УДК 691.43.068.5

ИНСТРУМЕНТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ СВЕРЛЕНИЕМ

Рогов В.А., Велис А.К., Шкарупа М.И.

ФГБОУ ВПО «Российский университет дружбы народов», Москва,
e-mail: vladimirrogov@yandex.ru, shkarupamish@mail.ru

Труднообрабатываемые (ТОМ) и хрупкие твёрдые неметаллические материалы (ХТНМ) характеризуются повышенными эксплуатационными свойствами и особенностью их структуры. До сих пор не существует единого мнения для их классификации и методов механической обработки. В этой работе излагается и дополняется их классификация по обрабатываемости и физико-химическому составу. Лучшим инструментом для обработки ХТНМ являются инструменты на алмазной основе, поэтому в статье описываются возможные способы производства алмазных инструментов, характеристики, преимущества и недостатки при использовании таких инструментов; методы обработки ТОМ и ХТНМ как с металлическими, так и с алмазными свёрлами. Также обоснован выбор и режимы резания для алмазных инструментов в зависимости от вида проводимой операции и типа материала.

Ключевые слова: труднообрабатываемые материалы (ТОМ), пластмассы, обработка материалов сверлением, сверление композитов, классификация материалов, сверление алмазом, сверление синтеграна, сверление стекла, сверление хрупких твердых неметаллических материалов (ХТНМ), алмазные свёрла, гальваническая технология производства свёрл, технология порошковой металлургии, технология вакуумно-диффузионной сварки алмазных зёрен, свёрла «МонАлит»

TOOLS USED IN THE PROCCES OF DRILLING HARD-MACHINING MATERIALS

Rogov V.A., Veliz A.K., Shkarupa M.I.

People's Friendship University of Russia, Moscow,
e-mail: vladimirrogov@yandex.ru, shkarupamish@mail.ru

Hard machining (HMM) and brittle solid nonmetallic materials (BSNM) are characterized by their high performance characteristics and structure peculiarities. So far, there is not a unanimous agreement on their classification and machining methods. In this paper materials are classified by their workability and chemical composition; this classification is complemented. The best tool for machining BSNM is a diamond based tool, so in this paper is described the manufacturing of diamond tools, advantages and disadvantages of methods of machining HMM and BSNM as with conventional drill bits, and diamond drill bits; the selection of diamond tools and their cutting mode depending on the type of work and type of material.

Keywords: hard machining materials, plastics, processing materials, drilling, drilling of composites, classification of materials, drilling, diamond drilling sintegran, epoxy materials, drilling glass, BSNM, drilling brittle solid nonmetallic materials, diamond drill bit, galvanic technology production of drill bits, powder metallurgy technology of drill bits, vacuum diffusion bonding of diamond grains technology, MonAlit drills MonAlit

Все операции резания для особенно труднообрабатываемых материалов (ТОМ) происходят в более тяжелых условиях, чем для классических сталей и металлов, что приводит к преждевременному износу инструментов. Это вынуждает искать новые методы обработок и оптимизировать уже существующие методы (табл. 1) [2].

Для того чтобы проводить опыты и получать общие эмпирические законы для обработки ТОМ, их объединяют по общим характеристикам или свойствам. Ниже приведены две классификации материалов, которые позволяют лучше понимать процесс обработки ТОМ. Сверление в настоящей статье рассматривается как частный случай обработки резанием.

По ГОСТу 5632–72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные» [4] стали и сплавы делят на три группы в зависимости от их химического состава. Однако это разделение не позволяет оценить обрабатываемость материалов. В источниках [6, с. 5], [3, с. 141], [2, с. 8–12] приведена классификация материалов, близких по химическому составу и обрабатываемости из восьми групп (от I до VIII группы). Но позже были добавлены ещё две группы – группа тугоплавких материалов (IX) и стеклопластиков (X). Эта классификация позволяет определять оптимальные режимы резания без применения трудоёмких экспериментальных исследований и заранее предсказать объём затрат на изготовление изделий. Для полного охвата конструкционных материалов мы добавили группу XI.

