

Факторы и параметры процесса резания

(Обзор отечественных и международных стандартов)

Маслов А.Р., д.т.н., профессор МГТУ имени Н.Э. Баумана

По мере роста требований к технике создаются все более твердые и прочные материалы. Эти параметры материала, подвергаемого обработке резанием, влияют на протекание процесса взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемой заготовкой в сторону увеличения сопротивления, которое оказывает режущему инструменту такой материал. обрабатывающему его

Это вызывает необходимость включения в состав режимных факторов тех параметров механических свойств обрабатываемых материалов, которые качественно и количественно влияют на уровень практических режимов обработки режущими инструментами [1].

1. Обозначения факторов и параметров процессов резания

В стандартах и современной литературе все чаще используются нижеприведенные обозначения факторов и параметров процессов резания. Для упрощения расчета величины потребляемой мощности для каждой группы обрабатываемых материалов приводится коэффициент $k_{c1.1}$, который представляет собой удельную силу резания при срезании стружки со средней толщиной, равной 1 мм. При других толщинах стружки используется показатель степени m_c для вычисления удельной силы резания k_c

Например величина потребляемой мощности P_c (кВт), необходимая для выполнения перехода точения (рис. 1) поверхности диаметром D_m (мм) при частоте вращения заготовки n (мин⁻¹), вычисляется по формуле:

$$P_c = V_c \cdot a_p \cdot f_n \cdot k_c / 60 \times 10^3, \quad (1)$$

где V_c – скорость резания, (м/мин) при частоте вращения; a_p – глубина резания (мм); f_n – подача, мм/об; $k_c = k_{c1.1} \cdot a_p^{-m_c}$ ($k_{c1.1}$ – характеристика

обрабатываемого материала (Н/мм^2), которая представляет собой силу резания F_c , необходимую для срезания стружки толщиной 1 мм; m_c – показатель степени.

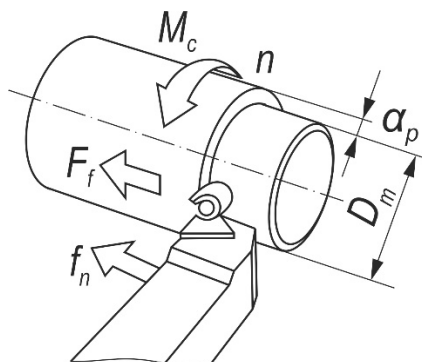


Рис. 1. Факторы и параметры перехода продольного точения

Для перехода торцового фрезерования (рис. 2) фрезой диаметром D_ϕ (мм), вращающейся с частотой n (мин^{-1}), формула расчета мощности с учетом обозначений формулы (1) имеет вид:

$$P_c = a_p \cdot a_e \cdot V_f \cdot k_{c1.1} / 60 \times 10^6, \quad (2)$$

где a_e – ширина резания (мм); V_f – скорость подачи (например, подачи стола) (мм/мин).

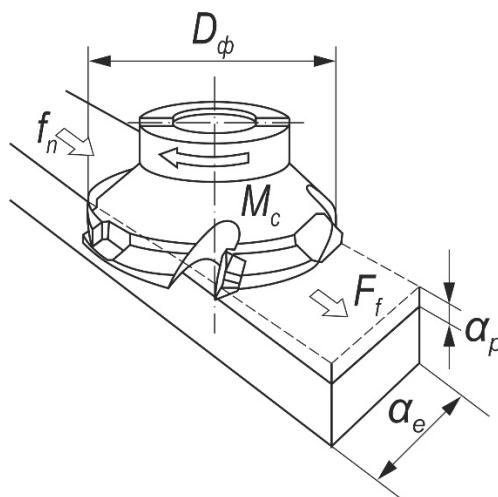


Рис. 2. Факторы и параметры перехода торцового фрезерования

Для перехода сверления (рис. 3) сверлом диаметром D_c (мм), вращающимся с частотой n (мин^{-1}), расчет мощности выполняется по формуле:

$$P_c = f_n \cdot V_c \cdot D_c \cdot k_{c1.1} / 240 \cdot 10^3, \quad (3)$$

где $V_c = \pi \cdot D_c \cdot n / 1000$; D_c – диаметр сверла, мм; n – частота вращения сверла, мин⁻¹.

