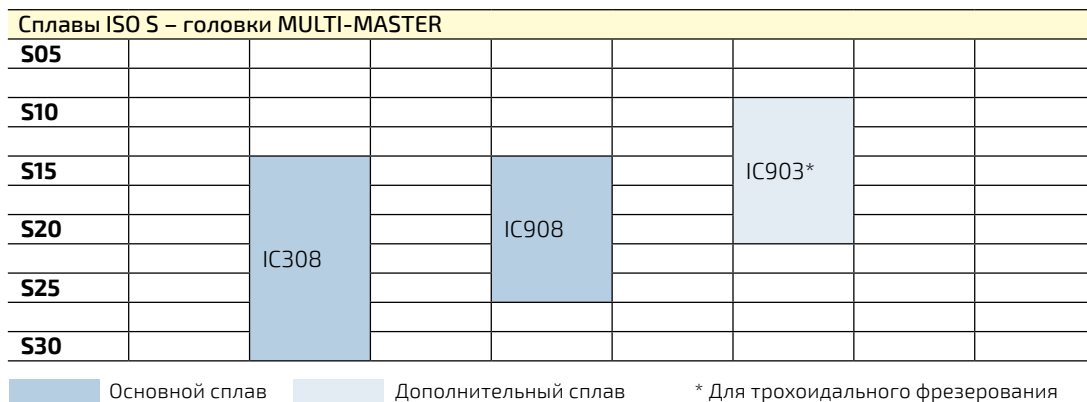


Рис. 6 Твердые сплавы ISCAR для головок MULTI-MASTER



## Как выбрать правильную марку твердого сплава?

Как говорят люди, занятые в производстве, лучший твердый сплав тот, который есть у вас на складе. Это утверждение (которое можно отнести ко всему режущему инструменту в целом), вероятно, верно, если речь идет о ситуации, которая требует оперативного решения. Однако планирование производственного процесса или эффективное управление запасами инструмента требует серьезного прикладного анализа плюсов и минусов предлагаемых сплавов. **Рис. 3-6** схематически представляет области применения сплавов и наглядно иллюстрирует выводы.

### Фрезы со сменными пластинами

IC840 – наиболее универсальный твердый сплав, поэтому его следует рассматривать как первый выбор, особенно в самых общих случаях.

Сплав IC808 отличается повышенной твердостью по сравнению с IC840. Он подходит для получистовой и чистовой обработки и может считаться вторым выбором. IC882 является самым прочным из основных видов твердого сплава для обработки титана. Он предназначен для тяжелого фрезерования, обработки в неблагоприятных условиях, для случаев со значительной ударной нагрузкой и т. д.

Что касается дополнительных сплавов, IC380 хорошо зарекомендовал себя при фрезеровании, когда жесткость технологической системы высока; IC5820 показывает впечатляющие результаты при обработке с подачей охлаждающей жидкости под высоким давлением, предпочтительно точно направленной.

Сравнительные характеристики сплавов в конкретных случаях обработки титана фрезами со сменными пластинами приведены в таблице 4.

**Таблица 4. Производительность твердых сплавов для конкретных фрезерных операций**

Сплав	Сравнительная производительность					
	Тяжелонагруженное резание	Фрезерование с большой подачей (FF)	Охлаждение под высоким давлением*	Неблагоприятные условия	Высокая жесткость системы	Чистовое фрезерование с малой ae**
IC808	◆	◇	◆	◆	◆◆◇	◆◆◆
IC840	◆◆	◆◆	◆◆◇	◆◆	◆◆	◆◆
IC882	◆◆◆	◆◆◆	◆	◆◆◆	◆◆	◆◇
IC380	◆	◆	◆	◆	◆◆◆	◆◆
IC5820	◆◇	◆◇	◆◆◆	◆◇	◆◆◇	◆◆◇
IC830	◆◇	◆◆	◆	◆◆	◆◆	◆◇
IC330	◆◆	◆◆	◆◇	◆◆◇	◆◇	◆

\* подача охлаждающей жидкости под высоким давлением

\*\* ae – ширина резания

## Твердосплавные концевые фрезы (SCEM) и фрезерные головки MULTI-MASTER

Выбор твердых сплавов в линейках SCEM и **MULTI-MASTER** немного ниже по сравнению с фрезами со сменными пластинами. Доступные сплавы являются более универсальными с практической точки зрения и имеют широкую область применения. В таблице 5 приведены рекомендуемые твердые сплавы для обычного и трохойдального фрезерования.

**Таблица 5. Выбор твердых сплавов для SCEM и головок MULTI-MASTER**

Сплавы	Типичные способы фрезерования		Трохоидальное фрезерование	
	1-й выбор	2-й выбор	1-й выбор	2-й выбор
Твердосплавные концевые фрезы	<b>IC300</b>	IC900	<b>IC902</b>	IC903
Головки <b>MULTI-MASTER</b>	<b>IC308</b>	IC908	<b>IC903</b>	-

### Пример

Производственно-технический отдел планирует сравнительные испытания фрез со сменными пластинами для больших подач. Задача заключается во фрезеровании крупной открытой плоской поверхности. Технические специалисты выбрали насадные фрезы ISCAR **MILL4FEED** с пластинами FFQ4 SOMT 120516HP. Пластины изготавливаются из сплавов IC882, IC830, IC5820 и IC808. Решено протестировать два разных сплава. Какой из них следует заказать?

Фрезерование с большой подачей (быстрая подача в терминологии ISCAR) существенно увеличивает нагрузку на зуб. В соответствии с данными о сплавах (Рис. 3) доступные сплавы IC882, IC830, IC5820 и IC808 имеют следующие области применения по ISO: (S20-S30), (S15-S30), (S15-S25) и (S10-S25) соответственно. Увеличение номера после буквы «S» характеризует увеличение прочности. Сплавы IC882 и IC830 подходят для испытаний, и поэтому следует заказывать именно их.

### Пример

Какой твердый сплав для сменных пластин наиболее эффективен для фрезерования с охлаждением под высоким давлением?  
Таблица 4 дает ответ на этот вопрос: IC5820.

#### **Нанослойное PVD покрытие**

*PVD покрытия появились в конце 1980-х годов. Передовые нанотехнологии нанесения PVD-покрытия внесли значительный вклад в преодоление сложных проблем, мешающих прогрессу.*

*Достижения науки и техники создали новый класс износостойких нанослойных покрытий. Эти покрытия представляют собой комбинацию слоев, имеющих толщину до 50 нм (нанометров) и демонстрируют значительное увеличение прочности.*

## Общие рекомендации по фрезерованию титана

При фрезеровании титана производитель старается получить наиболее эффективную комбинацию техники фрезерования и инструмента. Существуют общие рекомендации для успешного преодоления основных трудностей с сохранением приемлемой производительности и стойкости инструмента. Несмотря на то, что технология и инструмент связаны друг с другом, существуют отдельные рекомендации как для технологии, так и для инструмента.

### Техника фрезерования

Техника фрезерования или стратегия фрезерования определяет траекторию движения инструмента и отношение «глубина резания ( $a_p$ ) – ширина резания ( $a_e$ )». При выборе подходящей стратегии обработки учитываются следующие моменты:

1. Вращающаяся фреза контактирует с обработанной деталью по дуге, измеряемой углом зацепления  $AE$  (**рис. 7**). Уменьшение этой дуги (ширины резания  $a_e$ ) сокращает тепловую нагрузку на режущую кромку фрезы. Кроме того, уменьшается промежуток времени, в течение которого кромка участвует в резании, появляется больше времени для ее охлаждения. Меньшее тепловыделение снижает риск закалки титана во время обработки.
2. Из-за вышеупомянутых факторов уменьшение  $a_e$  позволяет увеличить скорость резания  $V_c$ . При фрезеровании полного паза в цельной заготовке со скоростью резания  $V_{c1}$ , ширина резания равна диаметру инструмента  $d$ . По сравнению с этим случаем при фрезеровании квадратного уступа с  $a_e$  менее  $0,1 \times d$  ( $AE \approx 37^\circ$ ) скорость резания может быть увеличена на 150–200% ( $1,5 \dots 2 \times V_{c1}$ ). На **рис. 8** показан примерный график зависимости  $V_c$  от  $AE$  и  $a_e$  при фрезеровании паза в заготовке из Ti-6Al-4V различными методами.

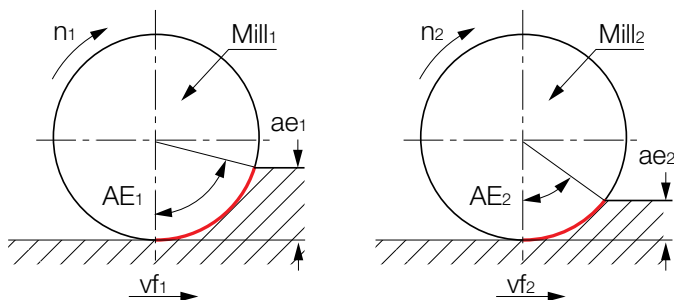


Рис. 7 Дуга контакта и угол зацепления

3. Подход "врезание по дуге" (вкатывание), является предпочтительным (**рис. 9**). Когда фреза входит в обрабатываемый материал по дуге, механические и тепловые нагрузки на режущую кромку растут постепенно, а не внезапно. Такой подход повышает стабильность обработки и увеличивает стойкость инструмента.
4. Сегодня с использованием современных систем CAD / CAM можно создавать траекторию инструмента с практически постоянным углом зацепления. Это предотвращает перегрузку и перегрев инструмента.
5. Когда температура в зоне резания высокая, химическое взаимодействие режущей кромкой с материалом и окисление кромки приводят к образованию проточин. Если фрезерный станок обрабатывает высокий прямоугольный уступ с постоянной глубиной резания за проход, возникновение проточин более вероятно. Вместо резания происходит деформация материала, что приводит к его упрочнению и образованию трещин на поверхности, создаются неблагоприятные условия резания и ухудшается качество поверхности. Таким образом, разная глубина резания при фрезеровании в несколько проходов снижает интенсивное образование проточин и влияние негативных факторов.

6. Значительная удельная сила резания при обработке титановых сплавов, особенно труднообрабатываемых, приводит к высокой нагрузке на режущую кромку. «Пружинистость» титана усиливает вибрации, особенно при черновом фрезеровании с большими припусками. Эффективное резание в таких условиях обеспечивается высокой жесткостью всей технологической системы, а правильная работа, закрепление инструмента и вылет могут иметь решающее значение.
7. При планировании процесса проверьте возможность фрезерования титана, пока он находится в мягком состоянии. Термическая обработка и состаривание делают его очень сложным для обработки.
8. Подача охлаждающей жидкости под высоким давлением может значительно повысить эффективность фрезерования\*.
9. Для фрезерования глубоких карманов и полостей требуется большой вылет инструмента. При планировании операций механической обработки возможной альтернативой является использование нескольких фрез с разными вылетами или нескольких сборок, в которых те же фрезы установлены на оправки различной длины.
10. Фрезерование с большой подачей (HFM) может быть хорошей альтернативой традиционному черновому фрезерованию. HFM подходит для станков с медленным приводом стола, так как скорость подачи при обработке титана значительно ниже, чем значения HFM для стали. Однако для этой альтернативы нужен станок с жестким шпиндельным узлом.

### Трохоидальное фрезерование

Трохоидальное фрезерование - это высокоэффективный метод фрезерования, в котором используются преимущества уменьшения угла зацепления, образование тонкой стружки и врезание по дуге, что приводит к увеличению скорости резания и скорости подачи. При трохойдальном фрезеровании быстро вращающийся инструмент, работающий с большой глубиной резания, движется по дуге и «нарезает» тонкий, но широкий слой материала. Когда слой удаляется, режущая кромка глубже продвигается в материал радиально. Этот метод обеспечивает равномерное зацепление инструмента и стабильную среднюю толщину стружки. Фреза испытывает постоянную нагрузку. Износ инструмента равномерный, срок службы инструмента предсказуемый. Небольшая толщина срезанного материала значительно снижает тепловое воздействие на инструмент, за счет этого можно увеличить количество зубьев. Такой метод обеспечивает высокую скорость съема металла со значительно меньшим энергопотреблением и увеличенным сроком службы инструмента.

Трохоидальное фрезерование очень популярно при изготовлении титановых деталей, например, для чернового и полустогового фрезерования пазов для лопаток и импеллеров.

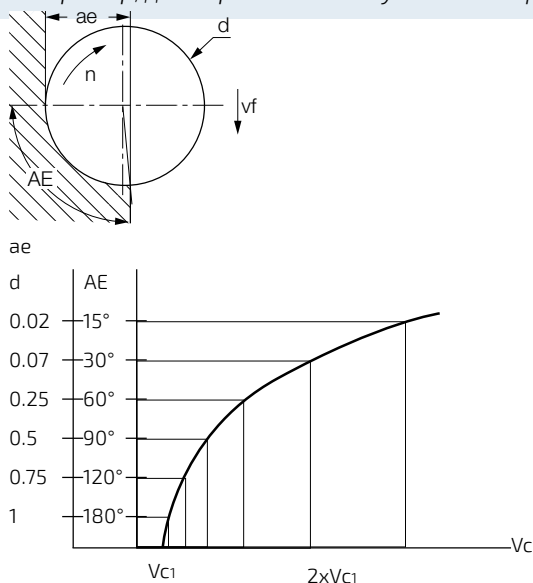


Рис 8 Кривая  $V_c$  против  $AE$  и  $ae$

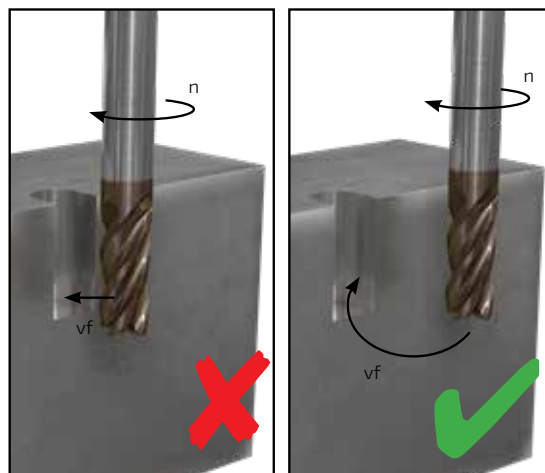


Рис. 9 Прямой вход в материал и вход по дуге («вкатывание»)

\* Преимущества НРС подробно рассмотрены на следующей странице руководства



## Фрезерный инструмент

Очень важно подобрать подходящий инструмент для фрезерования титана. Для этого необходимо рассмотреть следующие особенности: геометрия, материал инструмента и конструкция.

1. Считается, что фрезы для титана имеют геометрию с положительным передним углом и соответствующей подготовкой кромки. Это совершенно верно в отношении коммерчески чистых и простых в обработке сплавов. Однако для фрезерования труднообрабатываемых сплавов нужна усиленная режущая кромка с нейтральной или негативной упрочняющей фаской. На многих черновых операциях (таких, как тяжелая обработка фрезами с наборной режущей кромкой или HFM) инструмент с негативной геометрией может работать с увеличенной подачей и является лучшим выбором.
2. Для фрезерования титана требуется увеличения заднего угла.
3. При использовании фрез с СМП предпочтительны односторонние пластины. Как правило, их производительность выше, по сравнению с двухсторонними. При черновой обработке глубоких боковых стенок лучшим решением являются фрезы с наборной режущей кромкой.
4. Материал и конструкция инструмента должны обеспечивать его остроту и стойкость. В условиях интенсивного тепловыделения тупая кромка увеличивает образование нароста и износ, что приводит к серьезному повреждению инструмента.
5. Обработка титана характеризуется значительным тепловыделением и механической нагрузкой, особенно это касается труднообрабатываемых сплавов. Материал инструмента должен поддерживать правильный баланс между температурной прочностью и ударной прочностью.
6. Для фрезерования титана в основном используются твердые сплавы с покрытием. Покрытие PVD сохраняет остроту кромки лучше, чем CVD. Большинство фрезерных пластин для титана имеет PVD-покрытие. Тем не менее, пластины CVD, которые обычно менее острые, чем PVD, часто работают лучше при черновом фрезеровании.
7. Керамика и кубический нитрид бора (CBN) не очень подходят для обработки титана, хотя поликристаллический алмаз (PCD) хорошо зарекомендовал себя в некоторых случаях чистовой обработки.
8. В большинстве станков сегодня предусмотрена подача охлаждающей жидкости через шпиндель. Применение инструмента с внутренней подачей охлаждающей жидкости через корпус является предпочтительным.
9. Вибрация может быть значительно уменьшена при использовании твердосплавных фрез (SCFM) с виброгасящей геометрией (chatter-free).
10. Точность фрезерования является важным фактором не только для обеспечения требуемых прецизионных размеров. Низкая точность, особенно для фрез малого диаметра, влияет на производительность и уменьшает стойкость инструмента. Например, чрезмерное биение приводит к увеличению нагрузки на зуб, преждевременному износу и перегрузке других зубьев и даже к поломке режущего инструмента. Плохая цилиндричность хвостовика уменьшает эффективную площадь контакта между хвостовиком и инструментальной оснасткой и значительно уменьшает силу закрепления.



## Исходные режимы резания для фрезерования

Как правило, для расчета режимов резания необходимы данные относительно глубины и ширины резания (соответственно  $ap$  и  $ae$ ), скорости резания  $V_c$  и подачи на зуб  $f_z$ . Определение  $ap$  и  $ae$  сильно зависит не только от выбранного метода фрезерования и планирования процесса, но и от характеристик конструкции инструмента, таких как диаметр и максимальная длина режущей кромки. Этот раздел руководства рассматривает оценки  $V_c$  и  $f_z$ .