Обработка композиционных материалов (группа X) имеет ряд особенностей, которые отличают её от обработки металлов: анизотропия свойств материалов; относительная сложность получения высокого качества поверхности после обработки; высокая твёрдость наполнителя и низкая теплопроводность.

Таблица 1

Вертикальные составляющие удельных сил резания (P_z) и контактные температуры (Θ), возникающие при точении различных материалов (s = 0,1 мм/об, t = 1 мм)

Обрабатываемый материал	$\sigma_в$	P_z	Θ (°C) при υ, м/мин	
	МПа	Мпа	20	60
Сталь 45	750	2000	200	300
12Х18Н10Т	600	2500	560	800
ХН62МВКЮ	1100	4000	720	1000
ЖС6-К	900	3500	750	1050
ВТ5	900	2000	520	750
38Х5МСФА	1700	7000	700	1000

Сверление пластмасс

Сверление является очень трудоёмкой технологической операцией, и поэтому обработка пластмасс иногда занимает до 70–80 % от общей трудоемкости процесса механической обработки. В связи с этим неправильный выбор инструмента и режимов резания может привести к большим производственным издержкам. Сверление производят в разных направлениях, как по направлению армирующих волокон, так и перпендикулярно; требования к точности отверстий невысокие (11–12-й квалитет) и шероховатость R_z = 20 мкм. При таких требованиях к точности и шероховатости поверхности в большинстве случаев удовлетворительные результаты даёт сверление твердосплавными свёрлами или свёрлами из быстрорежущих сталей, но сверление боропластиков производится инструментом из сверхтвёрдых материалов.

Выбор инструментов при сверлении композиционных материалов ничем не отличается от выбора инструментов при точении, поэтому сверление отверстий в стекло-, угле- и органопластиках проводится быстрорежущими и твердосплавными сверлами с соответствующими поправочными коэффициентами. Для боропластиков применяют свёрла из быстрорежущей стали Р6М5 и твёрдого сплава ВК8 только в единичных случаях, так как они быстро затупляются.

Геометрические параметры свёрл выбирают в зависимости от материала. (табл. 2) [2]. Задний угол α, передний угол γ и угол вершины сверла 2φ, определяют качество сквозных отверстий на входе и выходе инструмента. Их значения находятся в диапазоне: α = 10...30°; γ = 0...20°; 2φ = 90...120°. Для глухих отверстий исследованы только α и γ, т.к. 2φ = 180°. Глухие отверстия рекомендуется сверлить концевыми шпоночными фрезами.

Таблица 2

Геометрические параметры свёрл

Обрабатываемый материал	Материал режущей части сверла	Геометрические параметры сверла, °		
		2φ	γ	α
Стеклопластик	Р6М3, Р6М5, РІ2, и др.	100	15	20
	ВК3, ВК3-М, ВК4, и др.	100	10	20
Боропластик	ВК3, ВК3-М, ВК6-М, ВК8	105	10	20
Углепластик	Р6М3, Р6М5. Р12	90...100	10...15	15...20
	ВК3, ВК3-М, ВК6-М, ВК8	90...100	10	15...20

Несимметричность заточки режущей кромки сверла δ должна быть 0,1...0,2 мм, и винтовые канавки должны быть отполированы для уменьшения изнашивания сверла сходящей сливной стружкой.

Следует выбирать форму заточки и конструкцию режущей части сверла в зависимости от обрабатываемого материала [2. с. 164, 165].

Критерий затупления ($h_з$) – износ по задней поверхности сверла (табл. 3) из-за трения стружки и заготовки об инструмент, пластическая деформация и выкрашивание режущей кромки, абразивное воздействие армирующих волокон и т.д. Износ снижает качество и точность обработанных поверхностей. Производительность труда из-за простоя между сменами сверл уменьшается.

Чтобы избежать расслоения армированных волокнами композитов, рекомендуется правильно выбирать геометрические пара-

метры свёрл, использовать свёрла с минимальными значениями $h_з$, и использовать подкладки как при входе, так и при выходе сверла из просверливаемого материала.