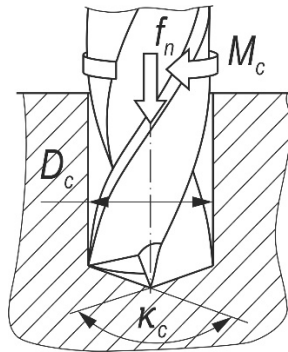


Рис. 3. Факторы и параметры перехода сверления

Крутящий момент M_c (Н·м) передаваемый от шпинделя станка режущему инструменту в процессе обработки:

$$M_c = 30P_c \cdot 10^3 / \pi n \quad (4)$$

При точении сила подачи F_f (Н) приближенно рассчитывается по формуле:

$$F_f = k_c \cdot a_p \cdot f_n, \quad (5)$$

При фрезеровании сила подачи F_f приближенно рассчитывается по формуле:

$$F_f = k_c \cdot a_p \cdot a_e \cdot f_n / \pi D_\phi, \quad (6)$$

где D_ϕ – диаметр фрезы.

При сверлении сила подачи F_f рассчитывается по формуле:

$$F_f = 0,25 \cdot D_c \cdot k_c \cdot f_n \cdot \sin \kappa_c, \quad (7)$$

где κ_c – угол при вершине спирального сверла (см. рис. 3).

2. Обозначение основных групп обрабатываемых материалов

Во многих областях машиностроения, в частности в аэрокосмической и автомобильной промышленности, все шире применяются конструкционные материалы с такими свойствами, как низкая изнашиваемость в среде, вызывающей коррозию, высокая теплостойкость, повышенная механическая прочность и малая удельная плотность. Разработаны такие высокопрочные материалы, как коррозионностойкие и высоколегированные стали, чугуны с шарообразным графитом,

комбинированные слоистые материалы из легких металлов, а также жаропрочные сплавы на базе Ni и Ti.

Изготовление деталей из этих материалов требует соответствующей технологической подготовки. Время обработки сокращается за счет комплексной и многосторонней обработки на многоцелевых станках. За счет высокоскоростной обработки повышается производительность из-за более высокой мощности резания, а также улучшения качества обработанной поверхности в связи с заметным уменьшением силы резания.

Для защиты окружающей среды требуется сокращение использования смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), которые обычно выполняют отвод тепла и стружки в процессе резания. Как альтернатива в 20 % случаев обработки резанием применяется «сухая» обработка и смазка минимальным количеством специальных средств.

Внедрение этих инноваций в технологии механической обработки вызывает дальнейшее развитие модификаций режущих твердых сплавов и режущей керамики, а также совершенствованием методов нанесения износостойких покрытий.

В соответствии со стандартом ISO 513–2012 «Материалы твердые инструментальные для обработки резанием. Обозначение основных групп резания и групп применения» все конструкционные материалы классифицируются по такому же принципу (рис. 4). Всем им присвоены коды MC (Material Code).