### Скорость резания

$V_c$  варьируется в широком диапазоне, в зависимости от типа обработки и обрабатываемости конкретного сплава титана. Типовые значения  $V_c$  приведены в таблице 6.

**Таблица 6. Типовая скорость резания  $V_c$  при фрезеровании титана**

Тип обработки	Примеры	Скорость резания $V_c$ , м/мин
Тяжелая (H)	Тяжелая черновая обработка, фрезерование в неблагоприятных условиях	25-60
Средняя (M)	Среднеагруженная черновая обработка, полуступенчатое фрезерование	40-80
Легкая (L)	Чистовое фрезерование, легкое резание	70-120

Более точная оценка начальной скорости  $V_c$  требует простого вычисления по уравнению (1).

$$V_c = V_0 \times K_m \times K_e \times K_s \quad (1)$$

Где :

- $V_0$  – базовая скорость резания
- $K_m$  – коэффициент обрабатываемости
- $K_e$  – коэффициент перекрытия
- $K_s$  – коэффициент стабильности

### Базовая скорость резания $V_0$

Базовая скорость резания  $V_0$  зависит от материала инструмента. В таблице 7 приведены значения  $V_0$  для твердых сплавов, которые используются на сменных пластинах, а в таблице 8 указаны значения  $V_0$  для твердых сплавов головок SCFM и MULTI-MASTER.

### Коэффициент обрабатываемости $K_m$

Коэффициент обрабатываемости  $K_m$  отражает разницу в обрабатываемости марок титана. Это производное значение обрабатываемости (таблица 3, **рис. 2**).  $K_m$  показан в таблице 9.

### Коэффициент перекрытия $K_e$

Уменьшение угла зацепления  $AE$  (то есть ширины резания  $ae$ ) позволяет увеличить скорость резания  $V_c$  (**рис. 8**). В таблице 10 приведены соответствующие значения  $K_e$  для корректировки.

### Коэффициент стабильности $K_s$

Коэффициент стабильности  $K_s$  определяется приведенной ниже оценкой стабильности фрезерования:

- $K_s=1$  при нормальной стабильности
- $K_s=0.7-0.8$  для нестабильных операций (большой вылет, плохое закрепление инструмента, фрезерование тонких стенок и т. д.) и фрезерования в неблагоприятных условиях.

**Обработка в неблагоприятных или нестабильных условиях? Тяжелая или тяжелонагруженная обработка?**

«Обработка в неблагоприятных или нестабильных условиях» – что правильно? Значение этих двух определений иногда сбивает с толку. К «неблагоприятным условиям» относятся следующие примеры: заготовка с коркой, меняющийся припуск на обработку (материал, подлежащий удалению), которые приводят к изменению глубины резания, значительной динамической нагрузке, работе по высокоабразивной поверхности, вибрациям.

«Нестабильные условия» характеризуют низкую стабильность всей системы (системы СПИД), вызванную плохим закреплением инструмента и / или заготовки, нежестким станком, большим вылетом инструмента, тонкостенной заготовкой и т. д. Несмотря на то, что это два отдельных понятия, оба типа условий находятся в причинно-следственной связи: например, низкая жесткость способствует увеличению вибраций и, следовательно, ухудшает условия резания. Поэтому в некоторых случаях приведенные выше определения рассматриваются как синонимы.

Тяжелая или тяжелонагруженная обработка? «Тяжелонагруженная» означает значительную механическую и термическую нагрузку на технологическую систему и ее отдельные компоненты, включая режущий инструмент, ввиду снятия большого припуска, наличия критических данных для расчета режимов резания и т. д. Термин «тяжелая» используется в отношении обработки крупных и тяжелых деталей на мощных станках. Так, «тяжелонагруженная» указывает на режим обработки, степень нагрузки на инструмент; а «тяжелая» используется больше для определения размеров обрабатываемых деталей и инструмента. Обратите внимание, что малогабаритный режущий инструмент может работать в «тяжелонагруженных» циклах при чрезвычайно высокой нагрузке.

«Золотое правило» для инженера, планирующего процесс обработки, и станочника гласит: «Избегайте тяжелонагруженной обработки в неблагоприятных условиях, особенно если ваша технологическая система нестабильна!» Это справедливо для всех отраслей металлообработки, которые имеют отношение к тяжелой промышленности.

**Таблица 7. Базовая скорость резания  $V_0$  для фрез со сменными пластинами**

Тип обработки	$V_0$ для твердого сплава, м/мин						
	Основные сплавы			Дополнительные сплавы			
	IC808 / IC908	IC840	IC882	IC5820	IC380	IC830 / IC928	IC330 / IC328
Тяжелая (H)	43	43	38	43	40	40	38
Средняя (M)	53	48	43	48	45	45	43
Легкая (L)	65	60	50	60	55	55	50

**Таблица 8. Базовая скорость резания  $V_0$  для монолитных фрез и головок MULTI-MASTER**

Тип обработки	$V_0$ для твердого сплава, м/мин			
	Основные сплавы		Дополнительные сплавы	
	IC900 / IC908	IC300 / IC308	IC902*	IC903*
Тяжелая (H)	43	40	-	-
Средняя (M)	53	45	65	58
Легкая (L)	65	55	75	70

\* Сплавы рекомендуются только для высокоскоростного фрезерования по трохоиде

**Таблица 9. Коэффициент обрабатываемости  $K_m$  для сплавов на основе титана**

Группа	Типичные представители			Коэфф. обрабатываемости $K_m$
	Обозначение	Состояние*	Твердость	
Чистый титан	Сплав 2		HB 150-200	1.70
А-и псевдо- $\alpha$ титан	Ti-5Al-2.5Sn	ELI	HRC 31-34	1.25
	Ti-5Al-2.5Sn	A	HRC 31-34	1.15
	Ti-8Al-1Mo-1V	DA	HRC 34-36	1.10
А- $\beta$ -титан	Ti-6Al-4V	ELI	HRC 30-35	1.10
	Ti-6Al-4v	A	HRC 32-36	1.00
	Ti-8V-5Fe-1Al	A	HRC 34-38	0.97
	Ti-6Al-4V	STA	HRC 39-41	0.90
В-и псевдо- $\beta$ титан	Ti-5Al-5Mo-5V3Cr	BASCA	HRC 34-36	0.57
	Ti-10V-2Fe-4Al	STA	HRC 35-42	0.56
	Ti-13V-11Cr-3Al	A	HRC 39-41	0.53
	Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr	STA	HRC 36-44	0.51

\* А - отожженный, BASCA - бета отожженный, медленно охлажденный и состаренный DA - двойной отжиг, ELI - ультрамелкозернистый, STA - термообработка на твердый раствор и старение

**Таблица 10. Коэффициент перекрытия  $K_e$** 

Ae/d	1.00	0.93	0.75	0.5	0.37	0.25	0.12	0.10	0.07
AE	180°	150°	120°	90°	75°	60°	40.5°	36°	30°
Ke	0.80	0.90	0.95	1.00	1.05	1.20	1.30	1.50	1.80

### Пример

Определить скорость резания для фрезерования плоскости фрезой **DOVEIQMILL** со сменными пластинами из сплава IC840.

Диаметр фрезы составляет 100 мм, установленная ширина резания составляет 70 мм, а глубина резания 2,5 мм. Материал заготовки Ti-6Al-4V, отожженный.

Предположим, что стабильность достаточна (фрезерование плоскости фрезой относительно большого диаметра, короткий вылет, хорошее состояние станка, надежное закрепление заготовки), тип обработки – средний (ар 2,5 мм).

1. Приблизительный подсчет с использованием таблицы б): начальная скорость  $V_c = 60$  м/мин
2. Более точные расчеты с использованием уравнения (1):  
 $V_o = 48$  м/мин,  $K_m = 1$ ,  $K_e \approx 0.96$  (Таблицы 7, 9, 10),  $K_s = 1$ .  $V_c = 48 \times 1 \times 0.96 \times 1 = 46$  м/мин

Расхождения в полученных результатах значительны: в результате приблизительного подсчета скорость резания завышена на 30%.

### Пример

При планировании процесса технолог рассматривает насадную фрезу с наборной режущей кромкой диаметром 80 мм) для черновой обработки высокого уступа. Материал заготовки – «Титан 555» (Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr), HRC 39-41. Режимы: ар = 85 мм, ае = 20 мм, внутренняя подача охлаждающей жидкости. Сплав пластин – IC882. Операция выполняется на новом станке с жестким закреплением заготовки, и, несмотря на относительно большой вылет фрезы, стабильность нормальная. Какую  $V_c$  следует выбрать для дальнейшего расчета и анализа? Предположим, что обработка тяжелая, применим данные из таблиц 7, 9 и 10:

$V_o = 38$  м/мин,  $K_m = 0.51$ ,  $K_e = 1.2$  (ae/d=0.25).  $K_s = 1$ .

$V_c = 38 \times 0.51 \times 1.2 \times 1 = 23$  м/мин

Приблизительный подсчет с использованием таблицы б) (нижний предел скорости для тяжелой черновой обработки) дает 25 м/мин.



Плохая обрабатываемость некоторых сплавов является серьезным препятствием для повышения производительности чернового фрезерования. Чтобы преодолеть эту проблему в промышленности используются прогрессивные методы обработки, такие как высокоскоростное фрезерование (HSM), фрезерование с большой подачей (HFM) и обработка с подачей охлаждающей жидкости под высоким давлением (HPC).

### Пример

Для полуставового трохоидального фрезерования пазов в диске с лопатками из отожженного Ti-6Al-4V используется 7-зубая твердосплавная концевая фреза (SCFM) диаметром 10 мм со следующими режимами:

$a_p=40$  мм,  $a_e=0.8$  мм.

SCFM изготовлена из сплава IC902. Оцените начальную скорость  $V_c$ .

Операция может рассматриваться как легкое резание.

В соответствии с данными в таблицах 8-10:

$V_0=75$  м/мин,  $K_m=1$ ,  $K_e \approx 1.8$  ( $a_e/d=0.08$ ).

$K_s=1$ .  $V_c=75 \times 1 \times 1.8 \times 1=135$  м/мин

### Подача на зуб

Скорость резания  $V_c$ , подача на зуб  $f_z$  – ключевые параметры фрезерования.  $f_z$  отражает в основном механическую и тепловую нагрузку на зуб фрезы. При увеличении  $f_z$  стружка становится толще, что влияет на ее способность отводить тепло из зоны резания и вызывает увеличение сил резания. Однако серьезное уменьшение  $f_z$  приводит к получению слишком тонкой стружки, ухудшается процесс резания и значительно сокращается стойкость инструмента. Следовательно, выбор подачи на зуб должен обеспечить соответствующую толщину стружки, а поддержание одинаковой толщины стружки во время процесса резания – формула хорошей производительности. В то время как современные системы CAD / CAM могут программировать траекторию инструмента, которая поддерживает постоянную толщину стружки, работа с подачей на зуб проще для понимания и более практична, поэтому занимающимся обработкой металла необходима эта информация.

При фрезеровании стружка имеет сложную форму переменной толщины, которая изменяется от минимальной до максимальной. Средняя толщина стружки  $h_m$  используется для характеристики резания, инженерных расчетов и выбора  $f_z$ . Существует математическая зависимость между средней толщиной стружки, подачей на зуб, шириной резания и диаметром инструмента –  $h_m$  можно рассматривать как функцию от  $f_z$  и наоборот. Средняя толщина стружки является расчетной величиной, но эта особенность не уменьшает ее важности:  $h_m$  характеризует механическую нагрузку на фрезу и станок; в опытных руках это один из ключевых параметров для оценки производительности фрезерования.

Различные источники технической информации рекомендуют следующее уравнение для приблизительного расчета  $h_m$ , если главный угол в плане составляет  $90^\circ$ :

$$h_m = f_z \times \sqrt{a_e/d} \quad (2)$$

$$f_z = h_m \times \sqrt{d/a_e} \quad (2a)$$

Уравнение 2 легко использовать в условиях цеха, оно дает хорошие результаты, которые подходят для определения  $h_m$  при периферийном фрезеровании (обработка цилиндрической фрезой, концевой фрезой  $90^\circ$  – **Рис. 11**) и одной разновидности фрезерования плоскости  $90^\circ$ . (**Рис. 12**). В некоторых случаях оно может быть применено для фрезерования пазов и канавок дисковой фрезой. При других обстоятельствах уравнение для вычисления средней толщины стружки отличается. В таблицах 11 и 12 приведены сводные данные для определения  $h_m$  и максимальной толщины стружки  $h_{max}$ , которые подходят для быстрых расчетов в заводских условиях.

Существуют различные методы расчета средней и максимальной толщины стружки при фрезеровании, например, арифметический, взвешенный, нахождение площади поперечного сечения предположительно недеформированной стружки и ее замена простым прямоугольным, но наиболее распространенным методом является расчет средней толщины стружки по отношению к половине угла зацепления  $AE$  (Рис 10).

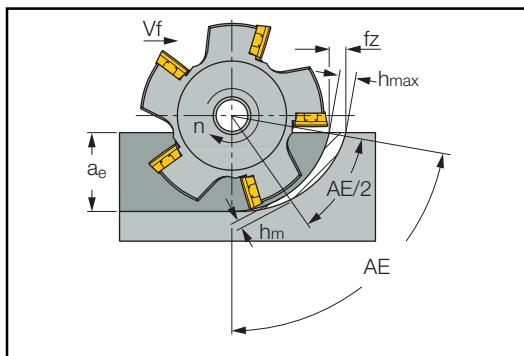


Рис. 10 Средняя ( $h_m$ ) и максимальная ( $h_{max}$ ) толщина стружки при фрезеровании

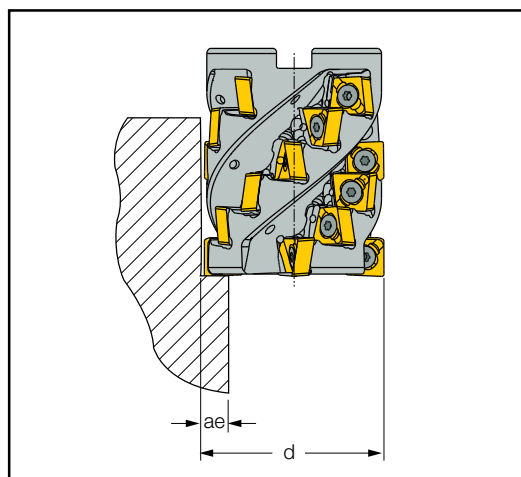
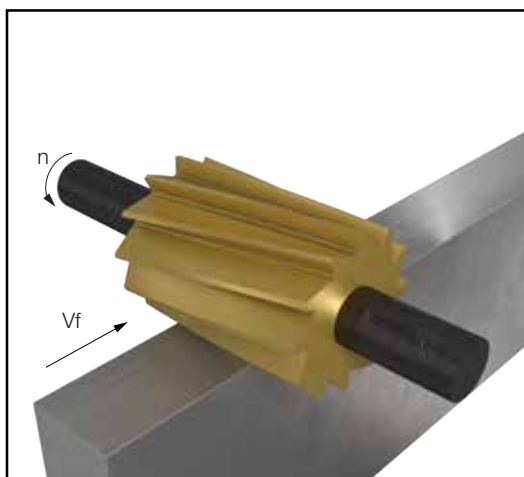


Рис. 11 Обработка цилиндрической фрезой и фрезерование высоких уступов

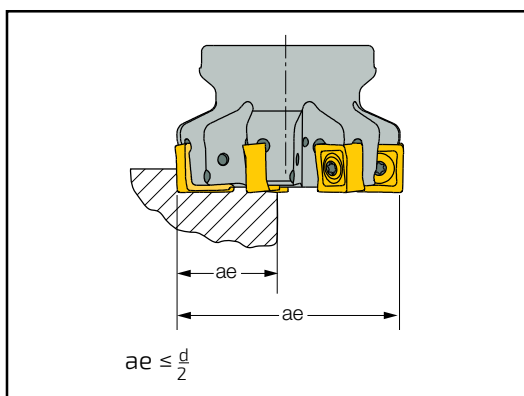


Рис 12 Фрезерование плоскости с шириной резания не превышающей радиуса фрезы

**Таблица 11. Расчет толщины стружки при периферийном фрезеровании**

Условия	Рисунок		Hm, hmax
	Пример	Положение инструмента	
$AE \leq 90^\circ$ $(ae \leq d/2)$	Рис. 10		$hm = fz \sqrt{ae/d}$ $h_{max} = fz \sin AE$ $h_{max} = 2 \cdot fz \sqrt{ae \cdot d - ae^2} / d$
$AE > 90^\circ$ $(ae > d/2)$			<b>1-ый метод</b> $hm = fz \times \sin(AE/2)$ $h_{max} = fz$ <b>2-ой метод</b> $hm = fz \times [\sqrt{2}/2 + \cos((AE - 90^\circ)/2)]$ $h_{max} = fz$