Таблица 3

Критерии затупления свёрл

Обрабатываемый материал	Материал режущей части сверла	Критерий затупления сверла (износ), мм
Стеклопластик	Р6М3, Р6М5, Р9Ф5К5, и др.	0,15...0,20
	ВК3, ВК3-М, ВК4, ВК6-М, и др.	0,10...0,15
Боропластик	ВК3, ВК3-М, ВК6-М, ВК8	0,25...0,30
Углепластик	Р6М3, Р6М5, РІ2, Р6М5К5	0,10...0,15
	ВК3, ВК3-М, ВК4, ВК8	

Выбор режимов резания при сверлении композитов.

Режимы резания назначаются в следующей последовательности:

1) выбирается марка инструментального материала;

2) выбираются геометрические параметры сверла и критерий затупления;

3) выбирается подача по заданной шероховатости поверхности;

4) выбирается скорость резания в зависимости от подачи и диаметра сверла.

Табл. 4 определяет оптимальную скорость резания. Поправочные коэффициенты на изменённые условия резания приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 4

Скорость резания, м/с, при сверлении стекло-, угле- и боропластика

Подача, мм/об	Диаметр сверла, мм							
	4	6	8	10	12	14	16	20
Стекло- и углепластик, твердосплавные сверла								
0,10	–	–	0,87	0,89	0,90	0,91	0,92	0,94

Таблица 5

Поправочные коэффициенты для скорости резания при сверлении стекло- и углепластика твердосплавными сверлами

В зависимости от марки инструментального материала			
Инструментальный материал	ВК8	ВК4	ВК2
$K_{иυ}$	1,0	1,55	2,0

Таблица 6

Поправочные коэффициенты на скорость резания при сверлении боропластика твердосплавными сверлами

В зависимости от периода стойкости						В зависимости от глубины сверления				
T, мин	0,50	0,75	1,0	1,25	1,50	l	ID	2D	3 D	4 D
$K_{Tυ}$	1,60	1,22	1,0	0,86	0,76	$K_{lυ}$	1,04	1,0	0,96	0,91

Эмпирические формулы для осевой силы P_o и крутящего момента $M_{кр}$:

$$P_o = C_p D^{x_p} S_o^{y_p} K_p,$$

$$K_p = K_{ph} K_{pф} K_{pα} K_{pγ},$$

$$M_{kp} = C_M D^{x_M} S_o^{y_M} K_M,$$

$$K_M = K_{hM} K_{фM}$$

υ = 0,08... 1,0 м/с, S_o = 0,08...0,62 мм/об, D = 4... 20 мм для стекло- и углепластика; и υ = 0,042...0,58 м/с, S_o = 0,04...0,4 мм/об, D = 4...20 мм для боропластика. Числовые значения постоянных и показателей степеней приведены в табл. 7.

Поправочные коэффициенты соответственно на измененные условия работы при расчете осевой силы и крутящего момента даны в табл. 8 и 9.

Таблица 7

Данные для расчета осевой силы P_o и крутящего момента $M_{кр}$

Материал	C_p	x_p	y_p	x_M	y_M
Стеклопластик	83,4	1,03	0,81	1,66	0,99
Боропластик	182,5	0,68	0,26	1,56	0,26
Углепластик	79,8	1,02	0,85	1,55	0,97

Таблица 8

Поправочные коэффициенты на осевую силу для измененных условий работы при сверлении пластмасс

В зависимости от износа по задней поверхности сверла						
$H_з$, мм	0	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40
K_{ph},	1,0	1,57	1,87	2,04	4,46	–
	1,0	1,32	–	1,68	2,30	3,15

Таблица 9

Поправочные коэффициенты на крутящий момент при сверлении

В зависимости от износа по задней поверхности сверла							В зависимости от угла при вершине				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$h_з$, мм	0	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	2φ, °	90	100	105	120
K_{hM}	1,0	1,16	1,26	1,37	1,58	–	K_{hM}	0,87	1,0	–	0,87
	1,0	1,10	–	1,17	1,38	1,61		0,92	0,97	1,0	0,90

Сверление ХТНМ алмазными свёрлами

Для сверления группы XI рекомендуется сверление алмазными свёрлами, хотя некоторые из них можно отнести к группе X и сверление проводить быстрорежущими сталями или твердыми сплавами [1].

