

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Радзевич С. П.</b>	О возможности решения задачи синтеза наивыгоднейшего процесса формообразования заданной поверхности детали . . . . .	2
<b>Вохидов А. С., Добровольский Л. О.</b>	Нанология сегодня и завтра . . . . .	8
<b>Базров Б. М.</b>	Построение классификации соединений деталей в изделиях . . . . .	11
<hr/>		
<b>Сергеев А. И., Корнипаев М. А., Корнипаева А. А., Русаев А. С.</b>	Применение генетических алгоритмов в структурно-параметрическом синтезе гибких производственных систем . . . . .	17
<b>Сердюк А. И., Рахматуллин Р. Р., Галина Л. В.</b>	Ранжированная оценка эффективности выбора проектных параметров оборудования для гибких производственных ячеек механической обработки . . . . .	21
<hr/>		
<b>Исаев А. В., Гречишников В. А.</b>	Применение режущих пластин с прямолинейной кромкой для обработки криволинейных участков профиля . . . . .	26
<hr/>		
<b>Суслов А. Г., Петрешин Д. И.</b>	Определение закона управления для адаптивной технологической системы при обеспечении заданных параметров качества поверхностного слоя деталей машин при механической обработке . . . . .	30
<b>Чемборисов Н. А., Сунгатов И. З.</b>	Математическое описание винтовой линии на сфере . . . . .	36

АВТОМАТИЗАЦИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА

МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИЙ  
ИНСТРУМЕНТ

ТЕХНОЛОГИЯ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ

$$\text{где } Cxv = \frac{v^{k3/6} \sqrt{1000}}{k_0 k_1}; Cx_{\text{зад}} - \text{заданная величина}$$

параметра  $Cx$ ;  $s$  — первоначально установленная подача, мм/об;  $Cx_{\text{изм}}$  — рассчитанное по формуле (9) значение параметра  $Cx$  при измеренной во время обработки шероховатости  $R_a$  обработанной поверхности;  $s(Cx_{\text{изм}})$  — скорректированная величина продольной подачи.

Моделируя обеспечение заданного параметра  $Cx$  при чистовом точении, получили следующие результаты. Предположим, что необходимо обеспечить величину  $Cx_{\text{зад}} = 0,67$  при допуске  $\Delta = \pm 10\%$ . Для условий чистового точения  $tm = 45\%$ ,  $Wz = 2,8 \text{ мкм}$ ,  $Hmax = 70 \text{ мкм}$ ,  $u_h = 1,3$ ,  $\lambda = 1$ .

Для обеспечения заданного значения  $Cx$  необходимо установить следующие режимы обработки  $s = 0,15 \text{ мм/об}$ ,  $v = 180 \text{ м/мин}$  и  $t = 1,0 \text{ мм}$ . Это точка 1 на номинальной характеристике (рис. 3).

В результате действия внешних возмущений происходит отклонение параметра  $Cx$  за допустимые значения (см. точки 2 и 3 на рис. 3). Проводя рассуждения, как и в предыдущих примерах, для случая, когда  $Cx_{\text{изм}} \geq (Cx_{\text{зад}} + \Delta Cx_{\text{зад}})$ , получили:

$$\left. \begin{aligned} 0,78 &\geq 0,67 + 0,1 \cdot 0,67; \\ v &= 180; \\ Cv &= \frac{0,15^{-0,358}}{0,78} = 2,53; \\ s(R_a_{\text{зад}}) &= (0,67 \cdot 2,53)^{-2,79} = 0,23. \end{aligned} \right\}$$

Аналогично могут быть получены законы управления и для других комплексных параметров качества поверхности слоя ( $P$ ,  $Cy$ ,  $Cm$  и др.).

Таким образом, результаты моделирования можно считать удовлетворительными и полученные законы управления можно использовать для АТСУ по обеспечению заданных параметров качества поверхности слоя деталей машин.

### Список литературы

- Инженерия поверхности деталей / Под ред. А. Г. Суслова. — М.: Машиностроение, 2008. — 230 с.
- Суслов А. Г., Дальский А. М. Научные основы технологии машиностроения. — М.: Машиностроение, 2002. — 684 с.
- Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. — М.: Машиностроение, 1976. — 278 с.
- Безъязычный В. Ф., Крылов В. Н., Полетаев В. А. Автоматизация технологий изготовления газотурбинных авиационных двигателей. — М.: Машиностроение, 2005. — Ч. 1. — 560 с.
- Медведев Д. Д. Автоматизированное управление процессом обработки резанием. — М.: Машиностроение, 1980. — 143 с.
- Суслов А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. — М: Машиностроение, 1987. — 208 с.
- Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. — М.: Машиностроение, 2000. — 320 с.

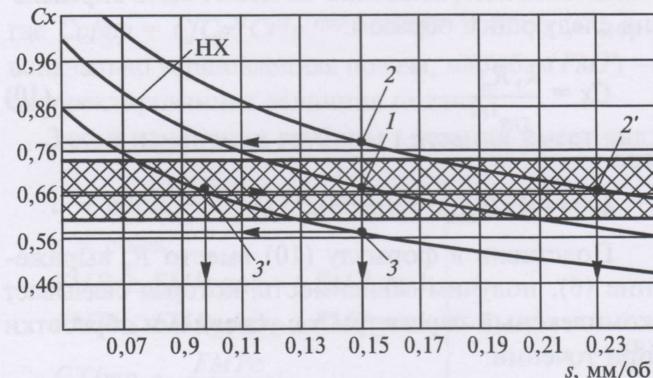


Рис. 3. Моделирование работы АТСУ при обеспечении заданного значения комплексного параметра  $Cx$ ; НХ — номинальная характеристика зависимости  $Cx = f(s)$ ;  $s$  — подача

## Математическое описание винтовой линии на сфере

д.т.н. Н. А. Чемборисов, И. З. Сунгатов // ИНЭКА, г. Набережные Челны

Обработка резанием (ОР) — основной технологический процесс изготовления точных деталей машин и механизмов. Трудоемкость механосборочного производства в большинстве отраслей машиностроения значительно превышает суммарную трудоемкость литьевых, ковочных и штамповочных процессов. ОР отличается высокой производи-

тельностью и исключительно высокой точностью. Следует также отметить универсальность и гибкость ОР, что обеспечивает ее преимущество перед другими способами формообразования, особенно в индивидуальном и мелкосерийном производстве. Производительность обработки и качество изделия во многом определяют эффективность и точность

режущего инструмента (РИ), поэтому в обеспечении процесса ОР инструментальная подготовка производства играет важную роль.