\*также подходит для фрезерования пазов дисковыми фрезами

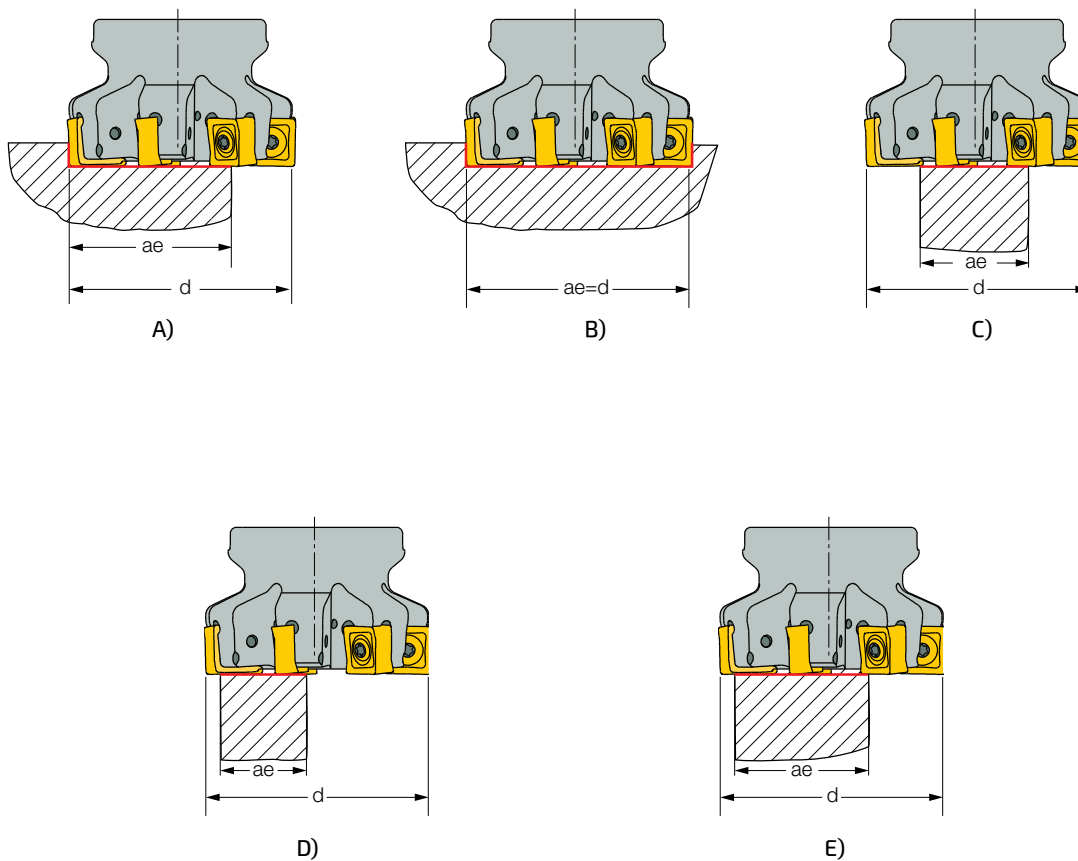
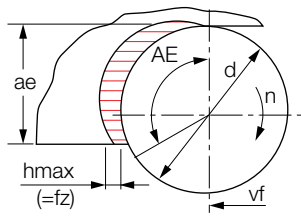
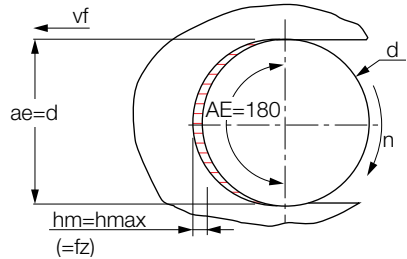
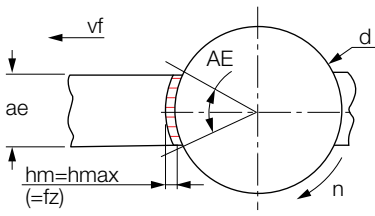
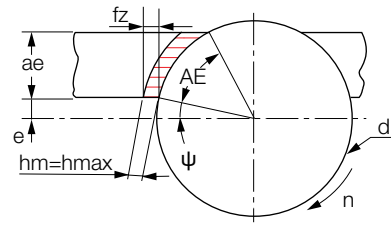
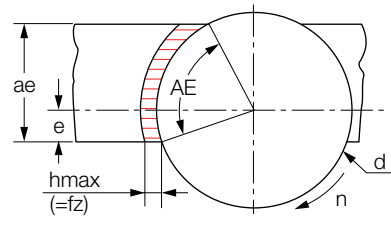


Рис. 13 Фрезерование плоскости  $90^\circ$

Таблица 12. Расчет толщины стружки при фрезеровании плоскости

Пример	Положение инструмента	$h_m, h_{max}$
Рис. 13 Случай а)		1-й метод $h_m = fz \times \sin(AE/2)$ $h_{max} = fz$  2-й метод $h_m = fz \times 2 \times (\sqrt{2}/2 + \cos(AE - 90^\circ))/2$ $h_{max} = fz$
Рис. 13 Случай б)		$h_m = h_{max} = fz$
Рис. 13 Случай с)*		$h_m = h_{max} = fz$
Рис. 13 Случай д)		$h_m = fz \times \cos(\psi + AE/2)$ $h_{max} = fz \times \cos \psi$
Рис. 13 Случай е)		1-й метод $h_m = fz \times \sin(AE/2)$ $h_{max} = fz$  2-й метод $h_m = h_{max} = fz$

\* Неблагоприятные условия фрезерования – по возможности следует избегать такого положения инструмента

## Пример

В соответствии с технологией производства торцевая фреза с диаметром 100 мм обрабатывает открытую плоскость. Ширина плоскости 75 мм. Какая подача на зуб должна быть установлена для обеспечения средней толщины стружки 0,1 мм?

Ссылаясь на таблицу 12 и рис. 13, случай а),  $hm=fz \times \sin(AE/2)$   $fz=hm/\sin(AE/2)$ .  
Угол зацепления  $AE=90^\circ+\arcsin((ae-r)/r)$ , где  $r=d/2$  – радиус торцевой фрезы.  
 $AE=90^\circ+\arcsin((75-50)/50)=120^\circ$ ,  $AE/2=60^\circ$  and  $fz=0.1/\sin 60^\circ=0.11$  (мм/зуб).

## Пример

Черновая обработка высокого прямоугольного уступа в заготовке из титана производится фрезой с наборной режущей кромкой диаметром 80 мм с режимами:

$ae=20$  мм,

$fz=0.2$  мм/зуб

Определите параметры стружки.

С применением данных из таблицы 11 и **рис. 11**:

- средняя толщина стружки  $hm=fz \times \sqrt{ae/d}=0.2 \times \sqrt{(20/80)}=0.1$  (мм),

- максимальная толщина стружки

$h_{max}=2 \times fz \times \sqrt{(d \times ae - ae^2)}/d=2 \times 0.2 \times \sqrt{(80 \times 20 - 20^2)}/80=0.17$  (мм).

### Радиальное утонение стружки

Согласно примерам, рассчитанные значения средней  $hm$  и максимальной толщины стружки  $h_{max}$  ниже, чем подача на зуб  $fz$ . При рассмотрении таблиц 11 и 12 можно сделать один вывод: если ширина (радиальная глубина) резания  $ae$  при периферийном фрезеровании и фрезеровании плоскости (случаи а) и d)) меньше радиуса фрезы,  $h_{max}$  становится ниже  $fz$ . Уменьшение  $ae$  приводит к уменьшению  $h_{max}$  и, соответственно,  $hm$ . Этот эффект известен как «радиальное утонение стружки», его очень важно учитывать, особенно при фрезеровании титана, отличающегося интенсивным выделением тепла. Стружка передает большую часть тепла, поэтому она должна быть достаточно толстой и крупной, чтобы сохранять и отводить тепло. Поддержание подачи на зуб на одном уровне должно обеспечить требуемую толщину стружки и избежать ее критического утонения. Понимание этого эффекта является ключевым элементом правильно программирования  $fz$ .

В таблицах 13 и 14 приведены вспомогательные данные, которые помогут в быстром расчете толщины стружки для распространенных случаев фрезерования:

- Таблица 13 – для периферийного фрезерования, когда  $AE < 90^\circ$  (или  $ae < d/2$ ),

- Таблица 14 – для торцевого и периферийного фрезерования при  $AE > 90^\circ$  ( $ae > d/2$ ).

Следующие формулы могут быть полезны для оценки  $AE$  при периферийном фрезеровании с  $ae < d/2$ :

$$AE = \arcsin(2 \times \sqrt{c - c^2}) \quad (3)$$

и

$$AE = \arccos(1 - 2 \times c) \quad (3a)$$

где  $c = ae/d$  – отношение ширины резания к номинальному диаметру инструмента  $d$ .

**Таблица 13. Вспомогательные данные для периферийного фрезерования при  $AE < 90^\circ$**

$Ae/d$	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
$\sqrt{ae/d}$	0.224	0.316	0.387	0.447	0.5	0.547	0.591	0.632	0.67
$\sin AE$	0.436	0.6	0.714	0.8	0.866	0.916	0.954	0.98	0.995
$AE$	25.8°	36°	45.6°	53°	60°	66.4°	72.5°	78.5°	84.3°

**Табл 14** Вспомогательные данные для фрезерования плоскости и периферийного фрезерования при  $AE < 90^\circ$ 

Ae/d	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95
AE	95.7°	107.5°	120°	134.4°	154°
AE/2	47.8°	53.7°	60°	67.2°	77°
Sin (AE/2)	0.741	0.806	0.866	0.921	0.974

**Пример**

Определите толщину стружки при фрезеровании высокого прямоугольного уступа фрезой с наборной режущей кромкой диаметром 80 мм учитывая следующие данные:

- ширина резания  $ae = 60$  мм,
- подача  $fz = 0,15$  мм/зуб.

На основании **Рис. 13**, случай а) и таблицы 12 средняя толщина стружки  $hm = fz \times \sin(AE / 2)$  и  $h_{max} = fz$ .

При  $ae/d = 60/80 = 0,75$ , из таблицы 14  $AE = 120^\circ$  и  $\sin(AE / 2) = 0,866$ .

Итак,  $hm = 0,15 \times 0,866 = 0,13$  (мм) и  $h_{max} = 0,15$  мм.

Примечание. Оценка  $hm$  с использованием 2-го метода (таблица 12) дает следующий результат:

$$hm = fz / 2 \times [\sqrt{2} / 2 + \cos((AE - 90^\circ) / 2)]$$

$$= 0,15 / 2 \times (\sqrt{2} / 2 + \cos 15^\circ) = 0,125 \text{ (мм)}$$

Примечание. Оценка с использованием 2-го метода (таблица 12) дает следующий результат:

$$hm = 0,006 / 2 \times (\sqrt{2} / 2 + \cos 15^\circ) = 0,005 \text{ (in)}$$

**Примеры нестабильных, тяжелых и тяжелонагруженных условий**

Термины можно объяснить аналогиями из повседневной жизни:

*Представьте, что едете по серпантину с одной полосой, дорога покрыта камнями и ямами – очевидно, что вы едете в неблагоприятных условиях.*

*Если вы едете в машине с двумя велосипедами, закрепленными на крыше – вы едете в нестабильных условиях.*

*Большой грузовик, перевозящий гусеничный экскаватор – пример тяжелого транспортного средства.*

*Если водитель легкового пикапа, который загружен на максимальную мощность, решит обогнать грузовик, мотор пикапа будет работать в тяжелонагруженных условиях.*

☛ Если угол в плане фрезерного инструмента не равен  $90^\circ$  (**Рис. 14**), уравнения (2) и (2а) изменяются следующим образом:

$$hm = fz \times \sqrt{(ae/d)} \times \sin \chi \quad (4)$$

и

$$fz = hm \times \sqrt{(d/ae)} \times 1 / \sin \chi \quad (4a)$$

соответственно

где  $\chi$  – угол в плане

Таким же образом угол в плане должен учитываться при расчете  $hm$  и  $h_{max}$  с использованием уравнений из таблиц 11 и 12.



## Пример

Технолог испытывает торцевую фрезу IQ845 FSY D125-09-40-R07 с пластинами IQ845 SYHU 0704ADN-ММ 808 для обработки плоскости титановой заготовки. В каталоге указан диапазон подач для пластины: 0,15-0,3 мм/зуб, а угол в плане – 50°. Диаметр инструмента составляет 125 мм.

При какой подаче фреза должна обеспечить среднюю толщину стружки 0,12-0,15 мм, если глубина и ширина резания составляют 3,5 и 100 мм?

При использовании уравнения (4а) подача на зуб для  $a_e = 100$  мм будет  $0,12 \times \sqrt{125/100} \times 1 / \sin 50^\circ = 0,18$  (мм/зуб) и  $0,15 \times \sqrt{125/100} \times 1 / \sin 50^\circ = 0,22$  (мм/зуб) для средней толщины стружки 0,12 и 0,15 мм соответственно.

Следовательно, для максимальной производительности можно рекомендовать подачу 0,2 мм/зуб с возможным увеличением до 0,22 мм/зуб.

Примечание. В расчетах, не учитывающих толщину стружки в качестве важного фактора при настройке правильных режимов, подача на зуб определяется следующим образом: требуемый  $h_m$  в среднем равен  $(0,12 + 0,15) / 2 = 0,135$  (мм), если рассматривать найденное значение как  $h_{max}$ ,  $f_z = h_{max} / \sin 50^\circ = 0,135 / \sin 50^\circ = 0,176 \approx 0,18$  (мм/зуб).

В качестве альтернативы можно рассчитать  $f_z$ , беря в расчет 0,15 мм в качестве  $h_{max}$ :  $f_z = 0,15 / \sin 50^\circ = 0,195 \approx 0,2$  (мм/зуб).

Сравнение этих результатов с найденными ранее значениями показывает, что рассмотрение толщины стружки как функции от  $a_e$  дает более точные данные и обеспечивает лучшую производительность. Другой упрощенный способ настройки подачи – взять среднее значение из заявленного диапазона подачи. В примере это будет  $(0,15 + 0,3) / 2 = 0,22$  (мм/зуб). В нашем случае подача равна  $f_z$ , которая была найдена для  $h_m = 0,15$  мм, если  $a_e = 100$  мм. Если  $a_e = 80$  мм, для толщины стружки 0,15 мм подача должна составлять уже 0,24 мм/зуб, что примерно на 10% больше, чем среднее значение из диапазона подач.

В качестве альтернативы, вместо значений подачи как функции от толщины стружки производители режущего инструмента часто предоставляют данные о рекомендуемых значениях подачи в виде диаграммы, которая графически определяет ограниченную область применения (**Рис. 14**). На диаграмме отражен диапазон возможных подач от минимального ( $f_{zmin}$ ) до предельного значения в зависимости от данных о режимах резания (обычно глубина и ширина резания). Если, как на **рис. 14**, параметром является отношение рабочей глубины резания  $a_r$  к максимальной глубине резания  $a_{rmax}$ , начальная подача при  $a_e = (0,6 \dots 0,8) \times d$  может быть просто найдена с использованием проверенного правила: значение подачи – это максимальная подача, соответствующая соотношению на графике.

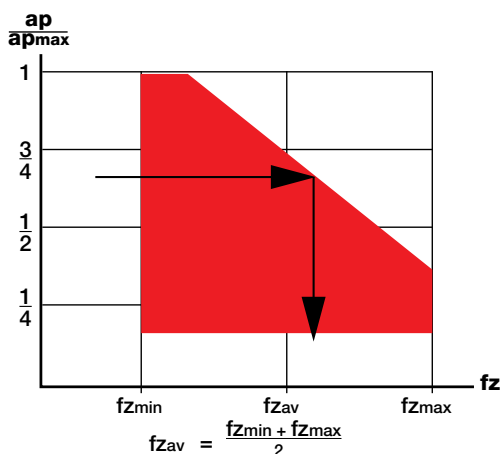


Рис. 14 Диапазон подач при фрезеровании плоскости для  $a_e = (0,6 \dots 0,8) \times d$

## Пример

Найдите подачу для предыдущего примера, если диапазон подач указан на **Рис. 14**, где  $fz_{\min}=0.15$  мм/зуб and  $fz_{\max}=0.3$  мм/зуб.

$ap_{\max}=4.6$  мм – согласно каталогу,  $ap/ap_{\max}=3.5/4.6=0.76$ . Согласно **Рис. 14**, среднее арифметическое значение подачи  $fz_{av}$  может рассматриваться как предельное значение, которое соответствует вышеуказанному соотношению.

Следуя нашему проверенному правилу начальная подача, которая была выбрана в качестве среднего арифметического значения, составит 0,225 мм/зуб.

В показанном примере применение проверенного правила дало результат, который может быть принят с некоторым запасом. Полученное значение примерно на 10% больше, чем подача, которая была найдена с использованием расчетов толщины стружки, проведенных ранее.

*При поиске начальных значений подачи эмпирические правила привели к приемлемым результатам в относительно ограниченном числе случаев. Однако расчет подачи с использованием требуемой толщины стружки является более точным и, следовательно, предпочтительным, особенно потому, что этот расчет прост.*

Начальное значение подачи  $fz$  можно определить несколькими способами.

Для приблизительных оценок достаточно указать  $fz$  в качестве среднего значения в диапазоне подачи из каталога, с использованием практических правил, таких как приведенный выше пример, или собственный опыт. Более точный и менее сложный метод требует учета коэффициента толщины стружки.

☛ В любом случае максимальная толщина стружки  $h_{\max}$  не должна превышать максимальную подачу  $fz_{\max}$ , указанную для рассматриваемых пластин, твердосплавных концевых фрез или головок **MULTI-MASTER**.



## Периферийное фрезерование

В таблице 15 представлены усредненные значения базовой подачи на зуб  $f_{zo}$  и соответствующие параметры толщины стружки ( $h_m$ ,  $h_{max}$ ), в зависимости от соотношения между  $a_e$  и  $d$  и сплавом инструмента со сменными пластинами, а в таблице 16 – для твердосплавных концевых фрез и **MULTI-MASTER**.

Начальная подача на зуб  $f_z$  определяется следующими уравнениями: для фрез со сменными пластинами  $90^\circ$

$$f_z = f_{zo} \times K_s \quad (5)$$

– для  $90^\circ$  SCEM и головок **MULTI-MASTER**

$$f_z = f_{zo} \times K_s \times K_f \quad (6)$$

Где:  $f_{zo}$  – базовая подача на зуб  
 $K_s$  – коэффициент стабильности  
 $K_f$  – коэффициент прочности зуба (Таблица 17)

Коэффициент стабильности:

- $K_s=1$  при нормальной стабильности
- $K_s=0.8-0.85$  для нестабильных операций (большой вылет, плохое закрепление инструмента, фрезерование тонких стенок и т. д.) и фрезерования в неблагоприятных условиях.