Обработка ХТНМ имеет ряд особенностей по сравнению с металлами:

а) хрупкое разрушение;

б) образование трещин, микротрещин и остаточных напряжений;

в) обязательное охлаждение в зоне резания;

г) магнитные и механические крепления деталей не применяются из-за хрупкости и немагнитности неметаллических деталей;

д) полный контакт режущей поверхности с обрабатываемым материалом;

е) ограниченный доступ СОТС в зону резания;

ж) отсутствие вывода шлама из зоны обработки.

Таблица 10

Некоторые свойства неметаллических материалов [3]

Материал	ρ, г/см³	E, кгс/см²	$\sigma_в$, кгс/см²		$H_ц$, кгс/мм²	$X_{20°C}$, ккал/град·м·ч
			сжатие	изгиб		
Оптическое стекло К-8	2,52	7,15–10⁵	6600	960	565–645	0,85–1,0
Ситалл СТЛ-1	2,53	8,1–10⁵	6810	1040	744	1,08
Керамика 22ХС	2,53	′	1100–1250	3500–4000	1300–1500	2,1–2,3
Алмаз	3,49–3,54	9,0–10⁵	20000	3000	10000	35
Гранит	2,6–3,0	40–60	1530–3060	31–51	-	3–3,5
Синтегран	2,4–2,7	25–45	1225–2040	153–225	-	1,6–1,75

Способы производства алмазных свёрл и сверление ХТНМ

В настоящее время выпускаются несколько десятков конструкций алмазных сверл для обработки отверстий в широком интервале диаметров и глубин для обработки ХТНМ. Для упрощения мы будем их классифицировать по их геометрическим характеристикам. Использование сверл с разными формами и размерами обусловлено обработкой разных материалов (стекло, кварц, керамика, ситаллы, ферри-

ты и др.); обработкой отверстий различных диаметров; использованием разного вида оборудования.

Для изготовления алмазных инструментов используют в основном три вида технологических процессов: гальваническое закрепления алмазов; порошковая металлургия (горячее прессование и брикетирование); вакуумная технология (диффузионная сварка алмазных зёрен).

Технология гальванического закрепления зёрен алмаза – из всех способов закрепления алмазов технология гальванического закрепления зёрен является самой простой и дешёвой. Эта технология разработана на основе электролитных свойств веществ. Материал, на котором создаётся алмазный слой, погружают в раствор электролита с алмазной смесью, потом через электролит пропускается электрический ток, и на рабочей поверхности можно получить алмазный слой 0,3 мм от его толщины. Износостойкость сверла составляет 6 мм и обеспечивает просверливание не более 50 отверстий на стекле толщиной 5 мм [1].

Преимущества гальванического инструмента:

а) можно изготавливать очень сложные и малоразмерные инструменты;

б) практически сохраняется неизменная форма, что очень важно при изготовлении сверхточных изделий;

в) возможность изготовления гибких и очень тонких дисков;

г) низкая себестоимость производства инструмента по сравнению с другими технологиями.

Недостатки гальванического инструмента:

а) недолговечность;

б) снижение абразивных свойств в связи с затуплениями и вырывами алмазных зерен;

в) выкрашивание поверхности абразива приводит к царапанию обрабатываемой поверхности;

г) неравномерность расположения алмазных зерен по высоте приводит к царапинам и сколам.

Технология порошковой металлургии (горячего прессования). Инструменты, полученные по данной технологии, изготавливаются на металлической связке, как правило, используется связка меди с оловом (М1), которая тщательно перемешивается с порошком алмаза. Далее эту смесь засыпают в металлическую пресс-форму, прессуют и одновременно спекают под давлением при температуре около 680–700 °С. При этой технологии получается композит с равномерно распределёнными запрессованными алмазными зёрнами по всей металлической связке. Связка М1 удерживает зёрна до их затупления, а затем они вырываются с поверхности при первом периоде износа. Износостойкость сверла в 6 мм обеспечивается сверлением 1500–2000 отверстий в стекле толщиной 5 мм [1].

Преимущества порошкового инструмента:

1) стабильность свойств при износе инструмента;

2) долговечность инструмента по отношению к гальваническому;

3) мягкое шлифование в связи с тем, что расстояния между зернами способствует выходу отработанного материала из рабочего места.