В машиностроении широко используют изделия с поверхностями сложной формы; в общем случае сложными называют асимметричные в трех измерениях поверхности. Процесс ОР поверхностей сложной формы характеризуют нестандартные факторы, влияющие на технологию обработки, тип РИ и кинематику формообразования.

В настоящее время поверхности сложной формы обрабатывают на многокоординатных станках с ЧПУ, используя РИ относительно простой формы со сложным движением формообразования. Современные станки с ЧПУ имеют широкие возможности по осуществлению пространственно сложных движений как РИ, так и обрабатываемой детали (ОД).

Согласно работе [1] применение сложных поверхностей целесообразно в следующих случаях: 1) для придания конструктивной формы ОД; 2) для повышения коэффициента полезного действия; 3) для соблюдения закона движения или работы механизма (машины).

Значительную часть сложных (по типу и форме) поверхностей составляют винтовые поверхности (ВП), что вызвано допущением движения поверхностей "самих по себе". Доказано [2], что к поверхностям, допускающим такое движение относятся только ВП с постоянным шагом и фиксированной образующей формой. Поверхность, допускающая движение "самой по себе" — это поверхность, для которой можно указать одно- или многопараметрическое движение, в результате воспроизведения которого огибающая к последовательным положениям движущейся поверхности конгруэнтна самой этой поверхности.

ВП — это поверхность, созданная движением образующей (в виде отрезка кривой линии) по двум заданным винтовым линиям; при этом один конец этой кривой скользит по поверхности фигуры вращения, на которой должна быть образована ВП, а сама образующая во всех своих положениях нормальна к поверхности вращения.

Изделия с ВП подразделяют на два больших класса деталей и обрабатывающих инструментов. К изделиям с ВП относят следующие детали: 1) винты кораблей, лонжероны, фюзеляжи, воздушные

винты, лопатки, крыльчатки (применяют в авиационной и кораблестроительной промышленности); 2) роторы и лопатки турбин (применяют при строительстве гидростанций, тепловых и атомных электростанций); 3) червячные и шариковинтовые передачи рулевого управления легковых и грузовых автомобилей, зубчатые и червячные передачи коробок скоростей и подач автомобилей и тракторов (применяют в автомобиле- и тракторостроении); 4) шариковинтовые передачи приводов подач, зубчатые и червячные передачи коробок скоростей и подач металлорежущих станков (применяют в станкостроении).

К изделиям с ВП относят следующие обрабатывающие инструменты: 1) РИ с винтовыми стружечными канавками; 2) РИ, работающие методом обкатки; 3) накатные инструменты; 4) штампы и литейная оснастка; 5) сложные медицинские инструменты.

К РИ с винтовыми стружечными канавками и к сложным медицинским инструментам относят осевые режущие инструменты (борфрезы и фасонные концевые фрезы). В осевых РИ стружечная канавка, выполненная по винтовой линии, уменьшает динамические нагрузки на технологическую систему резания, увеличивая тем самым стойкость и эксплуатационные показатели РИ. Борфрезы и фасонные концевые фрезы при невысокой себестоимости обеспечивают высокую точность обработки пространственно сложных поверхностей.

Применяемая в настоящее время методика проектирования носит рекомендательный характер, основывающийся на накопленном производственном опыте. Ввиду этого борфрезы имеют большие погрешности формы профиля стружечных канавок, которые возрастают с увеличением переднего угла  $\gamma$  и угла  $\omega$  наклона винтовых зубьев, числа  $z$  зубьев и параметров установки дискового инструмента для реализации процесса обработки. Все это приводит к уменьшению работоспособности осевых РИ. Проектирование формообразующей части осевых РИ для обработки пространственно сложных поверхностей — один из наиболее сложных процессов инструментального производства. Формообразующей частью борфрезы является винтовая поверхность, состоящая из образующей ВП, выполненной по винтовой линии на исходной инструментальной поверхности.

ВП — это поверхность, описываемая образующей линией  $L$ , которая вращается с постоянной угловой скоростью вокруг неподвижной оси и одновременно перемещается поступательно с постоянной скоростью вдоль этой оси. Винтовым называют сложное движение, состоящее из вращательного движения вокруг оси и одновременного поступательного движения параллельно этой оси. Любая ВП может перемещаться "сама по себе" и посредством изгибаания может быть наложена на поверхность вращения.

В работе [3] наиболее полно изложена теория ВП и дана их классификация. Если образующая  $L$  пересекает ось вращения, то ВП называют закрытой, а если не пересекает, то открытой. В зависимости от вида образующей ВП подразделяют на линейчатые и круговые. Также ВП классифицируют в зависимости от положения образующей относительно оси винта. ВП, образованную обычным винтовым движением образующей линии  $L$ , называют обычной ВП, а ВП, образованную прямолинейной образующей  $L$ , называют линейчатой ВП.

При пересечении закрытой линейчатой ВП торцовой поверхностью в сечении получаем спираль Архимеда; отсюда название — архimedов геликоид. Если прямолинейная образующая перпендикулярна к оси винта, то геликоид называют прямым (винтовой коноид), а если нет, то геликоид называют косым (рис. 1).

Пространственную форму детали определяет сочетание различных поверхностей. Для обеспече-

ния обработки конструктор стремится использовать простые геометрические поверхности: плоские; круговые цилиндрические; конические; шаровые; торевые и гипоидные. Геометрическая поверхность представляет собой совокупность последовательных положений (следов) одной производящей линии (называемой направляющей), расположенных на другой линии, определяющей поверхность и называемой образующей.

Например, для образования круговой цилиндрической поверхности прямую линию (образующую) перемещают по окружности (направляющей). Образующая и направляющая линии могут быть заменены одна на другую. Также любая поверхность может быть задана и другой линией (например, плоскость может быть задана архимедовой спиралью), определяющей существование выше указанных двух [4].

Для обработки ВП детали применяются РИ со сложным профилем образующей исходной инструментальной поверхности. Выбор РИ зависит от применяемой схемы формообразования, имеющегося на предприятии технологического оборудования, требуемой точности и типа производства.