## Пример

Производитель рассматривает головку **MULTI-MASTER** диаметром 20 мм из сплава IC308 для фрезерования прямоугольного уступа. Уступ имеет глубину 9,5 мм и ширину 5 мм. Стабильность достаточна.

Какую начальную подачу на зуб  $f_z$  следует установить?

$a_e/d=5/20=0.25$ .  $f_{zo}=0.085$  мм/зуб  
 (Таблица 16),  $K_f=0.94$  (Таблица 17). Допустим,  $K_s = 1$ .  
 $f_z=0.085 \times 0.94 \times 1=0.08$  (мм/зуб).

Средняя толщина стружки в этом случае будет  $0.042 \times 0.94=0.04$  (мм), а максимальная толщина стружки –  $0.073 \times 0.94=0.068$  (мм).

**Таблица 15. Базовая подача на зуб  $f_z$  и толщина стружки для периферийного фрезерования, для фрез со сменными пластинами**

Ae/d (%)	AE	Параметры	Fzo, мм/зуб, hm и hmax, мм, для твердосплавных пластин									
			Основные сплавы					Дополнительные сплавы				
			IC808 IC908	IC840	IC882	IC5820	IC380	IC830 IC928	IC330 IC328			
0.05 (5%)	25.8°	hm	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	
		hmax	0.11	0.11	0.13	0.11	0.1	0.13	0.13	0.13	0.13	
0.1 (10%)	36°	Fzo	0.26	0.26	0.3	0.26	0.22	0.3	0.22	0.22	0.3	
		Hm	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	
0.15 (15%)	45.6°	Hmax	0.11	0.11	0.13	0.11	0.09	0.13	0.13	0.13	0.13	
		Fzo	0.16	0.16	0.18	0.16	0.13	0.18	0.13	0.18	0.18	
0.2 (20%)	53°	Hm	0.067	0.067	0.076	0.067	0.056	0.076	0.056	0.076	0.076	
		Hmax	0.12	0.12	0.13	0.12	0.09	0.13	0.09	0.13	0.13	
0.25 (25%)	60°	Fzo	0.15	0.15	0.17	0.15	0.125	0.17	0.125	0.17	0.17	
		Hm	0.07	0.07	0.08	0.07	0.06	0.08	0.06	0.08	0.08	
0.3 (30%)	66.4°	Hmax	0.12	0.12	0.14	0.12	0.1	0.14	0.1	0.14	0.14	
		Fzo	0.14	0.14	0.16	0.14	0.12	0.16	0.12	0.16	0.16	
0.4 (40%)	78.5°	Hm	0.07	0.07	0.08	0.07	0.06	0.08	0.06	0.08	0.08	
		Hmax	0.12	0.12	0.127	0.12	0.1	0.127	0.1	0.127	0.127	
0.5 (50%)	90°	Fzo	0.127	0.127	0.14	0.127	0.11	0.14	0.11	0.14	0.14	
		Hm	0.07	0.07	0.08	0.07	0.06	0.08	0.06	0.08	0.08	
0.75 (75%)	120°	Hmax	0.108	0.108	0.122	0.108	0.098	0.122	0.098	0.122	0.122	
		Fzo	0.11	0.11	0.125	0.11	0.1	0.125	0.1	0.125	0.125	
1 (100%)	180°	Hm	0.075	0.075	0.088	0.075	0.065	0.088	0.065	0.088	0.088	
		Hmax	0.11	0.11	0.125	0.11	0.09	0.125	0.09	0.125	0.125	
1 (100%)	180°	Fzo	0.11	0.11	0.125	0.11	0.09	0.125	0.09	0.125	0.125	
		Hm	0.095	0.095	0.11	0.095	0.078	0.11	0.078	0.11	0.11	
1 (100%)	180°	Hmax	0.11	0.11	0.125	0.11	0.09	0.125	0.09	0.125	0.125	
		Fzo	0.11	0.11	0.125	0.11	0.09	0.125	0.09	0.125	0.125	
1 (100%)	180°	Hm	0.1	0.1	0.11	0.1	0.09	0.11	0.09	0.11	0.11	
		Hmax	0.1	0.1	0.11	0.1	0.09	0.11	0.09	0.11	0.11	
1 (100%)	180°	Fzo	0.1	0.1	0.11	0.1	0.09	0.11	0.09	0.11	0.11	
		Hm	0.1	0.1	0.11	0.1	0.09	0.11	0.09	0.11	0.11	

**На заметку: бета-титан ( $\beta$ )**

Неправильное толкование может привести к серьезным недоразумениям и даже неправильным решениям. Во многих случаях «бета-титан», свободно используемый в производстве, означает не  $\beta$ -сплавы, а  $\beta$ -(бета-) отожженные  $\alpha$ - $\beta$ -сплавы, в частности для «универсального» Ti-6Al-4V.

**Таблица 16. Базовая подача на зуб  $f_{z0}$  и толщина стружки для периферийного фрезерования SCEM и головками MULTI-MASTER**

Ae/d (%)	AE	Параметры	Fzo, мм/зуб, hm и hmax, мм, Для монолитных SCEM и головок			
			Основные сплавы		Дополнительные сплавы	
			IC900 IC908	IC300 IC308	IC902*	IC903*
0.03 (3%)	19.9°	hm	0.04	0.042	0.035	0.037
		hmax	0.078	0.083	0.068	0.073
		fzo	0.23	0.245	0.2	0.215
0.05 (5%)	25.8°	hm	0.04	0.041	0.035	0.037
		hmax	0.078	0.08	0.067	0.072
		fzo	0.18	0.185	0.155	0.165
0.1 (10%)	36°	hm	0.041	0.042	0.036	0.038
		hmax	0.076	0.078	0.067	0.07
		fzo	0.13	0.133	0.115	0.12
0.15 (15%)	45.6°	hm	0.04	0.043	0.035	0.037
		hmax	0.075	0.078	0.065	0.068
		fzo	0.105	0.11	0.091	0.095
0.2 (20%)	53°	hm	0.04	0.041	0.036	0.038
		hmax	0.07	0.074	0.064	0.067
		fzo	0.09	0.093	0.08	0.084
0.25 (25%)	60°	hm	0.04	0.042	0.036	0.038
		hmax	0.07	0.073	0.063	0.066
		fzo	0.081	0.085	0.073	0.076
0.3 (30%)	66.4°	hm	0.04	0.043	0.036	0.038
		hmax	0.068	0.071	0.06	0.063
		fzo	0.073	0.078	0.065	0.069
0.4 (40%)	78.5°	hm	0.04	0.043		
		hmax	0.063	0.067		
		fzo	0.064	0.068		
0.5 (50%)	90°	hm	0.04	0.042		
		hmax	0.057	0.06		
		fzo	0.057	0.06		
0.75 (75%)	120°	hm	0.049	0.052		
		hmax	0.057	0.06		
		fzo	0.057	0.06		
1 (100%)	180°	hm	0.057	0.06		
		hmax	0.057	0.06		
		fzo	0.057	0.06		

\* Сплавы рекомендуются в основном для HSM метода трохoidalного фрезерования и чистового фрезерования.

**Таблица 17. Коэффициент прочности зуба Kf для SCEM и головок MULTI-MASTER**

Номинальный диаметр D	Mm	24 < d ≤ 32	19 < d ≤ 24	14 < d ≤ 19	9 < d ≤ 14	d ≤ 9
		Kf	1	0.94	0.88	0.78

### Пример

Производитель реактивных двигателей планирует использовать 7 твердосплавных концевых фрез ISCAR диаметром 12 мм для обработки пазов в титановых роторах (дисках с лопатками) методом трохойдального фрезерования. Марка титана Ti-6Al-4V, HRC 33-35. При фрезеровании пазов ширина резания составляет 1-1,2 мм, глубина резания варьируется. Выбранные концевые фрезы изготовлены из сплава IC902. Станки, предназначенные для этой операции, находятся в хорошем состоянии, а жесткость закрепления заготовки высока.

Оценка режимов резания для расчета времени цикла.

Согласно уравнению (1) скорость резания  $V_c = V_0 \times K_m \times K_e \times K_s$ .

$V_0 = 75$  м/мин из таблицы 8,

$K_m = 1$  (Таблица 9),

$K_e = 1.5$  (Таблица 10),

$K_s = 1$  (стабильность достаточна),

$V_c = 75 \times 1 \times 1.5 \times 1 = 112$  (м/мин),

$n = 2971$  об/мин.

$f_z = f_{z0} \times K_s \times K_f$  (уравнение (6)),

$f_{z0} = 0.115$  мм/зуб из Таблицы 16,

$K_f = 0.78$  (Таблица 17),

$f_z = 0.115 \times 1 \times 0.78 = 0.09$  (мм/зуб).

Скорость подачи  $V_f = 0.015 \times 7 \times 2971 = 312$  (мм/мин).

### Пример

Подберите режимы резания для обработки уступа фрезой с наборной режущей кромкой диаметром 63 мм с коническим хвостовиком DIN69871 и тангенциально закрепленными пластинами T490 LNMT / LNHT 13 ... Фреза имеет 4 зуба (эффективные зубья).

Материал заготовки – титановый сплав "555" VST 5553 (Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr). Ширина резания варьируется от 6 до 8 мм, глубина резания составляет около 50 мм. Пластины изготовлены из сплава IC882. Условия оцениваются как стабильные. Отношение  $a_e/D = 0,12$ .

Как правило, инструмент с наборной режущей кромкой и цельным хвостовиком имеет большой вылет. Основываясь на этих условиях тип обработки можно отнести к тяжелой (Таблица 6).

$V_0 = 38$  м/мин (Таблица 7),  $K_m = 0.51$  (Таблица 9),  $K_e = 1.3$  (Таблица 10),  $K_s = 1$ .

$V_c = 38 \times 0.51 \times 1.3 \times 1 = 25$  (м/мин) (уравнение (1)),

$N = 126$  об/мин.

$f_{z0} \approx 0.2$  мм/зуб (Таблица 15, значение находится между данными, соответствующими  $a_e/d = 0,15$  и  $a_e/d = 0,2$ ),

$f_z = 0.2 \times 1 = 0.2$  мм/зуб.

$V_f = 0.2 \times 4 \times 126 = 100.8$  (мм/мин).

Средняя и максимальная толщина стружки составляет 0,07 мм и 0,13 мм (Таблица 15).





## Фрезерование плоскости

При фрезеровании плоскости начальная подача на зуб  $f_z$  рассчитывается по уравнению (7):

$$f_z = f_{z0} \times 1/\sin\chi \times K_s \quad (7)$$

Где:  $f_{z0}$  – базовая подача на зуб (таблица 18),  
 $\chi$  – угол в плане,  
 $K_s$  – коэффициент стабильности.

Для фрезерования плоскости характерна значительная ширина резания: обычно  $a_e = (0,6 \dots 0,8) \times d$ . Поэтому для быстрой оценки  $f_{z0}$  может быть задана в качестве базовой подачи на зуб из таблиц 15 и 16, что соответствует  $a_e/d = 0,75$ . Соответствующие значения  $f_{z0}$  для фрез с СМП приведены в таблице 18.

В таблице 19 приведены уже рассчитанные значения  $1/\sin\chi$  для типовых углов в плане для торцевых фрез.

**Таблица 18. Базовая подача на зуб  $f_{z0}$  и толщина стружки для фрезерования плоскостей**

Параметры	Fzo, мм/зуб, hm и hmax, мм, для твердосплавных пластин						
	Основные сплавы			Дополнительные сплавы			
	IC808 IC908	IC840	IC882	IC5820	IC380	IC830 IC928	IC330 IC328
Hm	0.095	0.095	0.11	0.095	0.078	0.11	0.11
Hmax	0.11	0.11	0.125	0.11	0.09	0.125	0.125
Fzo	0.11	0.11	0.125	0.11	0.09	0.125	0.125

**Таблица 19. Расчетные значения  $(1/\sin\chi)$  для стандартных углов в плане**

$\chi$	90°	75°	65°	60°	45°	30°
$1/\sin\chi$	1	1.03	1.1	1.15	1.4	2

**Угол в плане и угол наклона не являются синонимами!**

«Главный угол в плане» – это угол между главной режущей кромкой фрезы и плоскостью, содержащей направление движения подачи. «Угол наклона» (или «угол входа») дополняет угол в плане, то есть сумма обоих углов составляет 90°. Для обычной торцевой фрезы угол в плане – это угол между режущей кромкой и плоскостью, которую создает фреза. Если этот угол равен 60°, то угол наклона будет 30°. Угол в плане и угол наклона одинаковы только для фрез 45°. Термин «угол наклона» чаще используется в США, в то время как «угол входа» часто используется в Европе и Японии.

Твердосплавные концевые фрезы и большинство инструмента линейки **MULTI-MASTER** не предназначены для торцевого фрезерования. Тем не менее, существуют сменные головки **MULTI-MASTER** (например, MM FM, **Рис. 15**) и специальные фрезы, разработанные для фрезерования плоскостей.



Рис. 15 Торцевая фрезерная головка MULTI-MASTER MM FM

В этом случае начальная подача на зуб  $f_z$  может быть определена с помощью уравнения (7а):

$$f_z = f_{z0} \times K_f \times 1/\sin \chi \times K_s \quad (7a)$$

Где:  $f_{z0}$  – базовая подача, мм/зуб (Таблица 20),  
 $K_f$  – коэффициент прочности зуба (Таблица 17),  
 $\chi$  – угол в плане.

### Пример

Производителю титановых компонентов необходимо обрабатывать плоскую поверхность крупногабаритной заготовки из Ti-6Al-4V. Фреза диаметром 200 мм SOF45 8/16-D200-14-60R с пластинами ONHU 050500-PL IC830 предназначена для чистовой обработки плоскостей. Глубина и ширина резания составляют 1,5 мм и 160 мм соответственно. Каковы скорость резания и подача?

Угол в плане  $\chi=45^\circ$ ,  $a_e/d=0.8$ , тип обработки – легкий (Таблица 6), и стабильность считается достаточной.

Для сплава IC830  $V_0=55$  м/мин (Таблица 7),  $K_m=1$  (Таблица 9),  $K_e \approx 0.92$  (Таблица 10),  $K_s=1$ . Следовательно, из уравнения (1)  $V_c=55 \times 1 \times 0.92 \times 1=50.6$  (мм/мин)  $\approx 51$  м/мин.  
 $n=1000 \times 51/\pi/200=81$  (об/мин).

Согласно таблице 18  $f_{z0}=0.125$  мм/зуб,  $1/\sin 45^\circ=1.4$  (Таблица 19) и применяя уравнение (7)  $f_z=0.125 \times 1.4 \times 1=0.175$  (мм/зуб).  
 $V_f=0.175 \times 14 \times 81=198$  (мм/мин).

### Таблица 20. Базовая подача на зуб $f_{z0}$ и толщина стружки для фрезерования плоскости SCEM и головками MULTI-MASTER

Параметры	Fzo, hm и hmax для твердых сплавов	
	Основные сплавы	
	IC900 IC908	IC300 IC308
hm	0.049	0.052
hmax	0.057	0.06
fzo	0.057	0.06

## Фрезы для эффективной обработки титана

ISCAR предлагает широкий ассортимент фрез для титана. Данный раздел поможет с выбором подходящей линейки для нужной операции.

### Фрезы с наборной режущей кромкой для уступов и широких кромок

Значительная часть процесса фрезерования титана, особенно при обработке крупных заготовок, приходится на черновое снятие большого объема материала при обработке различных полостей и карманов. Зачастую для этого используются фрезы с наборной режущей кромкой. Угол в плане у них в основном 90 °.

В таблицах 21 и 22 указан приоритет выбора наиболее популярных фрез ISCAR с наборной режущей кромкой, а в таблице 23 – их общие конструктивные особенности.