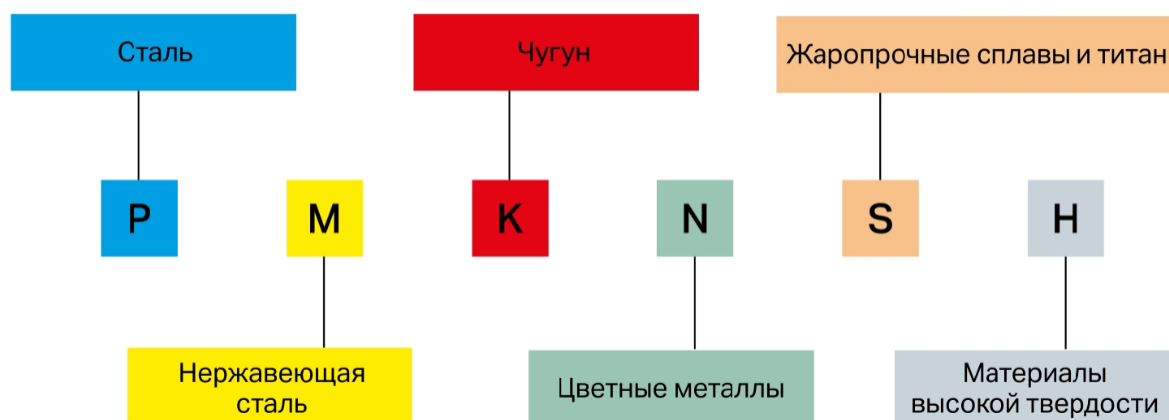


Рис. 4. Классификация обрабатываемых материалов

В группу **P** обрабатываемых материалов входят различные виды сталей (табл. 1).

Сталь может быть незакаленной, закаленной или отпущенной, твердостью до 400НВ. В нелегированных сталях содержание углерода не превышает 0,8%. Остальной состав – железо без добавления легирующих элементов. В легированных сталях содержание углерода не превышает 1,7%, и помимо железа присутствуют легирующие элементы, такие как Ni, Cr, Mo, V, W.

1. Группа **P** обрабатываемых материалов

ISO	Код MC	Материал
P	<i>P1</i>	Нелегированная сталь
	<i>P2</i>	Низколегированная сталь (легирующих элементов $\leq 5\%$)
	<i>P3</i>	Высоколегированная сталь (легирующих элементов $> 5\%$)
	<i>P4</i>	Порошковые стали
	<i>P5</i>	Ферритная/мартенситная нержавеющая сталь

Особенности обработки материалов группы P: а) длинная стружка; б) относительно легко обрабатывается; в) низкоуглеродистая сталь склонна к налипанию и требует острых режущих кромок; г) удельная сила резания $k_{cl.1} = 1500-3100 \text{ Н/мм}^2$; д) сила резания, а следовательно, и мощность, необходимая для обработки материалов ISO P, остается в пределах ограниченного диапазона.

В группу **M** входят (табл. 2) различные виды нержавеющих (коррозионно-устойчивых) сталей. В нержавеющей стали содержится не менее 11-12 % хрома. Содержание углерода очень низкое (от 0,01 %). Основными легирующими элементами являются Ni (никель), Mo (молибден) и Ti (титан). Образующийся на поверхности слой оксида хрома Cr_2O_3 придает стали стойкость к коррозии.

2. Группа *M* обрабатываемых материалов

ISO	Код MC	Материал
<i>M</i>	<i>M1</i>	Аустенитная нержавеющая сталь
	<i>M2</i>	Супер-аустенитная, Ni ≥ 20 %
	<i>M3</i>	Дуплексная (аустенитно-ферритная)

Особенности обработки материалов группы M: а) длинная стружка; б) приемлемый контроль над стружкодроблением у ферритной стали, затрудненное стружкообразование у аустенитной и дуплексной сталей; в) удельная сила резания $k_{cl.l} = 1800-2850 \text{ Н/мм}^2$; г) обработка сопровождается высокими силами резания, наростом на режущей кромке, высокой температурой в зоне резания и поверхностным деформационным упрочнением.

В группу *K* входят (см. табл. 3) различные виды чугуна, к которым относятся 3 основных типа чугуна: серый (международное обозначение – GCI), с шаровидным (NCI) и вермикулярным графитом (CGI). Чугун – сплав железа с углеродом, характеризующийся относительно высоким содержанием кремния Si (1-3%). Содержание углерода превышает 2%, что является максимальной растворимостью углерода в аустенитной фазе. Cr (хром), Mo (молибден) и V (ванадий) образуют карбиды, повышающие прочность и твердость, но ухудшающие обрабатываемость.