Существует большое число схем формообразования ВП, большинство которых объединяет обеспечение формообразования тремя согласованными движениями: 1) вращательное (обработка дисковым РИ) или возвратно-поступательное (строгание, протягивание) движение РИ; 2) вращательное движение ОД.

Согласованное с вращательным движением поступательное движение ОД или РИ осуществляют вдоль оси ВП. Исключением является токение ВП, при котором режущее лезвие врезается на всю глубину профиля и перемещается только вдоль оси винта; поэтому такая кинематика применима только для обработки ВП с небольшой глубиной профиля и малым углом подъема винтовой линии.

Наиболее производительным, распространенным и универсальным методом обработки ВП ОД является фрезерование или шлифование дисковым РИ на универсальном оборудовании, что не требует применения специализированного оборудования. Профилирование дискового РИ как для предварительной (дисковая фреза), так и для финишной обработки (шлифовальный круг) выполняют по единой схеме. Профиль ВП осевых РИ (характерный также для борфрез) показан на рис. 2.

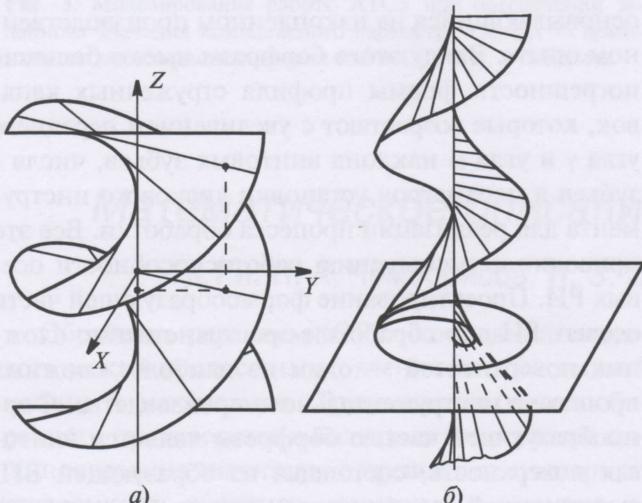


Рис.1. Прямой (а) и косой (б) геликоид

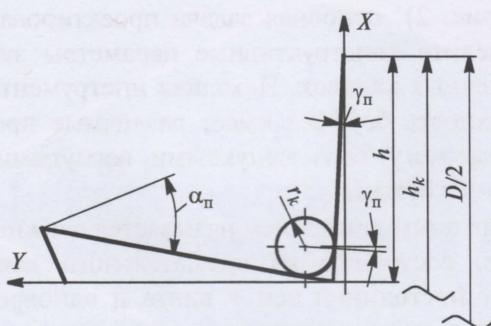


Рис. 2. Профиль нормального сечения ВП осевого РИ:  $\alpha_{\pi}$ ,  $r_k$ ,  $h$ ,  $h_k$ ,  $D$  — соответственно угловые и линейные параметры профиля;  $X$  и  $Y$  — оси координат

Для обработки пространственно сложных ВП применяют в основном концевые фасонные РИ и борфрезы. Все возможный диапазон форм пространственно сложных поверхностей, методов их обработки, материалов, из которых они изготавливаются, конечных точности и шероховатости обработанных поверхностей требуют большого числа различных РИ и их определенных внешних форм (рис. 3 и 4), которые обеспечивают производство в большом диапазоне [1] в соответствии со следующими группами стандартов.

1. ГОСТ 18934—73—ГОСТ 18949—73. Параметры конструкции и размеров твердосплавных концевых фрез различных форм для обработки труднообрабатываемых сталей и сплавов. По способу крепления рабочей части твердосплавные концевые фрезы подразделяют на крупноразмерные [режущую часть (коронку) крепят на оправку] и мел-

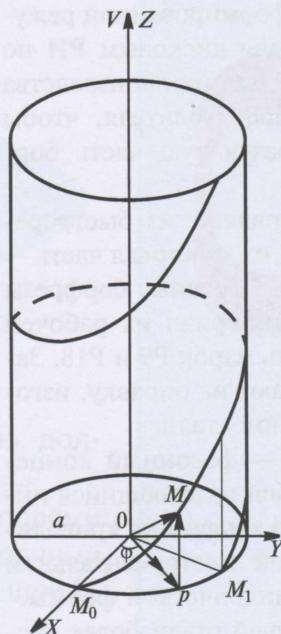


Рис. 4. Цилиндрическая винтовая линия

(для чистовой обработки стальных заготовок); ВК8 (для черновой обработки чугунных заготовок); ВК6М (для чистовой обработки чугунных заготовок). Оправки удлиненных фрез и фрез с коронками изготавливают из стали 40Х или 45Х. По заказу потребителя возможно изготовление твердосплавных концевых фрез из материалов других марок, аналогичных по своим механическим свойствам. Твердосплавные концевые фрезы с коронками называют крупноразмерными, а цельные и удлиненные — мелкоразмерными.

По виду технологического процесса изготовления борфрезы подразделяют на следующие виды. "Черновые" борфрезы изготавливают, последовательно выполняя операции: предварительное спекание режущей части; формирование зубьев; окончательное спекание; припаивание оправки. Преимущество этой технологии — низкая себестоимость; недостаток — значительное радиальное и торцовое биение, что отрицательно влияет на динамику технологической системы резания.

"Светлые" борфрезы с винтовыми стружечными канавками, выпол-

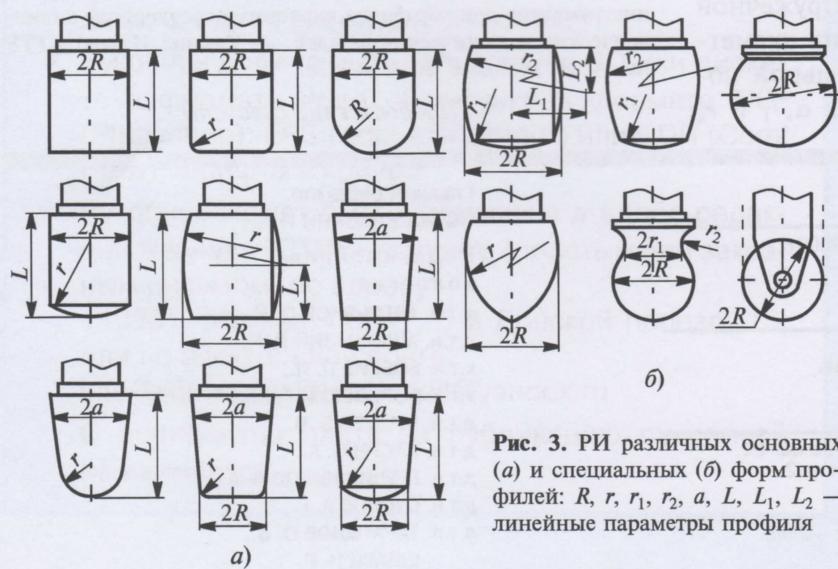


Рис. 3. РИ различных основных (а) и специальных (б) форм профилей:  $R$ ,  $r$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $a$ ,  $L$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  — линейные параметры профиля

коразмерные (режущую часть изготавливают заодно с оправкой).