**Таблица 21. Серии фрез со сменными пластинами для фрезерования высоких уступов**

		1-й выбор	2-й выбор	Допускается
ФРЕЗЕРОВАНИЕ ВЫСОКИХ УСТУПОВ	Черновое	<b>XQUAD</b> Наборная режущая кромка	<b>HELITANG</b> T490 LINE	<b>MILLSHRED</b> P290 LINE
	П/чист.	<b>HELITANG</b> <b>FIN LNK</b>	<b>XQUAD</b> Наборная реж. кр.	<b>MILLSHRED</b> P290 LINE

**Таблица 22. Серии фрез со сменными пластинами для обработки широких кромок**

		1-й выбор	2-й выбор	Допускается
ФРЕЗЕРОВАНИЕ ШИРОКИХ КРОМОК	Черновое	<b>HELITANG</b> <b>T490 LINE</b>	<b>XQUAD</b> Наборная реж. кр.	<b>MILLSHRED</b> P290 LINE
	П/чист.	<b>HELITANG</b> <b>FIN LNK</b>	<b>XQUAD</b> Наборная реж. кр.	<b>MILLSHRED</b> P290 LINE

#### **Разделение и измельчение стружки при фрезеровании титана**

Улучшить производительности и динамические характеристики фрез с наборной режущей кромкой стало возможно с использованием особенных пластин. Разработки позволили создать пластины с возможностью измельчения стружки, которые буквально нарезают и крошат ее на маленькие сегменты. Достижения в области порошковой металлургии позволяют создавать прочные пластины с измельчающими режущими кромками. Например, **MSCSHRED P290 ISCAR** – серия фрез с наборной режущей кромкой, использующая распространенную концепцию радиального закрепления пластин. Главной отличительной чертой этой серии является зубчатая режущая кромка. В отличие от многих пластин с функцией разделения стружки, односторонние пластины P290 с двумя зубчатыми режущими кромками не требуют специальных инструкций по установке на фрезы **MILLSHRED**, они легко закрепляются в любом посадочном гнезде. Это удобство для оператора упрощает сборку инструмента и позволяет избежать ошибок, которые могут привести к разрушению инструмента при неправильной установке пластин,

Таблица 23. Серия фрез с наборной режущей кромкой: основные данные\*

Линейка	Диаметры Мм	Конфигурация				Крепление пластин	Пластина			
		Коцевые фрезы с хвостовиком**		Насадные	Головки		Тип (O/D***)	Режущие кромки	Форма режущей кромки	
		Цилиндрич.	Конич.						Прямая	Разделение стружки
<b>XQUAD</b>	50-100			•		радиал.	0	4	•	
<b>HELITANG T490 LINE</b>	32-80	•	•	•	•	тангенц.	D	4	•	•
<b>HELITANG FIN LNK</b>	50-80		•			тангенц.	0	2	•	
<b>MILLSHRED P290 LINE</b>	25-100	•	•	•	•	радиал.	0	2	•	•

\* на момент создания брошюры

\*\* Тип хвостовика указан в столбцах

\*\*\* O-односторонние, D-двусторонние

**Радиальное или тангенциальное закрепление?**

Среди фрез с наборной режущей кромкой наиболее часто встречается фрезы с односторонними радиально закрепленными пластинами. Односторонняя пластина открывает больше возможностей для изменения геометрии резания и гарантирует наличие задних углов. Фрезы с пластинами данного типа обычно имеет большую стружечную канавку, чем инструмент с тангенциально закрепляемыми пластинами, и, следовательно, обеспечивает лучшую эвакуацию стружки при фрезеровании с высокой скоростью съема металла, особенно при обработке глубоких полостей и карманов. Кроме того, они лучше врезаются под углом. Это объясняет, почему радиальная концепция преобладает в конструкции фрез с наборной режущей кромкой. Исключением из общего правила является серия ISCAR **HELITANG T490** с пластинами 13 мм. Тангенциальный способ закрепления пластин усиливает жесткость фрезы и оптимизирует нагрузку на крепежные винты, в то же время увеличивается плотность пластин, что позволяет повысить подачу. Фрезы с наборной режущей кромкой **HELITANG T490** зарекомендовали себя в черновом фрезеровании широких кромок и уступов, где глубина резания значительно превышает ширину. При таких условиях проблем с удалением стружки нет, и фреза полностью отвечает требованиям высокоэффективной черновой обработки.

☛ Геометрия с разделением стружки – хорошее решение для чернового фрезерования в нестабильных условиях (большой вылет, плохое закрепление и т.д.). Фрезы демонстрируют отличную динамику и производительность.

**Зубчатые режущие кромки**

Измельчение стружки – ключевой принцип серии **MILLSHRED P290**. Процесс резания фрезой P290 можно сравнить с работой граблями (Рис. 16). Если вам нужно разрыхлить грунт, граблями это будет сделать легче, чем лопатой. В нашем случае происходит перекрытие зубьев на наших "граблях" – это сокращает перепады и повышает качество поверхности. Положения рук на Рис. 16 иллюстрируют это.



Рис. 16 Грабли

## Фрезерование с охлаждением под высоким давлением (НРС)

Не существует строгого определения высокого и сверхвысокого давления (НРС и УНРС). Традиционно подача СОТС на станках составляет 10–15 бар, что теперь считается низким давлением. Некоторые производители станков с ЧПУ производят так называемые насосы среднего давления; они обеспечивают подачу с давлением 50 бар. Различные современные обрабатывающие центры имеют возможность подачи охлаждающей жидкости с давлением в 70–80 бар – это считается подачей СОТС под высоким давлением и подразумевает, что поток охлаждающей жидкости точно направлен. Сегодня в промышленности применяется механическая обработка с использованием СОТС под сверхвысоким давлением, что соответствует значениям давления 100–200 бар и даже выше.

Благодаря максимальной производительности этого метода растет интерес к обработке с охлаждением под высоким давлением, особенно при высоком уровне выделения тепла. Метод НРС привлек внимание производителей, поскольку фрезерование титана сопровождается интенсивным тепловыделением.

Выделение тепла является постоянной особенностью металлообработки. Если оно интенсивно, обычная охлаждающая жидкость под низким давлением образует слой пара на поверхностях инструмента и заготовки. Этот теплоизолирующий слой затрудняет отвод тепла, что значительно сокращает срок службы инструмента.

Точечная подача позволяет охлаждающей жидкости под высоким давлением проникнуть через этот барьер.

- НРС увеличивает стойкость режущей кромки благодаря уменьшению окисления и адгезионного износа и усиливает сопротивляемость к разрушению.
- НРС быстро охлаждает стружку, делая ее твердой и ломкой. Стружка становится тоньше и меньше, она легче отделяется от заготовки. Быстрый поток охлаждающей жидкости удаляет стружку из зоны резания и исключает ее повторное фрезерование.
- НРС улучшает эвакуацию стружки, она уменьшается в размерах. Благодаря этому можно конструировать фрезы с маленькой стружечной канавкой и увеличить количество зубьев фрезы. Эффективное охлаждение снижает температуру в зоне обработки и дает возможность увеличить угол зацепления АЕ (ширину резания ае).

☛ НРС – хорошее решение для увеличения скорости обработки и подачи. Следующие факторы способствуют повышению производительности:

- преобразование стойкости в высокую скорость обработки,
- увеличенная подача, использование инструмента с большим количеством зубьев,
- увеличенная ширина резания.



Современные обрабатывающие центры пригодны для работы с НРС. Как показывает практика, обработка с применением НРС может удвоить скорость обработки. Точное значение увеличения скорости обработки зависит от конкретных факторов. Для оценки начальной скорости обработки  $V_{HP}$  при фрезеровании с НРС рекомендуется использовать следующее уравнение (8):

$$V_{HP} = (1.2 \dots 1.3) \times V_c, \quad (8)$$

где  $V_c$  – начальная скорость резания, заданная уравнением (1), или определенная по Таблице 6.

Предполагая, что увеличение  $V_{HP}$  составляет в среднем 25%, это уравнение после замены будет выглядеть следующим образом:

$$V_{HP} = 1.25 \times V_0 \times K_m \times K_e \times K_s \quad (8a)$$

Как и в случае определения начальной скорости при фрезеровании, базовую скорость резания  $V_0$ , коэффициенты:  $K_m$  (обрабатываемость),  $K_e$  (перекрытие) и  $K_s$  (стабильность), также можно найти в таблицах 7-10. Коэффициент стабильности  $K_s = 1$  при нормальной стабильности и 0,7... 0,8 для фрезерования в нестабильных условиях.

### Пример

Найдите исходные режимы резания для черного фрезерования высоких прямоугольных уступов в заготовке из титана Ti-6Al-4V ELI. Применяется фреза ISCAR с наборной режущей кромкой диаметром 80 мм и пластинами из сплава IC5820. Режимы резания: глубина резания  $a_p = 85$  мм, ширина резания  $a_e = 20$  мм.

Оборудование: вертикальный обрабатывающий центр с возможностью НРС, фреза с внутренними каналами для подачи СОТС под высоким давлением. Операционная стабильность может быть оценена как высокая.

$V_0 = 43$  м/мин. (Таблица 7, тяжелый тип обработки)

$K_m = 1.1$  (Таблица 9).

$K_e = 1.2$  (Таблица 10).

$K_s = 1$ .

$V_c = 43 \times 1.1 \times 1.2 \times 1 = 52$  (м/мин).

Следовательно,  $V_{HP} = (1.2 \dots 1.3) \times V_c \approx 65$  м/мин.

Из таблицы 15 для  $a_e/d = 0.25$   $f_{z0} = 0.14$  мм/зуб

$f_z = f_{z0} \times K_s = 0.14 \times 1 = 0.14$  (мм/зуб).

Существуют различные факторы, влияющие на подачу НРС через корпус фрезы, которые учитывают разработчики инструмента при проектировании. На фрезах с СМП следует обратить внимание на выходные отверстия для охлаждающей жидкости. Они представляют собой сопла, ввинчиваемые в соответствующие отверстия в стружечных канавках (Рис. 17, 18).



Рис. 17 А Т490 фреза с наборной режущей кромкой с НРС. Конструкция фрезы позволяет устанавливать сопла в отверстия для подачи охлаждающей жидкости



Рис. 18 Сопло, установленное в отверстие для подачи охлаждающей жидкости на фрезе Т490



**Почему сопла?**

*Есть несколько причин их использования в качестве выходных отверстий во фрезах с наборной режущей кромкой. Во-первых, технологический аспект. Требуемый диаметр на выходе обычно лежит в диапазоне 0,6... 2 мм. Получить такие «микроотверстия» в жестком стальном корпусе довольно сложно. Целесообразно увеличить диаметр отверстий, нарезать резьбу и разместить соответствующую насадку. Во-вторых, важную роль играет возможность контроля. Изменение выходного диаметра путем замены сопел позволяет оптимизировать поток охлаждающей жидкости, который зависит от характеристик насоса НРС и количества сопел в инструменте. Кроме того, если фреза не достигает максимальной глубины резания, отверстия для охлаждающей жидкости рядом с неработающими пластинами можно легко закрыть.*

Диаметр сопла меньше диаметра отверстия. В соответствии с законами гидромеханики существует соотношение между скоростью входа и выхода жидкости. Разница в диаметрах влияет на скорость охлаждающей жидкости, она покидает сопло с большей скоростью, чем входит в него. С другой стороны, существует определенная зависимость между давлением, скоростью и расходом охлаждающей жидкости. Увеличение диаметра сопла требует высокого расхода для обеспечения необходимого уровня давления. Увеличение количества сопел имеет тот же эффект.

Для эффективного применения фрез с наборной режущей кромкой с подачей НРС через корпус фрезы следует учитывать два момента:

1. Если токарный инструмент имеет одну режущую кромку и одного сопла достаточно, то в случае фрезы с наборной режущей кромкой, имеющей несколько режущих кромок, ситуация иная. Каждое лезвие состоит из набора сменных пластин, расположенных одна за другой. Точно направленная струя охлаждающей жидкости требует по меньшей мере наличия одного сопла на каждую пластину. Это значит, что характеристики насоса НРС должны соответствовать требуемому расходу, объем которого значительно отличается от расхода при точении.
2. Если глубина резания меньше, чем длина режущей части фрезы, необходимость подачи охлаждающей жидкости к пластинам, не задействованным в обработке, отпадает. Рекомендуется извлечь из отверстий сопла, направленные на эти пластины, а затем закрыть отверстия заглушками или стандартными винтами. Это простой и эффективный способ повышения производительности.

**Стандартный или специальный?**

*Фрезы с наборной режущей кромкой и НРС предназначены для удаления большого объема металла. Они работают в тяжелых условиях, с большой нагрузкой и значительным вылетом. В связи с этим возникает вопрос о том, что предпочтительнее: сборка из фрезы и оснастки (оправки, патрон, переходник и т. д.) или специальный цельный инструмент, который устанавливается в шпиндель? Сборка из стандартных элементов применяется повсеместно, но производители титановых компонентов во многих случаях предпочитают цельную конструкцию. Такая конфигурация обеспечивает максимальную жесткость и наиболее продуктивное фрезерование. Конкретные размеры инструмента, длина режущей кромки и вылет, а также тип соединения, которые варьируются от одного производителя к другому, повышают спрос на специальные конструкции фрез с НРС.*

## Фрезерование титана с быстрой подачей

Фрезерование с быстрой подачей (FF) или фрезерование с большой подачей (HFM) обычно связано с черновой обработкой стали и чугуна. Однако этот эффективный метод чернового фрезерования может быть успешно применен в обработке титановых компонентов.

Вместо того, чтобы использовать традиционную технологию удаления металла – фрезерование с большой глубиной и шириной резания – FF предлагает обработку с аналогичной шириной резания, но с гораздо меньшей глубиной. Фрезы FF имеют малые углы в плане, что позволяют значительно увеличить подачу на зуб  $fz$  и, следовательно, скорость подачи  $V_f$  благодаря эффекту утонения стружки (**Рис. 19**).

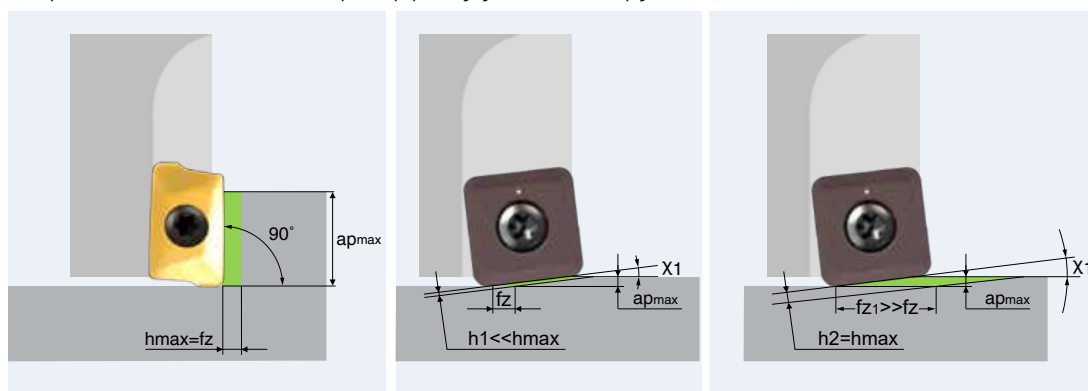


Рис. 19 Геометрические зависимости между подачей на зуб, углом режущей кромки и толщиной стружки

Другой отличительной особенностью фрезерования с быстрой подачей является уменьшение изгибающего момента. Небольшой угол в плане приводит к минимизации радиального воздействия силы резания и максимизации его осевого воздействия. Изгибающий момент зависит от силы, действующей на инструмент перпендикулярно его оси. Эта изгибающая сила является результатом радиальной и тангенциальной составляющих силы резания и существенно уменьшает изгибающий момент. Осевая сила действует в направлении оси шпинделя, то есть в направлении максимальной жесткости. Результат – повышение стабильности фрезерования, снижение вибрации и повышение производительности. Уменьшение изгибающей силы особенно важно при обработке титана из-за уже упомянутой «пружинистости» материала. Классическая режущая кромка фрезы FF является дугой большой окружности. Сегодня эта геометрия используется на твердосплавных концевых фрезах и сменных головках. Режущей кромкой инструмента со сменными пластинами обычно является одна или две хорды дуги.

ISCAR предлагает широкий ассортимент инструмента с FF: фрезы со сменной режущей частью, фрезы **SCEM** и **MULTI-MASTER**. Пластины для инструмента со сменной режущей частью различаются по типу (одно- и двухсторонние), форме (треугольные, четырехгранные, шестигранные и т. д.) и размеру.

В таблице 24 приведены общие рекомендации по выбору стандартных фрез ISCAR с СМП для обработки титана с быстрой подачей.

### Перерождение инструмента с FF

Первоначально инструмент с FF был представлен фрезами со сменными пластинами с относительно большим номинальным диаметром. Совершенствование многоосевых шлифовальных станков позволило применить геометрию FF к SCEM и сменным головкам значительно меньшего диаметра. Дальнейшие попытки найти экономичную альтернативу монолитному инструменту привели к созданию фрез с СМП малого диаметра. Для обработки титана с большой подачей ISCAR предлагает новейшую серию MICRO3FEED – многозубые фрезы FF со сменными пластинами и минимальным диаметром 10 мм.

Таблица 24. Серия фрез для больших подач: основные данные\*

Диаметр	мм	10-16	20-40	50-63	80-100
1-й выбор		<b>MICRO3FEED (T)</b>	<b>HELI6FEED (HP)</b>	<b>TANG4FEED (ER)</b>	<b>MILL4FEED (HP)</b>
2-й выбор			MILL4FEED (HP)	MILL4FEED (HP)	TANG4FEED (ER)
Возможный			LOGIQ4FEED (HP)	HELI6FEED (HP)	HELI6FEED (HP)

\* Рекомендованный стружколом указан в скобках.

Инструмент для фрезерования с большой подачей ISCAR и головки **MULTI-MASTER** представлены несколькими сериями. Общее описание серий приведено в таблице 25.

Таблица 25. FF SCEM и головки MULTI-MASTER

Серия	Обозначение	Диаметр, мм	Число зубьев
SOLIDFEED <b>MILL</b>	EFF-S	1-20	2, 4
MULTIFEED <b>MASTER</b>	MM EFF	8-25	4, 6
MULTIFEED <b>MASTER</b>	MM FF	10-20	2



## Операции

Основные операции FF – это черновое фрезерование карманов и полостей, предварительная обработка сложных поверхностей («фасонное фрезерование») и плоских поверхностей. Некоторые фрезы могут выполнять плунжерное фрезерование. Фрезерование карманов и полостей – самая распространенная операция в обработке титановых заготовок.

Тем не менее, стоит отметить, что во фрезеровании с быстрой подачей титан не так популярен, как сталь. Причина – тепло. Толстая стружка затрудняет отвод тепла из зоны резания. Кроме того, торцевые фрезы обычно отличаются относительно большим диаметром, поэтому контакт пластины с обрабатываемым материалом значительно дольше. Это приводит к усилению тепловой нагрузки на режущую кромку и уменьшению стойкости инструмента.

С другой стороны применение фрез FF позволяет уменьшить изгибающую силу. Этот метод рекомендуется для черновой обработки карманов и полостей, тонкостенных заготовок и заготовок с недостаточной жесткостью.