3. Группа *K* обрабатываемых материалов

ISO	Код MC	Материал
<i>K</i>	<i>K1</i>	Ковкий чугун
	<i>K2</i>	Серый чугун
	<i>K3</i>	Чугун с шаровидным графитом
	<i>K4</i>	Чугун с вермикулярным графитом
	<i>K5</i>	Отпущенный ковкий чугун

Особенности обработки: а) материал, дающий короткую стружку; б) хороший контроль над стружкодроблением в любых условиях; в) удельная сила резания $k_{cl.1} = 790-1350 \text{ Н/мм}^2$; г) обработка на высоких скоростях вызывает абразивный износ инструмента; д) умеренные силы резания.

В группу *N* входят (табл. 4) сплавы твердостью менее 130 НВ, среди которых: а) алюминиевые сплавы (Al) с содержанием кремния (Si) до 22%, составляющие большую часть этой группы материалов; б) магниевые сплавы; в) медные сплавы; г) сплавы на основе цинка и бериллия. Также в эту группу включены такие неметаллические материалы, как резины и пластмассы.

4. Группа *N* обрабатываемых материалов

ISO	Код МС	Материал
<i>N</i>	<i>N1</i>	Сплавы на основе алюминия
	<i>N2</i>	Сплавы на основе магния
	<i>N3</i>	Сплавы на основе меди
	<i>N4</i>	Сплавы на основе цинка
	<i>N5</i>	Сплавы на основе бериллия
	<i>N6</i>	Резины и пластмассы

Особенности обработки: а) длинная стружка; б) относительно простой контроль над стружкообразованием при условии легирования; в) цветные металлы на основе Al склоны к налипанию, поэтому при обработке требуются острые режущие кромки; г) удельная сила резания $k_{cl.1} = 350-700 \text{ Н/мм}^2$; д) сила резания, а следовательно, и мощность, необходимая для обработки материалов группы *N*, остается в пределах ограниченного диапазона.

В группу *S* обрабатываемых материалов входят (табл. 5) жаропрочные сплавы, включающие в себя множество высоколегированных материалов на основе железа, никеля, кобальта, титана, вольфрама и молибдена. К

свойствам этих сплавов относится повышенное содержание легирующих элементов (кобальта больше, чем никеля), которые обеспечивают повышенную жаропрочность, прочность на растяжение и стойкость к коррозии.

5. Группа *S* обрабатываемых материалов

ISO	Код МС	Материал
<i>S</i>	<i>S1</i>	Сплавы на основе железа
	<i>S2</i>	Сплавы на основе никеля
	<i>S3</i>	Сплавы на основе кобальта
	<i>S4</i>	Сплавы на основе титана
	<i>S5</i>	Сплавы на основе вольфрама
	<i>S6</i>	Сплавы на основе молибдена

Особенности обработки: а) сложности с контролем стружкодробления; б) на керамических СМП требуется отрицательный главный передний угол, на твердсплавных – положительный; в) удельная сила резания для жаропрочных сплавов $k_{cl.1} = 2400-3100 \text{ Н/мм}^2$; для титановых сплавов – 1300-1400 Н/мм²; г) требуются большие силы резания и мощность.

В группу *H* собраны различные обрабатываемые материалы, которые характеризуют высокая твердость (табл. 6). К ним относятся закаленные и отпущенные стали с твердостью > 45-65 HRC, отбеленные чугуны, стеллиты и твердые сплавы. Как правило, материалы этой группы имеют твердость в диапазоне 55-68 HRC.

6. Группа *H* обрабатываемых материалов

ISO	Код МС	Материал
<i>H</i>	<i>H1</i>	Сталь (45-65 HRC)
	<i>H2</i>	Отбеленный чугун

	<i>H3</i>	Стеллиты
	<i>H4</i>	Ferro-TiC (порошковая металлургия)

Особенности обработки: а) приемлемый контроль над стружкодроблением; б) требуются отрицательные передние углы; в) удельная сила резания $k_{cl.1} = 2550-4870 \text{ Н/мм}^2$; г) требуются довольно большие силы резания и мощность.