2. ГОСТ 22134—76—ГОСТ 22158—76. Параметры конструкций борфрез из быстрорежущей стали различных форм и режимы обработки. По способу крепления рабочей части борфрезы из быстрорежущей стали подразделяют на насадные и цельные (концевые).

В качестве материала режущей части твердосплавных концевых фрез используют следующие марки металлокерамических сплавов: Т5К10 (для черновой обработки стальных заготовок); Т15К6

ненными на окончательно сформированной режущей части путем фрезерования дисковым РИ по ранее нанесенным насечкам. Для их производства необходим большой опыт производителя, чтобы точно изготовить формуобразующую часть борфрезы.

Цельные борфрезы изготавливают из быстрорежущей стали марок Р9 и Р18; их хвостовая часть — одно целое с рабочей частью. Насадные борфрезы изготавливают пустотельными: материал их рабочей части — быстрорежущая сталь марок Р9 и Р18. Затем рабочую часть навинчивают на оправку, изготовленную из конструкционной стали.

Конструктивно борфреза — фасонный концевой РИ, представляющий собой вращающийся инструмент, имеющий винтовую канавку на криволинейной образующей исходной инструментальной поверхности, и оправку цилиндрической формы.

Борфрезы из быстрорежущей стали более распространены в производстве, чем твердосплавные концевые фрезы, так как они (по сравнению с последними) проще в изготовлении, обладают достаточно высокой стойкостью и большим числом зубьев, что улучшает качество обработанной поверхности.

Образующая винтовой канавки состоит из соединений отрезков прямых и дуг окружностей, которые не могут быть выражены одной аналитической формулой, что создает определенные трудности при определении профиля образующей исходной инструментальной поверхности дискового РИ, если применять традиционные методы.

Ввиду того, что размеры профиля стружечной канавки борфрез меняют при изменении диаметра образующей исходной инструментальной поверхности, при постоянных значениях  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $r_k$

(см. рис. 2), основная задача проектирования — определить конструктивные параметры зубьев и стружечных канавок. Исходная инструментальная поверхность борфрез имеет различные профили, которые могут быть выпуклыми, вогнутыми и выпукло-вогнутыми.

Винтовым движением называется сложное движение, состоящее из вращательного движения вокруг постоянной оси  $V$  винта и одновременно поступательного движения, параллельного этой оси [3]. Введем следующие обозначения:  $\bar{u}$  — вектор скорости поступательного движения по прямой, параллельной оси  $V$ ;  $\bar{\omega}$  — вектор угловой частоты вращения, откладываемый по винтовой оси таким образом, чтобы, смотря из его конца, было видно вращение против часовой стрелки.

При совпадении направлений  $\bar{\omega}$  и  $\bar{u}$  винтовое движение называют правовинтовым, при противоположных направлениях  $\bar{\omega}$  и  $\bar{u}$  — левовинтовым. Шаг винтового движения — расстояние, пройденное проекцией движущейся точки вдоль оси  $V$  за один оборот винта.

### Список литературы

1. Дружинский И. А. Методы обработки сложных поверхностей на металлорежущих станках. — М.: Машиностроение, 1965. — 345 с.
2. Радзевич С. П. Формообразование поверхностей деталей. — Киев: Растан, 2001. — 593 с.
3. Люкшин В. С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов. — М.: Машиностроение, 1968. — 295 с.
4. Чемборисов Н. А. Профилирование дисковых режущих инструментов для обработки винтовых поверхностей цилиндрических и конических деталей. — Казань: Изд-во КГТУ им. А. Н. Туполева, 2003. — 352с.

(Продолжение следует)

ООО «СТИН»  
Художественный редактор Лыгина И. Н.

Сдано в набор 15.11.2009 г. Подписано в печать 24.12.2009 г.  
Формат издания 84 × 108 1/16. Бумага офсетная № 1.  
Уч. изд. л. 4,95.  
Цена договорная

Адрес редакции: 119991, Москва,  
ГСП-1, 5-й Донской проезд, 15. Редакция журнала «СТИН».  
Тел./факс (495) 954-00-37, тел. (495) 955-51-19.  
E-mail: info@stinyjournal.ru www.stinyjournal.ru

Компьютерный набор и верстка выполнены в ООО «Адвансед Солюшнз».  
105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2.  
Тел./факс: (495) 916-75-74, 916-76-73.  
Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.  
115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, 8/9. Номер заказа — 2488.  
Тел./факс: (495) 954-19-22

Главный редактор  
НОВОСЕЛЬСКИЙ И. А.

Редакционная  
коллегия:  
д.т.н. АВЕРЬЯНОВ О. И.,  
д.т.н. АШКИНАЗИЙ Я. М.,  
к.т.н. БОБРИК П. И.,  
к.т.н. БОРОВСКИЙ Г. В.,  
д.т.н. БУШУЕВ В. В.,  
д.т.н. ВАСИН С. А.,  
д.т.н. ГРЕЧИШНИКОВ В. А.,  
д.т.н. СУСЛОВ А. Г.,  
д.т.н. ТАРАТАЙНОВ О. В.,  
ШВАРЦ И. Р.

Учредитель ООО «СТИН»

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИЙ  
ИНСТРУМЕНТ

Радзевич С. П.

СОДЕРЖАНИЕ

О возможности решения задачи синтеза наивыгоднейшего процесса формообразования заданной поверхности детали . . . . . 2

Исаев А. Н.,  
Лебедев А. Р.,  
Арапов П. С.

Моделирование геометрии многозубого дорна  
для обработки отверстий деталей из труб . . . . . 8

Иванов В. В.,  
Толкачев К. А.