### Фрезерование плоскости с быстрой подачей

Изначально фрезы FF рассматривались главным образом для продуктивного чернового фрезерования полостей и штампов для пресс-форм. Позднее обработка FF была применена и для чистового фрезерования.

Чистовое фрезерование с быстрой подачей (или просто «FFF») стало еще одной областью применения инструмента FF.

☛ Инструмент FF создает обработанную поверхность с выступами. Высота выступа уменьшается с уменьшением ширины резания  $ae$ . Рекомендуется, чтобы ширина резания не превышала диаметр  $DC$  (Рис 20) чтобы предотвратить перегрузку зубьев из-за избыточного припуска на обрабатываемых выступах.

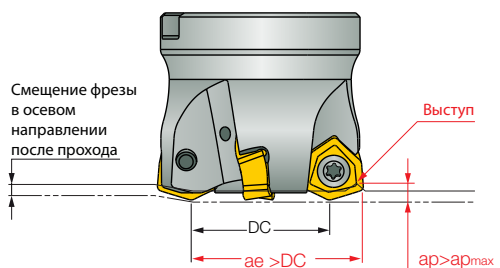


Рис. 20 Ширина резания и выступы при фрезеровании с быстрой подачей

При программировании ЧПУ инструмент FF часто указывается как фреза с угловым радиусом. Радиус называется «радиусом для программирования» ( $R$  на рис. 21).

Он определяет максимальную толщину выступа, который образуется как результат замены реального профиля.

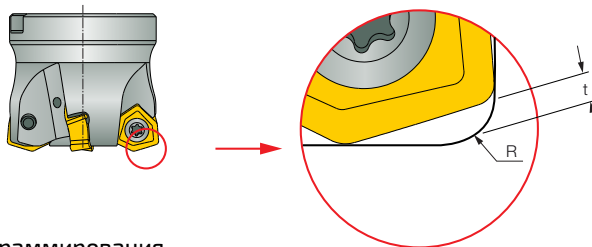


Рис. 21 Радиус для программирования

## Твердые сплавы

Для HFM нужен прочный твердый сплав. IC882 – первый выбор для такой операции, а IC330, IC328, и IC840 – дополнительные сплавы. Монолитные фрезы FF изготавливаются из сплавов IC903 и IC902, а головки FF **MULTI-MASTER** – из IC903 и IC908.

## Начальные режимы резания

Начальная скорость резания  $V_c$  может быть получена из уравнения (1), где базовая скорость резания и коэффициенты, используемые в уравнении, указаны в таблицах 7-10. Базовую скорость резания  $V_0$  необходимо выбирать для средней (M) обработки. Как и в предыдущих случаях коэффициент стабильности  $K_s$  равен 1 при нормальной стабильности и 0.-0.8 при нестабильных условиях обработки.

Примечание. При фрезеровании полостей и карманов во многих случаях фреза FF начинает обработку с врезания под углом (с  $AE=180^\circ$ ) и продолжает фрезеровать уступ. Для приблизительного расчета  $V_c$  достаточно упростить уравнение (1), установив коэффициент перекрытия  $K_e$  равным 1.

Начальная подача на зуб  $f_z$  для фрез FF со сменными пластинами определяется уравнением (5):

$$f_z = f_{zo} \times K_s$$

Таблица 26 демонстрирует базовую подачу в зависимости от марки твердого сплава пластин,

Таблица 27 – для SCEM и головок **MULTI-MASTER**.

**Таблица 26. Базовая подача  $f_{zo}$  для фрез FF со сменными пластинами**

Серия	Обозначение инструмента	Размер пластин	Угол в плане	Для твердых сплавов		
				IC882, IC330, IC328	IC830, IC840, IC5820	FF пластин IC808, IC908
MICRO3FEED	FFT3	03	17°	0.38	0.35	0.33
HELI6FEED	FF EWX/FWX	04	17°	0.4	0.38	0.36
		05		0.4	0.38	0.36
		07		0.45	0.42	0.4
		08		0.45	0.42	0.4
MILL4FEED	FFQ4	09	12°	0.55	0.51	0.49
		12	9°	0.7	0.65	0.62
		17	14°	0.47	0.44	0.42
LOGIQ4FEED	FFX4	04	17°	0.45	0.42	0.4
TANG4FEED	FFV	07	16°	0.47	0.44	0.42

## Пример

Планируется использовать метод HFM для черного фрезерования полости в титановой заготовке. Сплав Ti-6Al-4V обработан раствором и состарен. Размеры полости (длина L x ширина W x глубина H) составляют 220 x 110 x 70 мм. Технолог использует насадную фрезу **LOGIQ4FEED** FFX4 FD040-6-16-04 и обрабатывает полость путем врезания под углом, включая врезание по спирали. На фрезу установлены пластины FFX4 XNMMU 040310HP IC882. Стабильность считается нормальной.

Какие режимы должны быть установлены?

Базовая скорость резания  $V_0 = 43$  м/мин – таблица 7, а  $K_m = 0,9$  – таблица 9.

Начальная скорость резания  $V_c = 43 \times 0,9 \times 1 \times 1 \approx 39$  (м/мин).

Частота вращения шпинделя  $n = 1000 \times 39 / (\pi \times 40) = 310$  (об/мин).

Подача  $f_z$ , которая в этом случае равна базовой подаче  $f_{zo}$ , из таблицы 26:  $f_z = f_{zo} = 0.45$  мм/зуб.

Фреза имеет 6 зубьев, следовательно, скорость подачи  $V_f = 0,45 \times 6 \times 310 = 837$  (мм/мин). Максимальная глубина резания (DOC) армах (данные из каталога) для фрезы составляет 0,8 мм. Необходимый угол врезания  $\alpha_r \approx \tan^{-1}(\text{армах}/(L-d)) = \tan^{-1}(0,8/180) = 0,25^\circ$  (Рис. 22), для фрезерования в ширину  $\alpha_r \approx \tan^{-1}(\text{армах}/(W-d)) = \tan^{-1}(0,8/110) = 0,65^\circ$ . Так как максимальный угол врезания  $0,9^\circ$  для фрезы (данные из каталога), возможно врезание в обоих направлениях с достижением максимальной глубины резания в конце прохода.

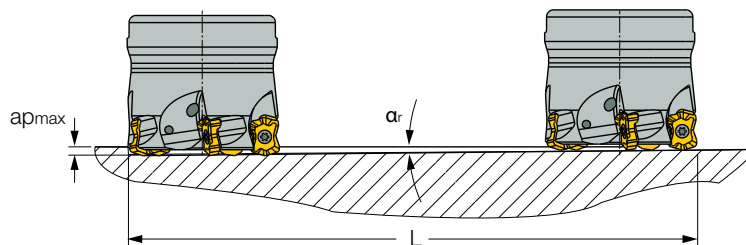


Рис. 22 Врезание под углом

**Таблица 27. Базовая подача  $f_{z0}$  для FF SCEM и головок MULTI-MASTER**

Серия	Базовая подача $f_{z0}$ , мм/зуб						
	Обознач.	Диаметр d, мм					
		1	2	3	4	5	6
SOLIDFEEDMILL и MULTIFEEDMASTER	EFF-S и MM EFF	0.02	0.1	0.16	0.2	0.2	0.2
MULTIFEEDMASTER	MM FF						

Серия	Базовая подача $f_{z0}$ , мм/зуб						
	Обознач.	Диаметр d, мм					
		8	10	12	16	20	25
SOLIDFEEDMILL и MULTIFEEDMASTER	EFF-S и MM EFF	0.21	0.25	0.25	0.3	0.32	0.35
MULTIFEEDMASTER	MM FF		0.37	0.37	0.45	0.48	

### Пример

Найти режимы резания для фрезерования с большой подачей заготовки из титана Ti-10V-2Fe-3Al, которая будет обработана специальной усиленной головкой **MULTI-MASTER** с двумя зубьями MM FF120R2.0-2T08 908.

Предположим, что вся технологическая система является жесткой, возьмем данные из Таблицы 7 (базовая скорость резания  $V_0 = 53$  м/мин) и Таблицы 9 ( $K_m = 0,56$ ).

Начальная скорость резания  $V_c = 53 \times 0,56 \times 1 \times 1 \approx 30$  (м/мин).

Частота вращения шпинделя  $n = 1000 \times 30 / (\pi \times 12) = 795$  (об/мин).

Базовая подача  $f_{z0}$  из таблицы. 27:  $f_{z0} = 0,37$  мм/зуб.

Скорость подачи  $V_f = 0,37 \times 2 \times 795 = 588$  (мм/мин).

#### **Структура зуба и подача на зуб**

Существует два вида фрезерных головок **MULTI-MASTER** для больших подач: MM EFF с четырьмя и шестью зубьями и MM FF с двумя зубьями. Рекомендуемая подача на зуб  $f_z$  для головок MM FF в 1,5 раза больше, чем для головок MM EFF. Причина – в структуре зуба. Если зубья головок MM EFF изготавливаются путем шлифования цилиндрических заготовок, как твердосплавные концевые фрезы, зубья экономичных головок MM FF предварительно формируются путем спекания, а затем шлифуются. Структура спеченного зуба обеспечивает большую  $f_z$ .



## Высокоскоростное фрезерование титана

К высокоскоростному фрезерованию (HSM) относятся следующие операции:

- фрезерование с большой скоростью резания,
- фрезерование с большой частотой вращения шпинделя,
- фрезерование с большой подачей.

Все упомянутые скорости взаимосвязаны. Увеличение частоты вращения шпинделя  $n$  автоматически приводит к увеличению скорости подачи  $V_f$ , увеличение скорости резания  $V_c$  требует соответствующего увеличения частоты вращения шпинделя  $n$ . Поскольку скорость резания изменяется прямо пропорционально диаметру вращающегося инструмента, обеспечение одинаковой  $V_c$  для фрез разных диаметров требует разной частоты вращения шпинделя.

В контексте данного руководства более правильному пониманию HSM соответствует высокая частота вращения шпинделя.

При фрезеровании титана скорости резания значительно ниже, чем при фрезеровании стали. Современные материалы и новые технологии обработки привели к росту средних скоростей резания и высокие значения  $V_c$  и  $n$  для титана могут выглядеть как «нормальные» значения для стали.

Есть несколько факторов, которые увеличивают частоту вращения шпинделя  $n$ :

- малый диаметр инструмента,
- малый эффективный диаметр,
- трохoidalное фрезерование.

Малый эффективный диаметр  $d_e$  относится к фасонному фрезерованию (особенно сферической фрезой) с малой глубиной резания. В таблице 28 и на **Рис. 23** показаны возможные случаи расчета эффективного диаметра для сферических фрез.

### Пример

Твердосплавная концевая сферическая фреза диаметром 8 мм обрабатывает наклонную поверхность титановой заготовки. Угол наклона  $\alpha=12^\circ$ , припуск на обработку за проход  $a=0.1$  мм. Материал заготовки отожженный Ti-6Al-4V, сплав концевой фрезы – IC908. Найти частоту вращения шпинделя  $n$ .

Исходя из данных таблицы 28 эффективный диаметр  $d_e=(8-2 \times 0.1) \times \sin 12^\circ + 2 \times \sqrt{((8 \times 0.1 - 0.1^2) \times \cos 12^\circ)} = 3.36$  (мм).

Базовая скорость резания  $V_0=65$  м/мин, таблица 8.

Упростим и предположим, что скорость резания одинакова ( $V_c=V_0$ ).

Частота вращения шпинделя  $n=(1000 \times 65)/(\pi \times 3.36)=6158$  (об/мин).

### Эффективный диаметр

*Фасонные фрезы (сферическая фреза, тороидальная фреза и т. д.) имеют фасонный, не прямой профиль режущей кромки, а режущий диаметр зависит от глубины резания. В фасонном фрезеровании эффективный диаметр — это самый большой режущий диаметр. Как правило, он соответствует диаметру, измеренному на осевой глубине резания.*

*Необходимая скорость резания должна быть рассчитана с учетом эффективного диаметра. Его игнорирование может привести к существенным ошибкам в режимах и снижению производительности.*

Примечание. Для равной скорости резания, которая соответствует номинальному диаметру инструмента  $d = 8$  мм, частота вращения шпинделя 2586 об/мин. Для номинального диаметра найденная частота вращения обеспечивает скорость резания 154,8 м/мин. Использование этой виртуальной скорости в качестве характеристики рассматриваемой операции вводит в заблуждение, поскольку реальная скорость резания значительно ниже.

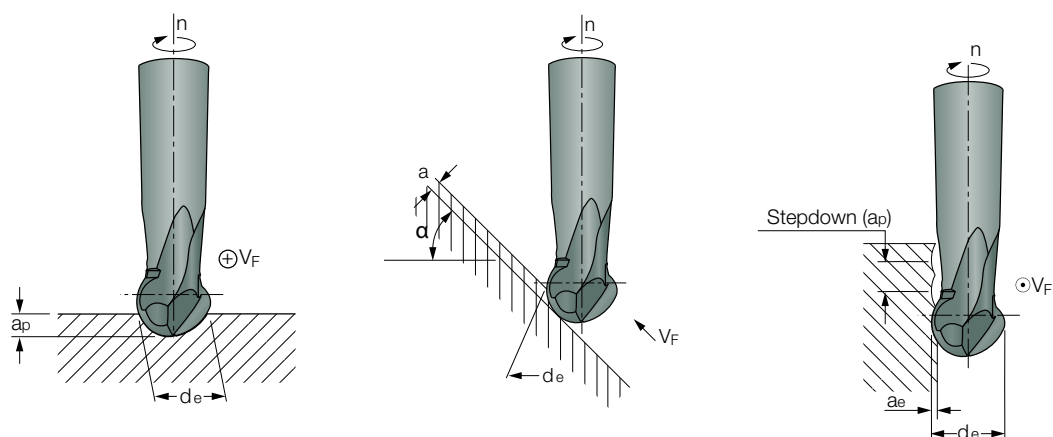


Рис. 23 Сферическая фреза

### Таблица 28 Расчет эффективного диаметра $d_e$ для сферических фрез

Траектория резания	Случай на рис. 23	Эффективный диаметр $d_e$	Замеч.
Ось фрезы является нормалью к обрабатываемой поверхности	a)	$2 \times \sqrt{(d \times a_p - a_p^2)}$	
Врезание под углом, фрезерование наклонной поверхности	b)	$(b - 2 \times a) \times \sin \alpha_r + 2 \times \sqrt{(d \times a - a^2)} \times \cos \alpha_r^*$	$\approx d \times \sin \alpha_r^{**}$
Фрезерование прямых стенок	c)	d	

\*  $\alpha_r$  – угол наклона,  $a$  – припуск на обработку за проход.

\*\* Упрощенное уравнение часто используется для оценки эффективного диаметра. Во многих случаях это дает подходящий результат. Тем не менее, это уравнение следует применять только для примерного расчета из-за ошибки округления, которая может привести к неточности.

Обычное фрезерование пазов или канавок начинается с обработки цельного материала при полном зацеплении инструмента. Фрезерование с полным зацеплением инструмента увеличивает силы резания и потребление энергии. Высокоскоростная технология трохоидального чернового фрезерования может быть эффективной альтернативой обычной стратегии фрезерования пазов. При трохоидальном фрезеровании быстро вращающийся инструмент обрабатывает материал по дуге на значительной глубине резания и с очень малой шириной резания (обычно 5-15% от диаметра инструмента  $d$ ). Небольшой угол зацепления  $AE$  позволяет конструировать многозубый инструмент и увеличить скорость резания  $V_s$  и подачу на зуб  $f_z$ . Инструмент нарезает тонкие слои материала с высокой скоростью и подачей, с заметным снижением энергопотребления. Трохоидальное фрезерование успешно применяется при изготовлении титановых деталей с множеством пазов и канавок (рис. 24), а также карманами или полостями, особенно с относительно тонкими стенками. В металлообрабатывающей промышленности данный метод используется в производстве цельных роторов (IBR), моноколес, импеллеров и т.д. (рис. 25)

**Пример**

Производитель авиационных двигателей решил применить технологию трохойдального фрезерования для черновой обработки пазов в роторе с интегрированными лопатками. Концевая твердосплавная фреза ISCAR диаметром 10 мм с 7 зубьями ESK-H7 из сплава IC900 будет использоваться на следующих средних параметрах обработки:  $a_p = 16$  мм,  $a_e = 1$  мм. Материал – Ti-6Al-4V ELI. Операционная стабильность хорошая.

Предположим, что  $K_s = 1$  (стабильная обработка).

Базовая скорость резания  $V_0 = 65$  м/мин (Таблица 8).

$K_m = 1,1$  (Таблица 9).

$a_e / d = 1/10 = 0,1$ . Угол зацепления  $AE = 36^\circ$ ,  $K_e = 1,5$  (Таблица 10).

Уравнение (1): начальная скорость резания  $V_c = 65 \times 1,1 \times 1,5 \times 1 = 107$  (м/мин)

Частота вращения шпинделя  $n = (1000 \times 107) / (\pi \times 10) = 3406$  (об/мин).

Базовая подача на зуб  $f_{z0} = 0,13$  мм/зуб (Таблица 16).

$K_f = 0,78$  (таблица 17).

Уравнение (6): начальная подача  $f_z = 0,13 \times 1 \times 0,78 = 0,1$  (мм/зуб).

Скорость подачи  $V_f = 0,1 \times 7 \times 3406 = 2384$  (мм/мин).