Недостатки порошкового инструмента:

1) недостаточная концентрация алмазных зерен на поверхности и по объёму уменьшает его производительность почти в 2 раза по сравнению с гальваническим инструментом;

2) трудоёмкость изготовления.

Технология вакуумно-диффузионной сварки алмазных зёрен. Российской фирмой «РусАтлант» разработана специальная связка на основе, которой производят алмазные сверла «МонАлит» с концентрацией алмазов 200–250 %. Эти сверла производятся методом пропитки в неметаллических пресс-формах. Метод состоит в соединении предварительно металлизированных алмазных зёрен расплавом связки. При температуре свыше 1000 °С и в вакуумной среде происходит соединение металлизированных зёрен с металлической связкой. Износостойкость сверла 6 мм, обеспечивает не менее 6000 отверстий в стекле толщиной 5 мм [1].

Преимущества сварного инструмента:

а) возможность изготавливать инструмент любой формы с размерами от 1 мм при предельной концентрации алмаза 250 %;

б) стабильность режущих свойств инструмента в процессе всей его эксплуатации;

в) предельная абразивность инструмента, обусловленная предельной концентрацией алмаза;

г) самая высокая долговечность при тех же параметрах формы, что в других типах инструмента благодаря предельному заполнения алмазом рабочего объёма;

д) получение гладкой поверхности после обработки за счет того, что все зерна расположены на одной высоте;

е) максимальная экономичность, связанная с оптимальным соотношением «цена-качество-долговечность».

Недостатки сварного инструмента:

а) невозможность изготовления гибких тонких дисков;

б) неэффективность при задачах, которые требуют сохранения точных размеров формы;

в) неэффективность при изготовлении очень маленьких форм, внутри которых невозможно разместить более 3-х слоёв алмазных зерен.

Классификация алмазных свёрл подразделяется следующим образом:

1. Специальные свёрла подразделяются на стержневые и полые. Стержневые подразделяются на монокристальные и поликристальные. Полые сверла могут быть кольцевыми, сегментными и подковообразными.

2. Универсальные сверла различают на три вида:

а) с механизмом регулировки диаметра;

б) со свободной регулировкой диаметра;

в) со сменным базирующим элементом.

Выбор и режимы резания свёрл

До сих пор не существует точных описаний и стандартов по выбору алмазных свёрл для сверления ТХНМ, также как для сверления металлов, где можно определять почти все переменные, необходимые для обработки сверлением металлов. В настоящей работе, с помощью материалов, изложенных в работах Балыкова А.В., Елина А.В., Тюкпиекова В.Н., Шкарупы М.И. и других учёных кратко объяснена классификация свёрл.

Правильный выбор алмазного сверла зависит от его стойкости и это в свою очередь зависит от твердости обрабатываемого материала, его плотности, глубины сверления, геометрии сверла, угловой скорости, подачи, типа СОТС, типа и состояние оборудования, метода закрепления инструмента и опыта оператора станка [7].

Выбирая алмазное сверло, нужно определить его цель, ведь от этого зависит его экономичность и качество:

а) сверла, изготовленные по гальванической технологии, самые дешевые, но имеют маленькую устойчивость, равной примерно 1% от устойчивости сверл, изготовленных на спецсвязке по технологии вакуумно-диффузионной сварки алмазных зёрен («МонАлит»);

б) свёрла, изготовленные по порошковой металлургической технологии, имеют меньшую, чем средняя устойчивость, равную примерно 25% от устойчивости свёрл («МонАлит»);

в) свёрла «МонАлит», имеют самую большую устойчивость, взятую за 100% [1].

В связи с тем, что на рынке производства инструментов существует множество свёрл не только отечественных, но и зарубежных производителей, перед приобретением алмазных свёрл необходимо определить:

а) цель работы сверла;

б) тип технологии изготовления сверла;

в) режим работы соответствующего инструмента (рекомендации производителя).

Определяя цель работы (бытовую, промышленную, серийную), необходимо выбирать тип технологии изготовления инструмента: гальванический, порошковый или вакуумно-диффузионный.