Выбор марки твердого сплава  
для обработки серого чугуна . . . . . 14

ТЕХНОЛОГИЯ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ

Абрамов Ф. Н.

Влияние погрешностей базирования  
призматических заготовок на точность расположения  
обработанных поверхностей . . . . . 18

Лутъянов А. В.

Особенности проектирования технологии растачивания  
корпусных деталей в приспособлениях  
с аэростатическими опорами . . . . . 22

Чемборисов Н. А.,  
Сунгатов И. З.

Математическое описание винтовой линии  
на сфере . . . . . 25

ОТКРЫТИЯ. ИЗОБРЕТЕНИЯ.  
НОВАЯ ТЕХНИКА

Буренин В. В.

Очистка и обезвреживание  
пылегазовоздушных выбросов станкостроительных  
и металлообрабатывающих заводов . . . . . 29

НАНОТЕХНОЛОГИИ

Ханов А. М.,  
Муратов Р. А.,  
Муратов К. Р.,  
Гашев Е. А.

Технология и оборудование с растровой кинематикой  
для формирования шероховатости поверхностей  
постоянной кривизны в нанометровом интервале . . . . . 34

Лобусов А. В.

Определение частоты резонансного виброрезания  
металла . . . . . 36

ПРАКТИКА ЗАВОДОВ,  
ИНСТИТУТОВ, КБ

Шумячев В. М.,  
Душко О. В.

Экспериментальная установка  
для исследования процессов абразивной обработки  
при доводочных операциях . . . . . 38

Торец детали обрабатывают следующим образом: на борштангу устанавливают быстровращающуюся (частота вращения достигает нескольких тысяч об/мин) пневматическую головку, на шпинделе которой установлена однозубая эльборовая фреза (рис. 2). Воздух к головке подают через борштангу; при закреплении головки включают ее пневмопривод. Задний конец борштанги соприкасается с упором, обеспечивающим микрометрическую подачу инструмента на обрабатываемый буртик, что обеспечивает многопроходную обработку. Вращение борштанги (от шпинделя станка) — медленное (частота  $n = 1$  об/мин). Фреза, закрепленная на шпинделе пневматической головки, производит врезание в обрабатываемую заготовку.

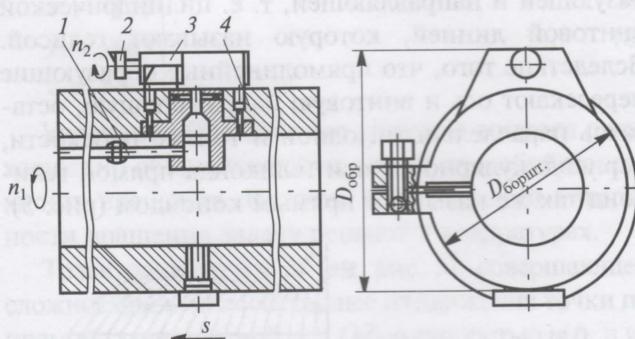


Рис. 2. Схема обработки опорного торца: 1 — подача воздуха; 2 — фреза (материал — эльбор); 3 — крепление инструмента; 4 — борштанга

Качество подводимого воздуха определяет надежную работу приспособлений с аэростатическими опорами и долговечность подвижных деталей. Поэтому необходимы очистка и осушка воздуха, подводимого к опорам. В соответствии с ГОСТом

17433—80 "Промышленная чистота. Классы загрязненности сжатого воздуха" загрязненность сжатого воздуха нормируют 15 классами (от 0 до 14), учитывающими возможные количества загрязнения и эффективность существующих промышленных способов очистки сжатого воздуха.

На Рязанском станкозаводе спроектированы устройства осушки и очистки сжатого воздуха для аэростатических приспособлений, предназначенные для очистки сжатого воздуха от воды, масла и твердых частиц, поступающего от пневмосети или от индивидуального компрессора. Эти устройства (расход воздуха в систему  $1,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ ; потеря воздуха на выходе не более  $0,01 \text{ МПа}$ ; степень очистки сжатого воздуха не менее 85 %) успешно работают в составе аэростатических приспособлений.

Внедрение приспособлений с аэростатическими опорами дало значительные технологические преимущества при растачивании отверстий корпусных деталей шпиндельных бабок металлорежущих станков; при этом экономический эффект при обработке деталей пяти наименований составил 450,7 тыс. руб.

#### Список литературы

- Лутянин А. В., Марголит Р. Б., Назаров Ю. Ф. Практика применения аэростатических приспособлений на Рязанском станкостроительном заводе // МГОУ-XXI-Новые технологии. — 2000. — № 5. — С. 14—20.
- Семенов А. П., Воронин Н. А. Вакуумные ионно-плазменные методы формирования рабочих поверхностей подшипников, работающих с газовой смазкой // Вестник машиностроения. — 1979. — № 4. — С. 52—55.
- Жедь В. П. Расчет и конструирование аэростатических опор. — М.: НИИМАШ, 1970. — 92 с.
- Пинегин С. В., Табачников Ю. Б., Сипенков И. Е. Статические и динамические характеристики газостатических опор. — М.: Наука, 1982. — 265 с.

## Математическое описание винтовой линии на сфере\*

д.т.н. Н. А. Чемборисов, И. З. Сунгатов // ИНЭКА, г. Набережные Челны

При неизменном отношении численной величины вектора  $u$  скорости по прямой и вектора  $\omega$  угловой частоты вращения винтовое движение называют обыкновенным, а само отношение — параметром  $p$  обыкновенного винтового движения:

$$p = \bar{u}/\bar{\omega}. \quad (1)$$

\* Окончание. Начало см. в № 1 за 2010 г.

Кинематическим винтом называют совокупность двух векторов  $\bar{\omega}$  и  $\bar{u}$ , которую обозначают в виде:  $(V, \omega, u)$ . Если задан винт, то известно винтовое движение, и наоборот. При  $u = 0$  получаем  $p = 0$  и имеем только вращение вокруг оси, которое обозначают:  $V, \omega$ ; при  $\omega = 0$  получаем  $p = \infty$  и имеем только поступательное движение по прямой.