В последнее время растут объемы производства композиционных материалов под общим названием CERP (Carbon Fibre Reinforced Polymers), включающих углеродные волокна диаметром около 5–10 мкм, состоящие из углеродного композита, таких как усиленный углерод-углерод (композитный материал на основе графита), кованое углеродное волокно, углерод-керамику и карботаний. Поэтому перечисленные выше группы обрабатываемых материалов стали дополнять группой **O** от английского “Other” (табл. 7).

7. Группа **O** обрабатываемых материалов

ISO	Код МС	Композиционные материалы с полимерной матрицей
O	<i>O1</i>	Термостойкие углепластики
	<i>O2</i>	Стеклопластики
	<i>O3</i>	Боропластики
	<i>O4</i>	Гибридные (гетеропластики)

Структура кода МС представляет собой комбинацию букв и цифр, с помощью которой зашифрованы различные свойства и характеристики обрабатываемого материала. Например код **P1.2.Z.AN** расшифровывается следующим образом: **P** = код ISO для стали; **1** = группа материалов: нелегированные стали; **2** = подгруппа сталей с содержанием углерода 0,25... 0,55 процентов; **Z** = метод получения заготовки: поковка/прокат/холоднотянутая; **AN** = термообработка: отжиг, с указанием полученной твердости.

В другом примере код **N1.3.C.UT** расшифровывается так: **N** = код ISO; **1** = группа материалов: сплавы на основе алюминия; **3** = подгруппа материалов: сплавы с содержанием Si до 13%; **C** = метод получения заготовки: отливка; **UT** = без обработки

Характеристики обрабатываемых материалов в соответствии со стандартом ISO 513-2012 (ГОСТ Р ИСО 513-2019) с указанием кодов МС, значений $k_{c1.1}$ – характеристик обрабатываемых материалов (Н/мм²) и показателей степени m_c приведены в табл. 8.

8. Характеристики обрабатываемых материалов

Группа	Обрабатываемый материал		Состояние перед обработкой	Прочность σ_B , Н/мм ²	$k_{c1.1}$	m_c	Твердость НВ	Код МС
Р	Конструкционная сталь, стальное литье, автоматная сталь	< 0,25 % С	Отожженная	420	1350	0,2 1	125	P1
		>= 0,25 % С	Отожженная	650	1500	0,2 2	190	
		< 0,55 % С	Закаленная и отпущенная	850	1675	0,2 4	250	
		>= 0,55 % С	Отожженная	750	1700	0,2 4	220	
			Закаленная и отпущенная	1000	1900	0,2 4	300	
	Низколегированная сталь и стальное литье (содержание легирующих компонентов менее 5%)		Отожженная	600	1775	0,2 4	200	P2
			Без ТО	930	1675	0,2 4	275	
			Закаленная и отпущенная	1000	1725	0,2 4	300	
			Литье	1200	1800	0,2 4	350	
	Легированная сталь, стальное литье, инструментальная сталь		Отожженная	680	2450	0,2 3	200	P3
			Закаленная и отпущенная	1100	2500	0,2 3	325	
М	Нержавеющая сталь и стальное литье		Ферритная/мартенситная	680	1875	0,2 1	200	P5
			Мартенситная	820	1875	0,2 1	240	M1
			Аустенитная	600	2150	0,2 0	180	
К	Серый чугун (GG)		Перлитный/ферритный	-	1150	0,2 0	180	K2
			Перлитный/мартенситный	-	1350	0,2 8	260	
	Чугун с шаровидным графитом (GGG)		Ферритный	450	1225	0,2 5	160	K3
			Перлитный	560	1350	0,2 8	250	
	Ковкий чугун		Ферритный	380	1225	0,2 5	130	K1