Заключение

Обработка сверлением ТОМ (группы I по IX) производится свёрлами на основе быстрорежущих сталей и твердых сплавов использованием для определения режимов сверления те же таблицы, которые используются при точении, учитывая поправочные коэффициенты для соответствующего обрабатываемого материала.

Процесс обработки резанием композитов (группы X) отличается от процесса резания металлов в связи с тем, что эти материалы являются анизотропными, с высокой или низкой твердостью, низкой теплопроводностью. Обработка композитов сверлением ведется такими же сверлами, как и для обработки ТОМ, за исключением композитов, содержащих в своём составе армирующие элементы на основе бора, которые обрабатываются сверхтвердым сплавом в единичных случаях из-за его стойкости ($T < 2$ мин).

Сверление материалов группы XI (ХТНМ) лучше проводить алмазными сверлами. Чтобы найти правильное сверло среди сотен различных сортов, видов, типов связки, а также методов производства, очень важно знать, каков обрабатываемый материал и тип алмазных свёрл, их предполагаемое применение и влияние на производительность. Очень важно понимать, что каждое сверло предназначено на конкретное приложение, и, следовательно, может реагировать по-разному при различных условиях. Гальванический инструмент подходит как для бытовых и одноразовых работ, так и для точных работ; инструменты типа Sinter (полученные порошковым спеканием) хороши для изготовления более долговечных инструментов, а также работающих при более высоких скоростях; инструменты, изготовленные на спецсвязке «МонАлит», более дорогие и долговечные по отношению к предыдущим двум типам, также более экономичны, когда рассматривается показатель «цена-качество-долговечность».

Список литературы

1. Балыков А.В. Повышение эффективности обработки отверстий в деталях из ХТНМ на основе алмазного сверления: дис. ... д-ра техн. наук. – М: 2004.

2. Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Обработка специальных материалов в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.

3. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986.

4. Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф. Нетрадиционные методы обработки материалов: учебное пособие. – М.: Изд-во МГОУ, 2007. – 50 с.

5. Рогов В.А., Позняк Г.Г. Современные машиностроительные материалы и заготовки. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 336 с.

6. Рогов В.А. Конструкционные и функциональные материалы современного машиностроения. – М.: Изд-во «Масштаб», 2006. – 90 с.

7. Сайт компании UKAM Industrial Superhard Tools. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ukam.com (дата обращения 04.03.2012).

References

1. Balykov A.V. Povyshenije effektivnosti obrabotki otverstij v detaljach iz HTNM na osnove almaznogo sverlenija. Dissertazija d.t.n. [Improving the efficiency of processing holes in the details of HTNM by diamond drilling]. D.Sc. Thesis, Moscow 2004, 200–300 p.

2. Baranchikov V.I., Tarapanov A.S., Harlamov G.A. Obrabotka spezialnich materialov v mashinostroenii [Machining of special materials in mechanical engineering] Mashinostroenie, 2002. 264.

3. Gurevich J.L., Gorochov M.V. Reschimy rezaniya trudnoobrabatyvaemich materialov [Unconventional methods of data processing] Textbook – Publisher MGOU, 2007, 50 p.

4. Kovschov A.N., Nazarov J.F. Netradizionnyje metody obrabotki materialov [Modern engineering materials and blanks] Moscow: Publishing Center «Academy», 2008. 336.

5. Rogov V.A., Poznjak G.G. Sovremennyje mashinostroitelnyje materialy i zagotovki [Structural and functional materials of modern engineering] Moscow: Publishing House of the scale, 2006, 90 p.

6. Rogov V.A. Konstrukzionnyje I funkzionalnije materialy sovremennogo mashinostroenija [Structural and functional materials of modern engineering] Moscow: Publishing House of the scale, 2006, 90 p.

7. Company site UKAM Industrial Superhard Tools. [Electronic resource] Mode of access: http://www.ukam.com (date accessed 03/04/2012).

Рецензенты:

Гусаков С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплотехники и тепловых двигателей инженерного факультета РУДН;

Расторгуев Г.А., д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов РУДН;

Халтурин В.Г., д.т.н., профессор кафедры ООС, Пермский государственный технический университет Министерства образования и науки РФ, г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 26.10.2012.