Расчетная скорость удаления металла  $Q = 1,6 \times 0,1 \times 238,4 = 38,14$  (см<sup>3</sup>/мин)

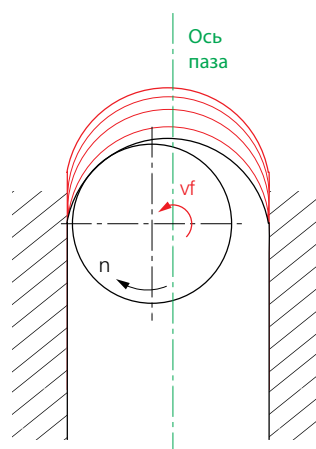


Рис. 24 Трохоидальное фрезерование

Твердосплавные концевые фрезы (SCEM), используемые для обработки титана, могут успешно выполнять трохойдальное фрезерование, они обычно имеют 4-5 зубьев. Разнообразие SCEM с большим количеством зубьев было разработано специально для трохойдального фрезерования. В таблице 29 приведены основные данные об этих сериях фрез.

**Таблица 29 серии SCEM для трохойдального фрезерования**

Серии	Обозначение	Выбор	Диаметры D, мм	Кол-во зубьев, Z	Угол подъема спирали	Угловой шаг	Сплав
Ti-TURBO	ESK-H7/9-CFR	1-й выбор	6-20	7 и 9*	Разные	Разный	IC900
CHATTERFREE	ES-E7/H7-CF	2-й выбор	2-20	7			IC902

\* 7 зубьев для d до 12 мм, 9 зубьев для d более 12 мм.

**Трохоида**

Трохоидальная кривая или просто трохоида - общее название циклоидальных кривых, которые описывает точка, находящаяся внутри или вне круга, катящегося без скольжения по направляющей.



Рис. 25 Фрезерование диска с лопатками

Для достижения положительных результатов трохойдального фрезерования в конкретных областях применения (типичным примером является фрезерование лопатки) нужны специальные фрезы различного диаметра, длины и конфигурации хвостовика. Хорошим решением может стать серия MULTI-MASTER с множеством конструктивных конфигураций сборок.

Серия MULTI-MASTER отличается богатым разнообразием многозубых головок для трохойдального фрезерования, которые изготавливаются по заказу.

#### **Диск с лопатками**

*Ротор, вращающаяся часть турбины, состоит из вала, диска и лопаток. Традиционно ротор представляет собой сборку, в которой лопатки устанавливаются на диск. В альтернативной конструкции ротор и лопатки (IBR) – одно целое. Цельная конструкция легче, но ее техническое обслуживание гораздо сложнее. В зависимости от конкретной конфигурации IBR можно рассматривать как лопастной диск («blisk»), лопастное кольцо («bling») или даже лопастной барабан («blum»).*

## СВЕРЛЕНИЕ ТИТАНА

ISCAR предлагает два типа сверл для титана: монолитные (рис. 26) и сверла со сменной режущей частью. К последним относятся сборные сверла со сменными пластинами (рис. 27) и сверла со сменными головками (рис. 28, 29). В таблицах 30–34 приведена общая техническая информация по сверлам ISCAR, наиболее часто используемым в обработке титана. При сверлении титана рекомендуется применять внутреннее охлаждение (через корпус инструмента), оно предусмотрено на всех сверлах данной серии.

**Таблица 30. Сверла ISCAR для обработки титана**

Серия	Обозначение	Тип	Режущая часть	Z**	Диаметры, мм	Точность отверстия*
DR-TWIST	DR	сборное	пластины	1	12...60	IT12
SUMOCHAM	DCN	сборное	головка	2	6...32	IT10-IT9
SOLIDDRILL	SCD ACP	монолит		2	3...20	IT10-IT9

\* Классы точности ISO при средних условиях резания

\*\* Количество эффективных режущих кромок

**Таблица 31. Соотношение L/d для сверл со сменными пластинами DR-TWIST**

Диаметр d*, мм	Соотношение L/d			
	2xd	3xd	4xd	5xd
от 12 до 14				
от 14 до 24				
от 24 до 38				
от 38 до 60				

\* Номинальный диаметр сверла.



**Таблица 32. Соотношение L/d для сверл SUMOCHAM со сменными головками**

Диаметр d*, мм*	Соотношение L/d				
	1.5xd	3xd	5xd	8xd	12xd
от 6 до 8					
от 8 до 26					
от 26 до 32					
от 32					

\* Номинальный диаметр сверла.



**Таблица 33. Соотношение L/d для сверл SOLIDDRILL**

Диаметр d*, мм	Соотношение L/d		
	3xd	5xd	8xd
от 3 до 4.9			
от 4.9 до 7.8			
от 7.8 до 9.9			
от 9.9 до 12			
от 12 до 20			

\* Номинальный диаметр сверла.





Рис. 26 Монолитное сверло для обработки титана из серии SOLIDDRILL

**Минимальное время установки**

Инструмент ISCAR со сменными головками (например, **SUMOCHAM** и **MULTI-MASTER**) соответствует важнейшему принципу «минимальное время установки», поскольку замена изношенной головки не требует дополнительных операций и переналадки. Для замены головки не обязательно снимать инструмент со станка, что значительно сокращает время простоя. Благодаря унифицированному резьбовому соединению **MULTI-MASTER** в один хвостовик устанавливать различные фрезерные головки, превращая его в универсальный и, таким образом, сокращая складские запасы.



Рис. 27 Сверло DR со сменными пластинами



Рис. 28 Сверла SUMOCHAM различной длины

Сменная  
твердосплавная головка

Стальной корпус



Рис. 29 Конструкция сверла SUMOCHAM



## Сверление неглубоких отверстий

Сверление неглубоких отверстий – распространенная операция, например, сверление предварительного отверстия или засверливание. Любое сверло относительно небольшого диаметра может использоваться для этой операции поскольку нет необходимости в значительной длине инструмента. Наилучшая производительность достигается при использовании небольших сверл, специально предназначенных для изготовления коротких отверстий.

ISCAR предлагает различные решения для сверления неглубоких отверстий и засверливания (Таблица 34): сменные головки **MULTI-MASTER** и монолитные сверла. Этот простой инструмент подходит не только для засверливания, но и для зенкования, снятия фасок и удаления заусенцев.



Рис. 30 Головка MM HCD

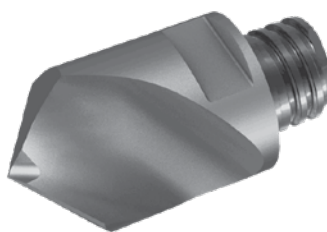


Рис. 31 Головка MM ECD

Таблица 34. Решения для неглубоких отверстий

Серия	Обозначение	Диаметр*, мм	Угол при вершении				Рис.**
			60°	80°	90°	120°	
<b>MULTI-MASTER</b>	MM HCD	8					30
		8.3					
		10					
		10.4					
		12					
		12.4					
		16					
		16.5					
	20						
	MM ECD	6					31
8							
10							
12							
16							
<b>SOLIDMILL</b>	ECD-S2	3				32	
		4					
		5					
		6					
		8					
		10					

\* Номинальный диаметр сверла.

\*\* Иллюстрированный пример



Рис. 32 Сверло твердосплавное ECD-S

## Сверление центрового отверстия

Твердосплавные сменные головки **MULTI-MASTER MM ECS (Рис. 33)** предназначены для сверления центровых отверстий с углом  $60^\circ$  в соответствии с DIN 332 и ANSI B94.11M (метрическая и дюймовая продукция соответственно). Существует два типа головок, используемых для сверления центровых отверстий формы А (без защитной фаски, «простой тип») и формы В (с конической защитной фаской, «в форме купола»).

В таблице 35 указан диапазон применения стандартной серии головок MM ECS.



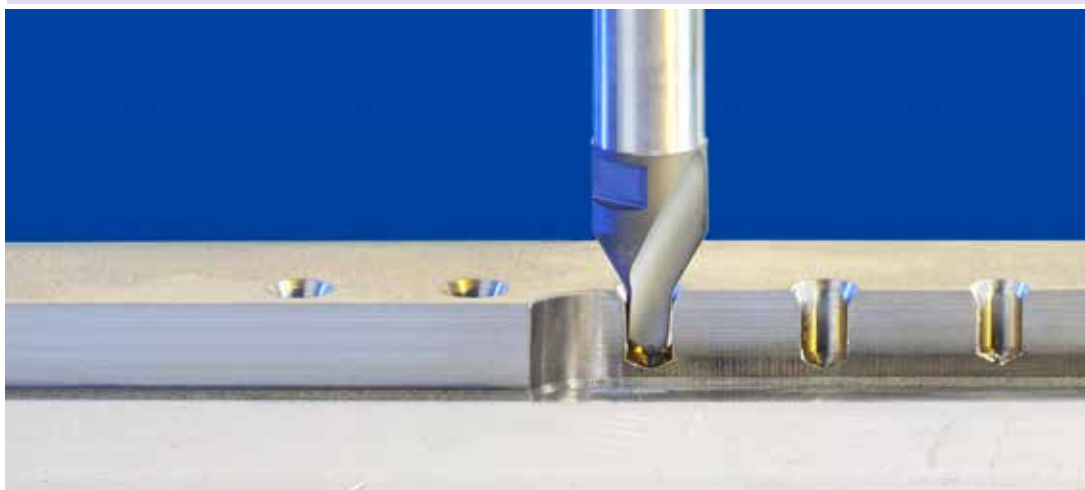
Рис. 33 MM ECS головка для сверления центровых отверстий

**Таблица 35. Применяемость головок MM ECS**

Тип центрового отверстия	Обозначение в соответствии с DIN 332							Размер по ANSI B94.11M		
	1x2.12	1.6x3.35	2x4.25	3.15x6.7	4x8.5	5x10.6	6.3x13.2	4	5	6
А										
В										

### **Сверло или зенковка?**

Для формирования конического отверстия требуется центровочное сверло. Это отверстие используется для поддержки заготовок в центрах станка. Одним из способов формирования конических отверстий является зенкование – обработка специальной фрезой – зенковкой. Фактически, центровочное сверло выполняет одновременно две операции: сверление и зенкование. Поэтому центровочное сверло часто относят к "комбинированной зенковке". Иногда, центровочное сверло считают сверлом для засверливания отверстий, однако, такое определение не совсем верно. Сверло для засверливания отверстий предназначено только для сверления, а центровочное сверло выполняет две операции: сверление и зенкование, поэтому "засверливание отверстия" и "сверление центрового отверстия" – не одно и то же.



## Выбор сверла

Выбор подходящего сверла зависит от конструкции, режущей геометрии и материала инструмента. Диаметр отверстия, точность и необходимая длина определяют конфигурацию сверла, а геометрия и режущий материал определяются материалом заготовки.

На **Рис. 34**, основанном на таблицах 31-33 в упрощенной форме показана область применения сверл ISCAR для обработки титана, в координатах «диаметр сверла - длина».

### Сверление центровочных отверстий: твердый сплав против HSS

Реверсивные сверлильные головки из быстрорежущей стали (HSS) наиболее популярный инструмент, применяемый для сверления центровых отверстий. Они простые и недорогие. Возникает вопрос: «Является ли твердосплавная головка MM ECS реальной альтернативой головкам HSS?» Ответ не так очевиден, как кажется, особенно в случае обработки титана. Твердосплавная головка обеспечивает заметное увеличение скорости резания и подачи, что приводит к повышению производительности и снижению затрат на обработку. Кроме того, стойкость головки значительно больше. Следовательно, правильный ответ требует кратких экономических расчетов, которые покажут реальную ситуацию для каждого конкретного случая.

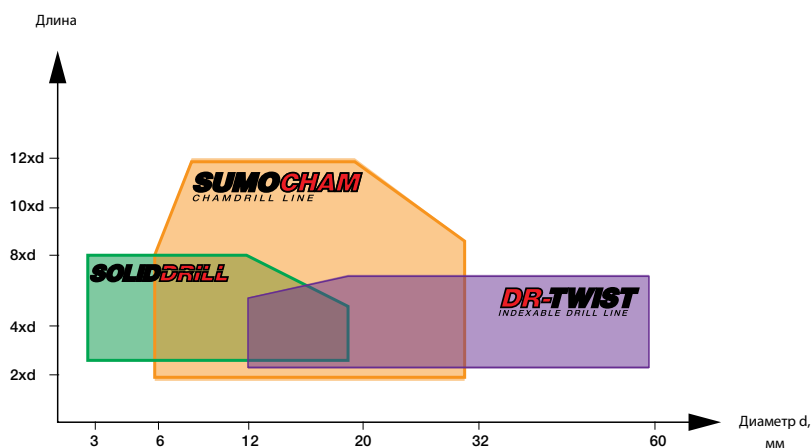


Рис. 34 Область применения сверл ISCAR

Чтобы выбрать подходящее сверло ISCAR для обработки титана обратите внимание на рекомендации ниже:

☛ Сверла **SUMOCHAM** – первый выбор и должны использоваться везде, где это возможно. Сплав IC908 является предпочтительным. Головки **MULTI-MASTER** рекомендуются для засверливания.

### Охлаждение

Подвод СОЖ является важным фактором при сверлении титана. Сверла ISCAR (монолитные и сборные) оснащены внутренними каналами для подачи охлаждающей жидкости через корпус сверла.

Рекомендуемое минимальное давление охлаждающей жидкости составляет 12 бар. Чем выше давление, тем лучше результат. Обычно диапазон давления составляет 12...70 бар. Более высокие показатели применяются в обработке с подачей охлаждающей жидкости под высоким давлением (НРС) и требуют особого внимания.

## Исходные режимы резания для сверления

### Скорость резания

При сверлении титана с давлением охлаждающей жидкости 70 бар начальная скорость резания  $V_c$  находится при помощи уравнения (9):

$$V_c = V_0 \times K_m \times K_s \quad (9)$$

Где:  $V_0$  – базовая скорость резания (Таблица 36)  
 $K_m$  – коэффициент обрабатываемости (Таблица 9)  
 $K_s$  – коэффициент стабильности (1 при нормальной стабильности и 0.7-0.8 для нестабильного сверления и обработки в неблагоприятных условиях)

**Таблица 36. Базовая скорость резания  $V_0$  в сверлении**

Серия	Обознач.	$V_0$ , м/мин или диаметр сверла $d$ , мм							
		До 3	От 3 до 6	От 6 до 12	От 12 до 20	От 20 до 32	От 32 до 60		
<b>SUMOCHAM</b>	DCN		38	45	45	50			
<b>SOLIDDRILL</b>	SCD ACP	32							
<b>MULTI-MASTER</b>	MM HCD, MM ECD								
<b>SOLIDMILL</b>	ECD-S2	32							
<b>DR-TWIST</b>	DR				50				



Рис. 34 Сверлильная головка ICG с функцией разделения стружки

#### Разделение стружки при сверлении

Геометрия с функцией разделения стружки может применяться в сверлении. Существуют различные конструкции режущих кромок со специальными канавками, например, головки ICG серии **SUMOCHAM** (Рис. 34). Разделение стружки на мелкие сегменты упрощает ее эвакуацию и позволяет повысить скорость резания (в среднем на 15%). При тех же условиях прямая кромка обеспечивает лучшее качество поверхности. Поэтому геометрия разделения стружки подходит для ценового сверления.

### Подача

Следующее уравнение (10) определяет начальную подачу  $f$  (на оборот):

$$f = f_0 \times K_h \quad (10)$$

Где:  $f_0$  – базовая подача (Таблицы 37, 38)  
 $K_h$  – коэффициент вылета (Таблицы 39, 40)

**Таблица 37. Базовая подача  $f_0$  для сверл DR-TWIST DR**

Размер пластины		04	05	06	07	09	10	11	12	14
Базовая подача, $f_0$	мм/об	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.1	0.1	0.12

**Таблица 38. Базовая подача fo для сверл SUMOCHAM DR, SOLIDDRILL SCD ACP, MULTI-MASTER\* и SOLIDMILL ECD S2**

Диаметр сверла	мм	До 3	От 3 до 5	От 5 до 8	От 8 до 12	От 12 до 16	От 16 до 20	От 20 до 25	От 25 до 32
Базовая подача fo	мм/об	0.04	0.07	0.09	0.12	0.15	0.19	0.21	0.23

\* Для головок MM HCD, MM ECD и MM ECS

**Таблица 39. Коэффициент вылета Kh для сверл DR-TWIST DR**

Длина	2xd*	3xd	4xd	5xd
Коэффициент вылета Kh	1	0.93	0.82	0.75

\* d – диаметр сверла

**Таблица 40. Коэффициент вылета Kh для сверл SUMOCHAM DR, SOLIDDRILL SCD ACP, MULTI-MASTER и SOLIDMILL ECD S2**

Длина*	до 3xd**	5xd	8xd	12xd
Коэффициент вылета Kh	1	0.87	0.82	0.80

\* вылет для серии MULTI-MASTER

\*\* d – диаметр сверла

### Пример

Технолог планирует процесс изготовления детали из отожженного титана Ti-6Al-4V. Одной из операций является сверление ряда сквозных отверстий в основании толщиной 65 мм. Диаметр отверстий 24 мм, допуск на диаметр  $\pm 0,065$  мм. Технолог решил использовать сверло ISCAR с рекомендуемыми параметрами и режимами резания.

Соотношение глубина/диаметр отверстия составляет  $65/24 \approx 2,7$ , поэтому необходимо выбрать сверло 3xd. Требуемая точность диаметра соответствует стандарту ISO IT11. Серия сверл **SUMOCHAM** – первый выбор для этой операции. Мы можем выбрать DCN 240-072-32A-3D (диаметр 24 мм, 3xd), так как оно обеспечивает точность отверстия IT10-IT9 (Таблица 30). На сверло устанавливается головка ICM 240 IC908 (IC908 – рекомендуемый сплав).

Базовая скорость резания  $V_0=38$  м/мин, Таблица 36. Коэффициент обрабатываемости  $K_m=1$  (Таблица 9).