Группа	Обрабатываемый материал	Состояние перед обработкой	Прочность σ_B , Н/мм ²	$k_{c1.1}$	m_c	Твердость HB	Код MC
		Перлитный	980	1420	0,3	230	
N	Деформируемые алюминиевые сплавы	Неструктурированные	450	700	0,25	60	N1
		Структурированные	500	800	0,25	100	
	Литейные алюминиевые сплавы	$\leq 12\% \text{ Si}$ Неструктурированные	200	700	0,25	75	
		Структурированные	350	700	0,25	90	
		$> 12\% \text{ Si}$ Жаропрочные	500	750	0,25	130	
	Медные сплавы	$> 1\% \text{ Pb}$ Свинцовая бронза	250	700	0,27	110	N3
		Латунь	400	700	0,27	90	
		Электролитическая медь	200	700	0,27	100	
	Неметаллические материалы	Дюропласт, волокниты	680				O
		Твердая резина					
S	Жаропрочные сплавы	Fe-основа Отожженная	700	2600	0,24	200	S1
		Структурированные	950	3100	0,24	280	
	Ni- или Co-основа	Отожженная	780	3300	0,24	250	S2
		Структурированные	900	3300	0,24	350	
		Литье	900	3300	0,24	320	
	Титан и титановые сплавы	Без ТО	RM 400	1700	0,23		S4
		Альфа+бета структур. сплавы	RM 1050	2110	0,22		
H	Закаленная сталь	Закаленная	1620	4600		55 HRc	H1
		Закаленная	1960	4700		60 HRc	
	Отбеленный чугун	Литье	740	4600		400	H2
	Чугун	Закаленный		4500		55 HRc	

3. Унификация обозначений размерных параметров инструмента

Для практической реализации на ЭВМ действующих алгоритмов проектирования технологических процессов [1] в части выбора инструмента необходимо раскрыть содержание каждого блока, составив частные алгоритмы в удобной форме изложения для последующего программирования.

На этом этапе работы условия выбора инструментов и других элементов технологии, а также расчеты режимов, траекторий, эффективности должны

быть изложены с предельной детализацией и определенностью процесса переработки информации.

В соответствии с ГОСТ Р 55341-2012 / ISO/TS 13399-100:2008 предлагается механизм, способный описывать данные о режущих и вспомогательных инструментах, независимо от системы, принятой конкретной инструментальной фирмой.

Этот механизм описания может использоваться для обмена данными при использовании автоматизированных технологий управления жизненным циклом изделия (CALS, CAx). Это может быть обмен данными между автоматизированным проектированием (CAD), автоматизированным производством (CAM), автоматизированным моделированием (CAE), программным обеспечением для управления инструментами, управлением данными о продукции (PDM/EDM), планированием производственных ресурсов (MRP) или планированием ресурсов предприятия (ERP) и другими системами [2].

Предложено установить общую структуру обмена данными о режущих инструментах для: а) представления общей совокупности определений для использования при описании как отдельных режущих инструментов, так и собранных из модулей; б) интеграции и совместного применения этих данных между приложениями программного обеспечения; в) прямого импорта данных об инструментах поставщиков в базы данных машиностроительного предприятия; г) представления правильной текущей информации о режущих инструментах из разных источников.

Можно обмениваться информацией о сменных режущих пластинах, имеющие геометрически правильную и специальную сложную форму [3], о монолитных инструментах (резцы, сверла, концевые фрезы, метчики и т.п.), о сборных инструментах (резцы, сверла, фрезы со сменными режущими пластинами) и о вспомогательном инструменте (базисных агрегатах, оправках, втулках и зажимных патронах).

Описание рабочих режущих инструментов включает не только геометрические данные и данные размерностей, идентификации и назначения, но и данные о запасных частях, режущем материале и возможных соединениях компонентов.

Эти данные являются символами или функциями, которые отображают информацию с использованием правил, указывающих, как следует выполнять конкретную операцию, и словаря для определения терминов, идентифицирующих эти данные [4, 5].