Обозначим: скорости как функции времени  $t$ , т. е.  $u = u(t)$  и  $\omega = \omega(t)$ ; величину перемещения по

прямой через  $h$ ; величину угла поворота прямой вокруг оси винта через  $\phi$ . Тогда будем иметь:  $dh/dt = u(t)$ ;  $d\phi/dt = \omega(t)$ ;  $p = u/\omega = \text{const}$ . В результате (после преобразований):

$$dh = pd\phi; \quad h = p\phi; \quad p = h/\phi. \quad (2)$$

При повороте на 1 рад,  $\phi = 1$ , точка перемещается по прямой на расстояние  $p$ , в этом случае параметр винта называют приведенным шагом прямой линии. При повороте на угол  $\phi = 2p$  соответствующее перемещение в поступательном движении  $H = 2\pi p$ , называемое шагом винта.

Если в винтовом движении отношение перемещения  $h$  при движении по прямой к соответствующему углу поворота  $\phi$  есть величина постоянная, то:

$$\frac{h}{\phi} = C; \quad h = C\phi; \quad \frac{dh}{dt} = C\frac{d\phi}{dt}. \quad (3)$$

Следовательно,  $u/\omega = C$ . Траектория точки с постоянной величиной параметра винта — обыкновенная винтова линия. Та же сама траектория получается, если в винтовом движении поступательное и вращательное движение равномерные.

Если в сложном движении, состоящем из движения точки по прямой и вращение последней вокруг оси, параллельной прямой, параметр винта  $p = u(t)/\omega(t)$  будет величиной переменной, зависящей от времени  $t$ , то траектория точки также будет находиться на круглом цилиндре, образованном вращением прямой, которую называют цилиндрической винтовой линией с аксиально-переменным шагом.

Приняв ось  $V$  винта за ось  $OZ$  правой декартовой системы координат, в простейшем случае имеем:  $\phi = \omega t$ ;  $h = ut$ ;  $u = p\omega$ . Тогда уравнение обыкновенной винтовой линии (см. рис. 4) в параметрической форме примет вид:

$$\left. \begin{array}{l} x = a\cos\phi \\ y = a\sin\phi \\ z = p\phi. \end{array} \right\} \quad (4)$$

Проекция винтовой линии на координатную плоскость  $Oxy$  — окружность:

$$x = a\cos\phi; \quad y = a\sin\phi; \quad x^2 + y^2 = a^2. \quad (5)$$

Проекция на плоскость  $Oyz$  — синусоида:  $y = a\sin\phi$ ;  $z = p\phi$  или  $y = a\sin(z/p)$ . Проекция на плоскость  $Oxz$  — косинусоида (смещенная синусоида):  $x = a\cos\phi$ ;  $z = p\phi$  или  $x = a\cos(z/p)$ . Если ис-

ключить  $\phi = z/p$  из системы уравнений, то винтовую линию можно рассматривать как пересечение круглого цилиндра ( $x^2 + y^2 = a^2$ ) и прямого геликоида (коноида) [ $y = xtg(z/p)$ ].

В работе [5] винтовая линия получена пересечением прямого геликоида и исходной инструментальной поверхности. Координаты винтовой линии находят совместным решением системы уравнений прямого геликоида и исходной инструментальной поверхности.

Прямой геликоид образуют вращательным и одновременно поступательным движением вдоль оси винта прямолинейной образующей  $L$  пересекающей ось винта под прямым углом; при этом поверхность можно задать начальным положением образующей и направляющей, т. е. цилиндрической винтовой линией, которую называют гелисой. Вследствие того, что прямолинейные образующие пересекают ось и винтовую направляющую, оставаясь параллельными одной и той же плоскости, перпендикулярной к оси геликоида прямой геликоид так же называют прямым коноидом (рис. 5).

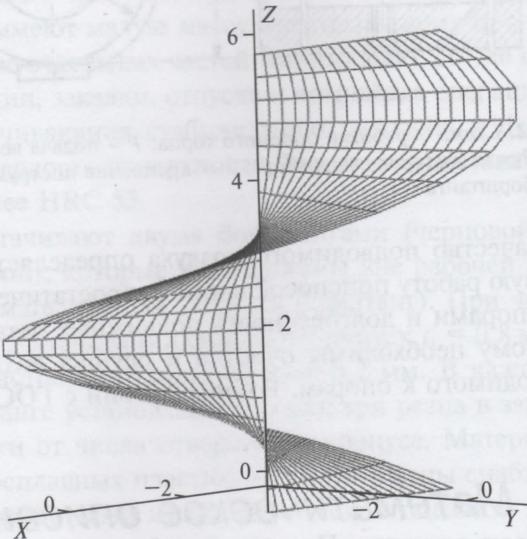


Рис. 5. Прямой геликоид

Уравнение прямого геликоида в параметрическом виде:

$$\left. \begin{array}{l} x = p\cos\phi \\ y = p\sin\phi \\ z = p\phi. \end{array} \right\} \quad (6)$$

Решение вопроса о нахождении общих винтовых линий на любой поверхности вращения  $F(x, y, z) = 0$  приводит к решению дифференци-

ального уравнения 1-го порядка в неявном виде. Если обозначить длину дуги через  $s$  и соответствующую ее проекцию на плоскость  $OXY$  через  $\sigma$ , то длина дуги одного витка винтовой линии определяется уравнением:

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} = \sqrt{d\sigma^2 + dz^2}, \quad (7)$$

т. е. длина одного витка винтовой линии равна гипотенузу треугольника, один катет которого равен длине  $C$  окружности основания, а другой — шагу  $h$  винтовой линии.

Если при помощи интегрирования уравнение (7) выразить через  $\sigma$ , то уравнение винтовой линии в параметрической форме примет вид:

$$\begin{cases} x = x(\sigma) \\ y = y(\sigma) \\ z = p\sigma. \end{cases} \quad (8)$$

Уравнение (8) облегчает решение вопроса о нахождении общих винтовых линий на любой поверхности вращения. В случае произвольной поверхности вращения задачу решают в квадратурах.

Траекторию точки  $M$  (см. рис. 5), совершающей сложное движение [состоящее из движения точки по прямой, параллельной оси  $OZ$  со скоростью  $u(t)$ , и из движения этой прямой (которая остается параллельной самой себе), а одна ее фиксированная точка перемещается по заданной кривой в плоскости  $OXY$  со скоростью  $v(t)$ ] называют общей винтовой линией. Отношение скоростей — величина постоянная:

$$u(t)/v(t) = p = \text{const}. \quad (9)$$

Перемещение точки  $M$  по прямой, параллельной оси  $OZ$ , пропорционально перемещению проекции точки по плоской кривой и длина дуги винтовой линии пропорциональна длине, соответствующей дуге проекции винтовой линии на плоскость  $OXY$  (рис. 6).