Предположим, что стабильность нормальная ( $K_s=1$ ), согласно уравнению (9) скорость резания  $V_c$  следующая:

$$V_c = 38 \times 1 \times 1 = 38 \text{ (м/мин)}$$

$$\text{Частота вращения шпинделя } n = (1000 \times 38) / (\pi \times 24) = 504 \text{ (об/мин)}$$

Базовая подача  $f_0=0.21$  мм/об, Таблица 38.

Коэффициент вылета  $K_h=1$  (Таблица 40).

Расчет подачи  $f$  по уравнению (10) дает следующий результат:  $f=0.21 \times 1=0.21$  (мм/об).

Скорость подачи  $V_f=0.21 \times 504=105.8$  (мм/мин).

#### **Короткие и глубокие отверстия.**

Термины «короткие» и «глубокие» отверстия не имеют строгого определения.

Повсеместно признано, что сверление отверстия диаметром  $d$  и глубиной (10... 12)  $xd$  и более относится к глубокому сверлению, в то время как отверстия глубиной до  $5xd$  являются короткими. В терминологии, используемой ISCAR, глубоким считается сверление от  $12xd$  и выше. Следовательно, отверстия с меньшей глубиной – короткие. Сверла для коротких отверстий различаются в зависимости от длины: короткие (до  $3xd$ ), длинные ( $4xd$  и  $5xd$ ) и сверхдлинные ( $8xd$  и  $12xd$ ).

## РАЗВЕРТЫВАНИЕ ТИТАНА

Развертывание – не самая распространенная операция в обработке титана, однако, в некоторых случаях она необходима. Существует несколько серий разверток ISCAR: монолитные из твердого сплава или сборные со сменной режущей частью. При развертывании титана часто встречаются нестандартные диаметры отверстий и допуски. Это связано с «пружинистостью» титана, ее следует учитывать при планировании процесса обработки. ISCAR также предлагает специальные развертки по запросу. Самые подходящие решения – высокоскоростные развертки серии **BAYO T-REAM** (Рис. 35).

Развертка **BAYO T-REAM** (Рис. 36) представляет собой сборный инструмент, состоящий из корпуса (также называемого хвостовиком) и сменной твердосплавной головки с несколькими зубьями. Головка закрепляется на хвостовике при помощи уникального байонетного механизма. Каждой головке в определенном диапазоне диаметров соответствует свой размер соединения («байонетный номер») с обозначением BN5, BN6...BN9. Направление стружечной канавки зависит от типа обрабатываемого отверстия: сквозное или глухое (Рис. 37). Хвостовик обычно изготовлен из стали, но при необходимости это может быть вольфрам или твердый сплав. Развертки имеют каналы подвода охлаждающей жидкости, которые направлены на режущие кромки.



Рис. 35 Развертка А BAYO T-REAM

Преимущества конструкции:

1. Универсальность – на хвостовик можно установить разные головки, а головки подходят к разным хвостовикам. Эта функция делает развертки универсальными и дает возможность сократить запасы инструмента и затраты.
2. Принцип "Минимальное время установки" – замена изношенной головки на новую не требует переналадки и настройки и может быть выполнена на станке. Это эффективный способ сокращения простоев оборудования и снижения себестоимости.
3. Простота эксплуатации – замена головки простая и удобная.



Таблица 41 содержит общую информацию о развертках серии **BAYOT-REAM** для обработки титана



Рис. 36 Развертка BAYO T-REAM



Рис. 37 Сменная головка с прямыми канавками

**Таблица 41. Развертки BAYO T-REAM для титана: общая информация**

Параметр	Данные
Диапазон диаметров	11.5...32
Точность отверстия*, сплав ISO	IT 7
Шероховатость поверхности*, Ra	0.2...0.4

\* при стандартных условиях резания

## Исходные режимы резания для развертывания

### Припуск на развертывание

Ориентировочные величины припуска на развертывание указаны в таблице 44.

**Таблица 44. Припуск на развертывание для разверток BAYO T-REAM**

Припуск на диаметр отверстия		
От 11.5 до 13.5	От 13.5 до 16	От 16 до 32
0.15-0.25	0.20-0.30	0.20-0.35

\* единицы измерения: мм

### Скорость резания

Начальная скорость резания  $V_c$  рассчитывается по уравнению (11):

$$V_c = V_0 \times K_m \quad (11)$$

Где:  $V_0 = 45$  м/мин – базовая скорость резания  
 $K_m$  – коэффициент обрабатываемости (Таблица 9)

### Подача

В таблице 43 приведены данные для выбора начальной подачи на зуб  $f_z$ .

**Таблица 43. Рекомендуемые подачи для разверток BAYO T-REAM\***

Размер соединения	Подача $f_z$ , мм/зуб			
	Сквозное отверстие		Глухое отверстие	
	Гладкое	Прерывистое	Гладкое	Прерывистое
BN5...BN6	0.04-0.05-0.07	0.03-0.04-0.06	0.03-0.04-0.06	0.03-0.03-0.05
BN7...BN9	0.05-0.07-0.09	0.04-0.06-0.08	0.04-0.06-0.07	0.04-0.05-0.06

\* рекомендуемые подачи приведены в последовательности: минимальная - начальная - максимальная

☛ При использовании разверток **BAYO T-REAM** лучшие результаты достигаются при давлении охлаждающей жидкости 15-20 бар.

### Пример

Найдем режимы резания для развертывания сквозного отверстия.  
 Сплав – Ti-10V-2Fe-3Al, требуемый диаметр отверстия  $\varnothing 25$ h8. Используется развертка **BAYO T-REAM** со специально разработанной 8-зубой головкой с соединением BN8.

Коэффициент обрабатываемости  $K_m = 0.56$  (Таблица 9).

По уравнению (11) начальная скорость резания  $V_c$  будет следующей:

$$V_c = 45 \times 0.56 = 25 \text{ (м/мин)}$$

$$\text{Частота вращения шпинделя } n = (1000 \times 25) / (\pi \times 25) = 318 \text{ (об/мин)}$$

Из Таблицы 44 начальная подача  $f_z = 0.07$  мм/зуб.

$$\text{Скорость подачи } V_f = 0.07 \times 8 \times 318 = 178 \text{ (мм/мин)}$$

**ISCAR LTD.**

**Israel**  
Headquarters  
Tel +972 (0)4 997 0311  
Fax+972 (0)4 987 3741  
www.iscar.com  
headquarter@iscar.co.il

**Argentina**

ISCAR TOOLS ARGENTINA SA  
Tel +54 114 912 2200  
Fax+54 114 912 4411  
admin@iscararg.com.ar  
www.iscararg.com.ar

**Australia**

ISCAR AUSTRALIA PTY. LTD  
Tel +61 (0) 2 8848 3500  
Fax+61 (0) 2 8848 3511  
iscaraustralia@iscar.com.au  
www.iscar.com.au

**Austria**

ISCAR AUSTRIA GmbH  
Tel +43 7252 71200-0  
Fax+43 7252 71200-999  
office@iscar.at  
www.iscar.at

**Belarus**

JV ALC "TWING-M"  
Tel +375 17 506-32-38  
+375 17 506-33-31/65  
Tel/Fax +375 17 506-32-37  
info@twing.by  
www.twing.by, www.iscar.by

**Belgium**

n.v. ISCAR BENELUX s.a.  
Tel +32 (0) 2 464 2020  
Fax+32 (0) 2 522 5121  
info@iscar.be  
www.iscar.be

**Bosnia**

(Representative Office)  
Tel +387 32 201 100  
Fax+387 32 201 101  
info@iscar.ba

**Brazil**

ISCAR DO BRASIL COML. LTDA.  
Tel +55 19 3826-7100  
Fax+55 19 3826-7171  
DDG 0800 701 8877  
iscar@iscarbrasil.com.br  
www.iscar.com.br

**Bulgaria**

ISCAR BULGARIA  
Tel/Fax +359 431 62557  
aa\_iscar@infotel.bg  
www.iscar.bg

**Canada**

ISCAR TOOLS INC.  
Tel +1 905 829 9000  
Fax+1 905 829 9100  
admin@iscar.ca  
www.iscar.ca

**Chile**

SANDE SA  
Tel +56 2 695 1700  
Fax +56 2 697 0332  
logistica@sande.cl

**China**

ISCAR CHINA  
Tel +86 10 6561 0261/2/3  
Fax+86 10 6561 0264  
iscar@iscar.com.cn  
www.iscar.com.cn

**Colombia**

CIMEX S.A.  
Tel: +57 (1) 530-9222  
cimex@cimexsa.com

**DUROMETAL COLOMBIA**

Tel: +57 1 674 03 20  
Fax: +57 1 674 04 03  
dirventas@duro-metal.com

**Croatia**

ISCAR ALATI d.o.o.  
Tel +385 (0) 1 33 23 301  
Fax +385 (0) 1 33 76 145  
iscar@zg.t-com.hr  
www.iscar.hr

**Cyprus**

WAMET (Demetriades) Ltd.  
Tel +357 (0) 2 336660/5498  
Fax +357 (0) 2 333386  
wamet@cytanet.com.cy

**Czech Republic**

ISCAR CR s.r.o.  
Tel +420 377 420 625  
Fax +420 377 420 630  
iscar@iscar.cz  
www.iscar.cz

**Denmark**

KJ VAERKTOEJ AS/ISCAR DENMARK  
Tel +45 70 11 22 44  
Fax+45 46 98 67 10  
kj@kj.dk  
www.iscar.dk

**Estonia**

KATOMSK AS  
Tel +372 6775 671  
Fax +372 6720 266  
ateksel@katomsk.ee

**Finland**

ISCAR FINLAND OY  
Tel +358-(0)9-439 1420  
Fax +358-(0)9-466 328  
info@iscar.fi  
www.iscar.fi

**France**

ISCAR FRANCE SAS  
Tel +33 (0)1 30 12 92 92  
Fax+33 (0)1 30 12 95 82  
info@iscar.fr  
www.iscar.fr

**Germany**

ISCAR GERMANY GmbH  
Tel +49 (0) 72 43 9908-0  
Fax+49 (0) 72 43 9908-93  
gmbh@iscar.de  
www.iscar.de

**Greece**

INTERNATIONAL TOOLS  
K.-X. GEORGOPOULOS & SIA O.E  
Tel +30 210 346 0133  
Fax +30 210 342 5621  
info@internationaltools.gr

**VIMA**

V. MAZLOUMIAN & SONS  
Tel +30 2310 517-117 / 544-521  
Fax +30 2310 529-107  
vimaco@otenet.gr  
http://www.vimaco.gr

**Hong Kong**

MTC TOOLING SYSTEMS LTD  
Tel +85-2-23054838  
Fax +85-2-27988789  
yoongkamsing@hotmail.com

**Hungary**

ISCAR HUNGARY KFT.  
Tel +36 28 887 700  
Fax +36 28 887 710  
iscar@iscar.hu  
www.iscar.hu

**India**

ISCAR India Ltd.  
Tel +91 77009 63707  
crao@iscar.in

**Indonesia**

CV MULTI TEKNIK  
Tel. +62-21-29206242/44/45/59  
Fax. +62-21-29206243  
contact@multi-teknik.co.id

**Ireland**

HARDMETAL MACHINE TOOLS  
Tel +353 (0) 1 286 2466  
Fax +353 (0) 1 286 1514  
phannigan@hardmetal.ie

**Italy**

ISCAR ITALIA srl  
Tel +39 02 93 528 1  
Fax +39 02 93 528 213  
marketing@iscaritalia.it  
www.iscaritalia.it

**Japan**

ISCAR JAPAN LTD.  
Tel +81 6 6835 5471  
Fax +81 6 6835 5472  
iscar@iscar.co.jp  
www.iscar.co.jp

**Latvia**

SIA EKL/LS  
Tel +371 6 733 11 54  
Fax +371 6 780 56 48  
ekllpools@isr.lv

**Lithuania**

MECHA, UB  
Tel +370 37 407 230  
Fax +370 37 407 231  
sigitas@mecha.lt

**Macedonia**

(Representative Office)  
Tel +389 2 309 02 52  
Fax +389 2 309 02 54  
info@iscar.com.mk

**Mexico**

ISCAR DE MÉXICO  
Tel +52 (442) 214 5505  
Fax+52 (442) 214 5510  
iscarmex@iscar.com.mx  
www.iscar.com.mx

**The Netherlands**

ISCAR NEDERLAND B.V.  
Tel +31 (0) 182 535523  
Fax+31 (0) 182 572777  
info@iscar.nl  
www.iscar.nl

**New Zealand**

ISCAR PACIFIC LTD.  
Tel +64 (0) 9 573 1280  
Fax+64 (0) 9 573 0781  
iscar@iscarpac.co.nz

**Norway**

SVEA MASKINER AS  
Tel +47 32277750  
Fax +47 32277751  
per.martin.bakken@svvea.no

**Peru**

HARTMETALL SAC  
Tel: (51) 6612699  
otorres@hartmetallgroup.com

**Philippines**

MESCO  
Tel +63 2631 1775  
Fax +63 2635 0276  
mesco@mesco.com.ph

**Poland**

ISCAR POLAND Sp. z o.o.  
Tel +48 32 735 7700  
Fax+48 32 735 7701  
iscar@iscar.pl  
www.iscar.pl

**Portugal**

ISCAR PORTUGAL, SA  
Tel +351 256 579950  
Fax+351 256 586764  
info@iscarportugal.pt  
www.iscarportugal.pt

**Romania**

ISCAR TOOLS SRL  
Tel +40 (0)312 286 614  
Fax+40 (0)312 286 615  
iscar-romania@iscar.com

**Россия**

Москва, Челябинск  
ООО "Искар"  
Tel/fax +7 495 660 91 25/31  
iscar@iscar.ru  
www.iscar.ru

**Serbia**

ISCAR TOOLS d.o.o.  
Tel +381 11 314 90 38  
Fax +381 11 314 91 47  
info@iscartools.rs

**Singapore**

SINO TOOLING SYSTEM  
Tel +65 6566 7668  
Fax +65 6567 7336  
sinotool@singnet.com.sg

**Slovakia**

ISCAR SR, s.r.o.  
Tel +421 (0) 41 5074301  
Fax +421 (0) 41 5074311  
info@iscar.sk  
www.iscar.sk

**Slovenia**

ISCAR SLOVENIJA d.o.o.  
Tel +386 1 580 92 30  
Fax+386 1 562 21 84  
info@iscar.si  
www.iscar.si

**South Africa**

ISCAR SOUTH AFRICA (PTY) LTD.  
ShareCall 08600-47227  
Tel +27 11 997 2700  
Fax +27 11 388 9750  
iscar@iscarsa.co.za  
www.iscar.co.za

**South Korea**

ISCAR KOREA  
Tel +82 53 760 7594  
Fax+82 53 760 7500  
leeyj@taegutec.co.kr  
www.iscarkorea.co.kr

**Spain**

ISCAR IBERICA SA  
Tel +34 93 594 6484  
Fax +34 93 582 4458  
iscar@iscarib.es  
www.iscarib.es

**Sweden**

ISCAR SVERIGE AB  
Tel +46 (0) 18 66 90 60  
Fax +46 (0) 18 122 920  
info@iscar.se  
www.iscar.se

**Switzerland**

ISCAR HARTMETALL AG  
Tel +41 (0) 52 728 0850  
Fax +41 (0) 52 728 0855  
office@iscar.ch  
www.iscar.ch

**Taiwan**

ISCAR TAIWAN LTD.  
Tel +886 (0)4-24731573  
Fax +886 (0)4-24731530  
iscar.taiwan@msa.hinet.net  
www.iscar.org.tw

**Thailand**

ISCAR THAILAND LTD.  
Tel +66 (2) 7136633-8  
Fax+66 (2) 7136632  
iscar@iscarthailand.com  
www.iscarthailand.com

**Turkey**

ISCAR KESICI TAKIM  
TIC. VE. IML. LTD  
Tel +90 (262) 751 04 84 (Pbx)  
Fax+90 (262) 751 04 85  
iscar@iscar.com.tr  
www.iscar.com.tr

**Ukraine**

ISCAR UKRAINE LLC  
Tel/fax +38 (044) 503-07-08  
iscar\_ua@iscar.com  
www.iscar.com.ua

**United Kingdom**

ISCAR TOOLS LTD.  
Tel +44 (0) 121 422 8585  
Fax+44 (0) 121 423 2789  
sales@iscar.co.uk  
www.iscar.co.uk

**United States**

ISCAR METALS INC.  
Tel +1 817 258 3200  
Tech Tel 1-877-BY-ISCAR  
Fax+1 817 258 3221  
info@iscarmetals.com  
www.iscarmetals.com

**Venezuela**

FERREINDUSTRIAL ISO-DIN C.A.  
Tel +58 2 632 8211/633 4657  
Fax +58 2 632 5277  
iso-din@cantv.net

**Vietnam**

ISCAR VIETNAM  
(Representative Office)  
Tel +84 8 38 123 519/20  
Fax +84 8 38 123 521  
iscarvn@hcm.fpt.vn  
www.iscarvn.com

"© 2013 Iscar Ltd. Настоящий документ, а также вся информация и другие данные, содержащиеся в настоящем документе и / или полученные из него, включая все товарные знаки, логотипы, торговые наименования, концепции, изображения, конструкции и / или устройства, а также любые данные, на которые может распространяться любое право собственности и / или интеллектуальной собственности («Информация»), являются исключительной собственностью Iscar Ltd. и защищены авторским правом и другими применимыми законами. Никакая часть любой информации не может быть использована или иным образом распространена для каких-либо целей без предварительного письменного согласия Iscar Ltd.

Товары, представленные в этом каталоге, могут быть улучшены, изменены или отозваны без предварительного уведомления."

**Всю самую последнюю информацию о нашей продукции вы можете получить в онлайн-каталоге на сайте [www.iscar.ru](http://www.iscar.ru).**

# Справочное руководство ISCAR

## Обработка титана