Подразумевается, что каждое машиностроительное предприятие (МП) должно применять одну и ту же информационную модель, одинаковый набор правил и один и тот же словарь во избежание неправильного понимания.

При таком правиле информационная модель становится абстрактной и ее можно использовать многократно для любой ситуации в рамках конкретного МП. После ее заполнения элементами данных и их значениями МП получает конкретный экземпляр модели инструментаобеспечения.

Различия в терминологии среди поставщиков режущего инструмента усложняют сбор и передачу информации. Для упрощения обмена данными о режущих инструментах предлагается стандартизовать обозначения параметров инструментов (рис. 5).

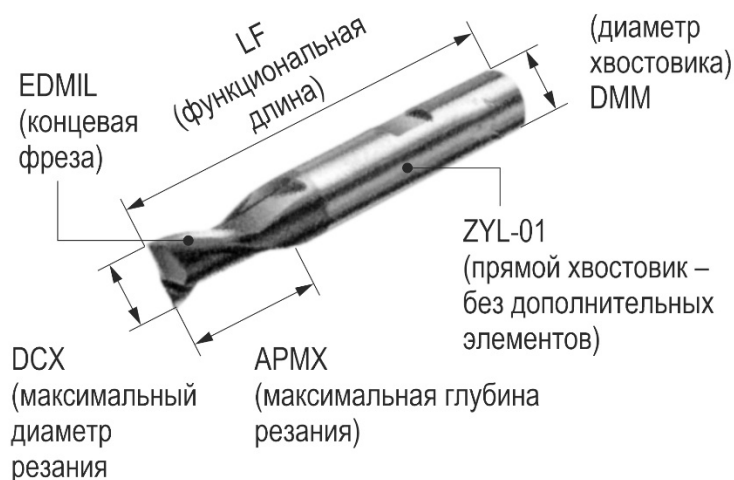


Рис. 5. Пример стандартных обозначения параметров концевой фрезы

Для упрощения обмена информацией. одинаковые параметры и определения всех инструментов на предприятии необходимо унифицировать.

На рис. 6 показано, что у разных поставщиков диаметр торцевой фрезы обозначается по-разному, что очень неудобно для программистов МП. После унификации диаметр обозначается как «DCX».

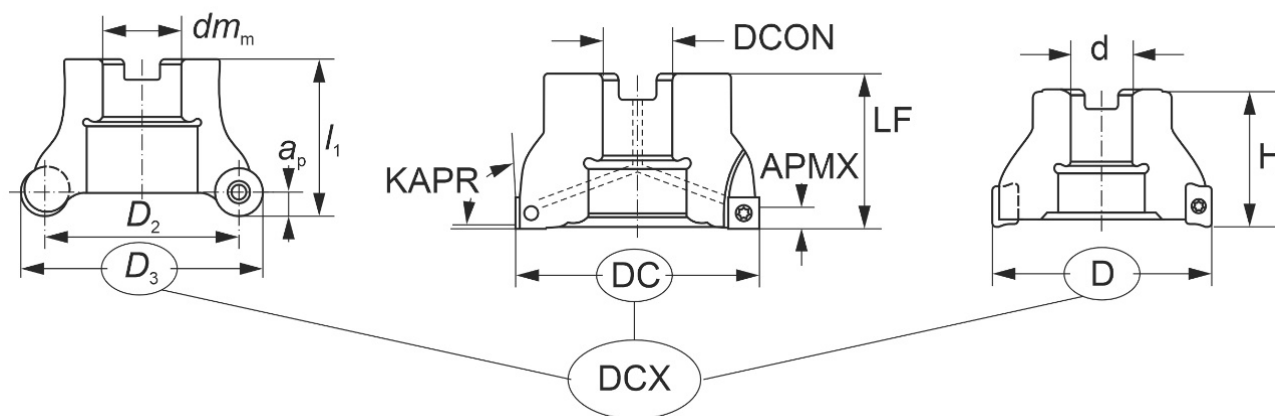


Рис. 6. Унификация обозначения размера при обмене информацией между поставщиками и потребителями инструмента

4. Система классификации инструментальных материалов.