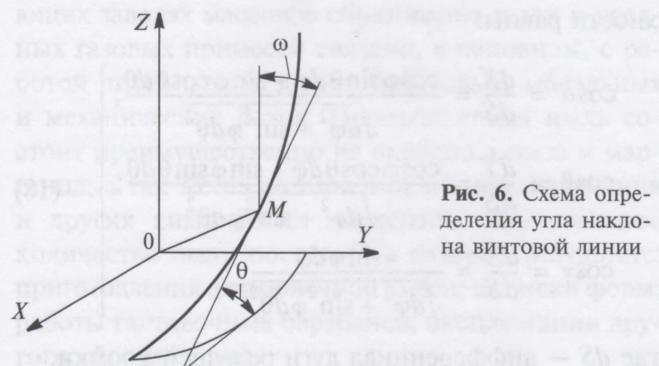


Рис. 6. Схема определения угла наклона винтовой линии

Касательная с осью  $OZ$  образует угол  $\omega$  наклона винтовой линии:

$$\cos \omega = p / \sqrt{1 + p^2}. \quad (10)$$

Отсюда получаем геометрический смысл постоянного параметра  $p$ :

$$\operatorname{tg} \omega = 1/p. \quad (11)$$

Следовательно:

$$p = \operatorname{tg} \theta, \quad (12)$$

где  $\theta = (\pi/2 - \omega)$  — угол подъема винтовой линии.

Угол  $\omega$  оказывает большое влияние на эффективность процесса обработки и предназначен для обеспечения равномерности фрезерования, направления отвода стружки и упрочнения режущей кромки. При увеличении  $\omega$  от  $5^\circ$  до  $20^\circ$  амплитуда колебаний уменьшается в 3 раза и увеличивается эффективность фрезерования, что в конечном итоге повышает стойкость борфрез [6]. На повышение стойкости борфрез также существенно влияет увеличение переднего угла  $\gamma_t$  в нормальном сечении, которое находится в зависимости от угла  $\omega$  наклона винтовой линии [7] (рис. 7).

$$\gamma_t = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \gamma_n \cos \omega), \quad (13)$$

где  $\gamma_t$  — передний угол в торцовом сечении.

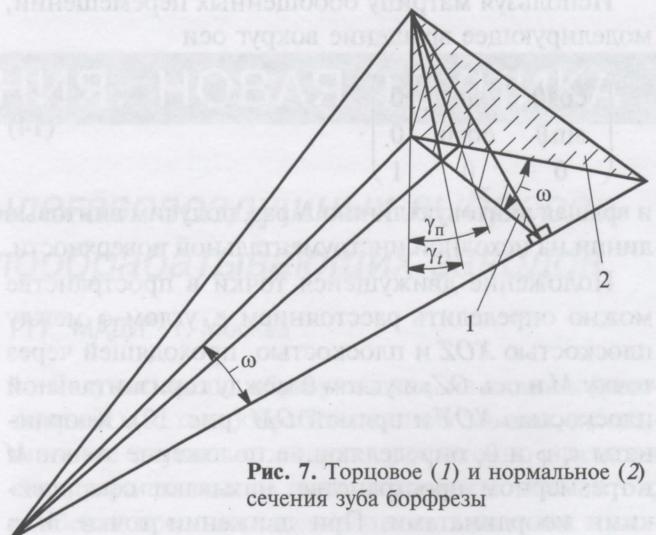


Рис. 7. Торцовое (1) и нормальное (2) сечения зуба борфрезы

Задача, связанная с пересечением поверхностей, является наиболее значительной с теоретической и практической точек зрения; основные методики решения этой задачи используют на промышленных предприятиях. Линию, общую для обеих пересекающихся поверхностей, называют ли-

нией пересечения. Построение линий пересечения и их разметка является одной из главных и сложных инженерных задач. Линия пересечения сферы с цилиндром (рис. 8) (ось этой линии смешена на расстояние, равное половине радиуса сферы) также является винтовой линией с постоянным параметром  $p = u/v = 1$ . При  $p > 1$  винтовая линия представляет собой локсодрому (локсодромию или локсодромную кривую). Локсодрома пересекает все меридианы тел вращения любой формы под одним и тем же углом. При изменении  $p$  от 1 до 0 угол  $\omega$  наклона винтовой линии изменяется от  $45^\circ$  до  $0^\circ$  (рис. 9), образуя в конечном итоге меридиану.

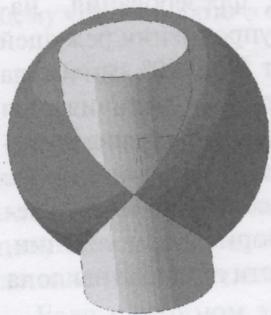


Рис. 8. Пересечение сферы с цилиндром

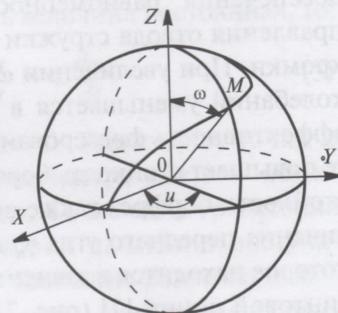


Рис. 9. Винтовая линия на сфере

Используя матрицу обобщенных перемещений, моделирующее вращение вокруг оси

$$\begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

и вращая винтовую линию  $N$  раз, получим винтовые линии на исходной инструментальной поверхности.

Положение движущейся точки в пространстве можно определить расстоянием  $r$ , углом  $\varphi$  между плоскостью  $XOZ$  и плоскостью, проходящей через точку  $M$  и ось  $OZ$ , и углом  $\theta$  между горизонтальной плоскостью  $XOY$  и прямой  $OM$  (рис. 10). Координаты  $r$ ,  $\varphi$  и  $\theta$ , определяющие положение точки  $M$  в трехмерном пространстве, называют сферическими координатами. При движении точки  $M$  в пространстве в общем случае ее сферические координаты  $r$ ,  $\varphi$  и  $\theta$  изменяются с течением времени (см. рис. 10):

$$\left. \begin{array}{l} r = r(t) \\ \varphi = \varphi(t) \\ \theta = \theta(t) \end{array} \right\}. \quad (15)$$

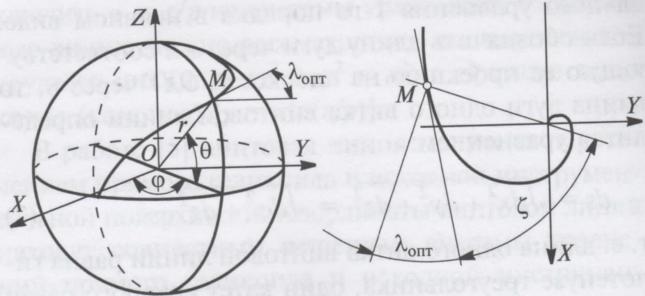


Рис. 10. Движение точки  $M$  на сфере

Уравнение (15) называют уравнением движения точки в сферических координатах; если исключить время  $t$ , то получим траекторию движущейся точки  $M$  (см. рис. 10).

Радиус-вектор  $r$  текущей точки исходной инструментальной поверхности зависящий от параметров  $R$  (см. рис. 3),  $\varphi$  и  $\theta$ , равен:

$$r = \begin{bmatrix} R\sin\varphi\cos\theta \\ R\sin\varphi\sin\theta \\ R\cos\varphi \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Уравнением режущей кромки является уравнение кривой, расположенной на исходной инструментальной поверхности и пересекающей меридианы под углом  $\zeta = \pi/2 - \lambda_{\text{опт}}$  (см. рис. 10).

Уравнение некоторой линии на сфере в параметрическом виде имеет вид:

$$\theta = \theta(\varphi). \quad (17)$$

При  $\theta = 0^\circ$  эти линии являются меридианами, а при  $\theta = 90^\circ$  — параллелями.

Косинусы углов между осями системы координат  $XOY$  инструмента и касательной прямой к кривой  $\theta = \theta(\varphi)$  на исходной инструментальной поверхности равны:

$$\left. \begin{array}{l} \cos\alpha = \frac{dX}{dS} = \frac{\cos\varphi\sin\theta d\varphi + \sin\varphi\cos\theta d\theta}{\sqrt{d\varphi^2 + \sin^2\varphi d\theta^2}}; \\ \cos\beta = \frac{dY}{dS} = \frac{\cos\varphi\cos\theta d\varphi - \sin\varphi\sin\theta d\theta}{\sqrt{d\varphi^2 + \sin^2\varphi d\theta^2}}; \\ \cos\gamma = \frac{dZ}{dS} = \frac{-\sin\varphi d\varphi}{\sqrt{d\varphi^2 + \sin^2\varphi d\theta^2}}, \end{array} \right\} \quad (18)$$

где  $dS$  — дифференциал дуги режущей кромки.

В частном случае при  $\theta = \text{const}$  уравнение (18) примет вид:

$$\left. \begin{array}{l} \cos\alpha = \frac{dX}{dS} = \cos\phi\sin\theta \\ \cos\beta = \frac{dY}{dS} = \cos\phi\cos\theta \\ \cos\gamma = \frac{dZ}{dS} = -\sin\theta. \end{array} \right\}$$

Исходя из условия постоянства косинуса угла между касательной к режущей кромке и касательной к меридиану на поверхности РИ, имеем:

$$\frac{d\phi}{\sqrt{d\phi^2 + \sin^2\phi d\theta^2}} = \cos m \text{ или}$$

$$\frac{d\phi}{\sin\phi} = \pm ctg m d\theta, \quad (19)$$

где  $m$  — некоторый угол.

Проинтегрировав уравнение (19), получим:

$$\operatorname{tg}(\phi/2) = e^{q(\theta+C)}, \quad (20)$$

где  $q = \pm ctgm$ ;  $C$  — произвольная константа.

Применив формулы приведения, приходим к результату:

$$\sin\phi = \frac{1}{\operatorname{ch} q(\theta+C)}; \quad \cos\phi = \operatorname{th} q(\theta+C). \quad (21)$$

При условии  $\theta = \lambda_{\text{опт}}$ , имеем:

$$\left. \begin{array}{l} X = \frac{R\sin\lambda_{\text{опт}}}{\operatorname{ch} q(\lambda_{\text{опт}}+C)}, \\ Y = \frac{R\cos\lambda_{\text{опт}}}{\operatorname{ch}(\lambda_{\text{опт}}+C)}, \\ Z = R\operatorname{th} q(\lambda_{\text{опт}}+C). \end{array} \right\} \quad (22)$$

Уравнение (22) является уравнением режущей кромки в параметрической форме.

### Список литературы

5. Борисов С. В. Разработка фасонных концевых фрез с винтовыми стружечными канавками на криволинейной поверхности вращения. — М.: Изд-во МГТУ "Станкин", 1998. — 197 с.

6. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. — Л.: Машиностроение, 1986. — 147 с.

7. Сахаров Г. Н. Металлорежущие инструменты. — М.: Машиностроение, 1989. — 187 с.

## ОТКРЫТИЯ. ИЗОБРЕТЕНИЯ. НОВАЯ ТЕХНИКА

### Очистка и обезвреживание пылегазовоздушных выбросов станкостроительных и металлообрабатывающих заводов

к.т.н. В. В. Буренин // ГТУ "МАДИ", г. Москва

На станкостроительных и металлообрабатывающих заводах массовое образование пыли и вредных газовых примесей связано, в основном, с работой литейных, кузнечно-прессовых, модельных и механических цехов. Промышленная пыль состоит преимущественно из оксидов железа и марганца, а так же из соединений магния, алюминия и других химических элементов. Значительное количество пыли поступает в воздух в результате: приготовления формовочной смеси; выбивки форм; работы галтовочных барабанов; эксплуатации другого оборудования.

Летучая пыль, образующаяся на станкостроительных и металлообрабатывающих заводах, в большинстве случаев отличается достаточно высоким содержанием целого ряда химических элементов; особенно вредными для человека, животных и растений являются тяжелые металлы, поступающие в окружающую среду в виде тонких аэрозолей. Тяжелые металлы являются протоплазматическими ядами, токсичность которых возрастает по мере увеличения атомной массы. Токсичность тяжелых металлов проявляется по-разному. Многие тяжелые металлы (медь, ртуть) при высоких уровнях