Различия в обозначениях марок применяемых инструментальных материалов разных поставщиков в значительной степени затрудняют автоматизацию инструментального обеспечения в МП.

Поэтому с особой остротой встал вопрос о разработке единой международной системы классификации и стандартизации инструментальных материалов.

На основе всесторонних исследований применимости современных инструментальных материалов на более чем 40 крупных предприятиях разработан стандарт ГОСТ Р ИСО 513-2019 на классификацию и применение твердых режущих материалов для удаления металла путем снятия стружки режущей частью инструмента [6].

Этот стандарт действует с 01.01.2021 и устанавливает обозначения таких твердых режущих материалов, как твердые сплавы, режущая керамика, алмаз и кубический нитрид бора (табл. 9).

9. Обозначения инструментальных материалов

Буквенный символ	Группа материалов
Твердые сплавы	
HW	Твердый сплав без покрытия, основное содержание – карбид вольфрама (WC) с размером зерна ≥ 1 мкм
HF	Твердый сплав без покрытия, основное содержание – карбид вольфрама (WC) с размером зерна < 1 мкм
HT	Твердый сплав без покрытия, основное содержание – TiC или TiN, или оба (керметы)
HC	Твердые сплавы и керметы, указанные выше, с покрытиями
Керамика	
CA	Керамика на основе оксида алюминия Al_2O_3
CR	Керамика, основное содержание Al_2O_3 упрочненная
CM	Смешанная керамика на основе оксида алюминия + карбиды металлов
CN	Керамика на основе нитрида кремния Si_3N_4
CC	Керамики, указанные выше, но с покрытием
Алмазы	
DM	Монокристаллический алмаз
DD	Поликристаллический алмаз без связки
DP	Поликристаллический алмаз со связкой
Кубический кристаллический нитрид бора	
BL	С низким содержанием кубического нитрида бора
BH	С высоким содержанием кубического нитрида бора
BC	Кубический кристаллический нитрид бора, как указано выше, но с покрытием

Обозначение твердых режущих материалов для указанных групп применения состоит из буквенных символов материалов в соответствии с табл. 9, за которыми следует тире и обозначение группы применения.

Например, твердый сплав без покрытия с основным содержанием карбида вольфрама (WC) и с размером зерна более 1 мкм, предназначенный для обработки заготовок из стали группы применения *P10* обозначается по стандарту ГОСТ Р ИСО 513-2019 как **HW–P10**. Аналогично керамика на основе оксида алюминия Al_2O_3 для обработки чугуна группы применения *K10* обозначается как **CA–K10**.

Предложенные системы классификации и стандартизации инструментальных и обрабатываемых материалов не являются всеобъемлющими, однако они отражают современное состояние обработки резанием и могут быть с большей эффективностью использованы при автоматизированном выборе, проектировании и изготовлении режущих инструментов, а также в системах автоматизированного инструментального обеспечения цифровых машиностроительных производств.

Литература

1. Балла О. М. Инструментальное обеспечение современных станков с ЧПУ. Учебное пособие для вузов, 3-е изд., стер. // Издательство "Лань", 2023 – 200 с.
2. Ли К. Основы САПР. CAD / CAM / CAE / Пер. с англ. - СПб.: Питер Принт, 2004. – 559 с.
3. ISO 1832-2017-1. Indexable inserts for cutting tools — Designation
4. ГОСТ Р 55341-2012 / ISO/TS 13399-100:2008. Представление и обмен данными по режущим инструментам. Часть 100. Определения, принципы и методы использования ссылающегося словаря.
5. ГОСТ Р ИСО 10303-1-99. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Представление данных о продукции и обмен данными. Часть 1. Обзор и основополагающие принципы.
6. ГОСТ Р ИСО 513-2019. Материалы твердые режущие. Классификация и применение. Обозначение групп применения.