



Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Кафедра «Инновационные технологии машиностроения»

Высокоэффективная алмазно – абразивная обработка современных полимерных композиционных материалов

Актуальность проблемы механической обработки полимерных композиционных материалов

Первое обстоятельство – опережающий рост производства полимерных композиционных материалов, обладающих ценными, а иногда и уникальными свойствами, требует увеличения объемов механической обработки. Она является обязательной, наиболее ответственной и самой трудоемкой операцией в технологическом цикле производства изделий из ПКМ.

Второе обстоятельство – отсутствие технологического оборудования и плохая обрабатываемость ПКМ резанием:

- в зоне резания имеет место высокая температура, которая превышает критические температуры, обусловленные теплостойкостью обрабатываемого материала;
- интенсивное изнашивание инструмента, обусловленное механохимически-адсорбционной природой;
- низкое качество обработки, связанное с формированием дефектного поверхностного слоя, прижогами, расслоениями, ворсистой и др.;
- сильное упругое последствие ПКМ затрудняет выбор рабочих элементов размерных инструментов;
- выделение токсичных твердых и летучих веществ.

Третье обстоятельство – отсутствие научно обоснованного механизма (единой обобщающей модели) взаимодействия алмазно-абразивного инструмента с полимерными композиционными материалами, включающего механику контактного взаимодействия, тепловые процессы, природу изнашивания инструмента и др., что препятствует существенному повышению производительности процесса резания ПКМ, улучшению качества и точности обработки.

Четвертое обстоятельство - отсутствуют основополагающие практические рекомендации, являющиеся основой создания новых высокопродуктивных технологий алмазно-абразивной обработки ПКМ, инструментов для их обработки и технологического оборудования.

Особенности физико – механических и теплофизических свойства полимерных композиционных материалов по сравнению с металлами

Свойства	Полимерные композиционные материалы				Сталь 45	Алюминий
	Углепластики		Стекло-пластики	Органо-пластики		
	ЭЛUR	УОЛ	T10-80	СВМ		
Плотность, кг/м³	1480	1500	1460	1360	7850	2750
Предел прочности, МПа						
при растяжении	1177	784	539	588	200-230	40-185
при сжатии	784	784	441	167	62	195
при изгибе	1471	1177	784	392	135	205
Модуль упругости, ГПа						
при растяжении	418	418	555	329	205	70
при сжатии	118	118	-	-	-	-
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,70	0,47	0,39	0,14-0,17	32	209
Удельная теплоемкость, КДж/(кг·К)	0,90	1,03	1,00	1,47-1,89	0,561	0,894

Объект исследования – полимерные композиционные материалы, которые включают высокопрочные и высокомодульные волокна. Эти материалы по сравнению с металлами имеют ряд особенностей.

Под полимерными композиционными материалами мы понимаем материалы, состоящие из двух или более компонентов, физико-механические свойства которых существенно отличаются от физико-механических свойств исходных компонентов. Основа этих материалов - термореактивные смолы, армирующие компоненты – высокопрочные и высокомодульные волокна органического и неорганического происхождения (углеродные, стеклянные, борные, базальтовые, органические и др.).

Как видно из данных, которые приведены в таблице

Эти материалы легче металла, в тоже время превосходят по сравнению с алюминием в 5 – 6 раз по удельной прочности и удельной жесткости, имеют крайне низкую теплопроводность – на два порядка ниже, чем у металлов, а их теплостойкость не превышает 300 град. С.

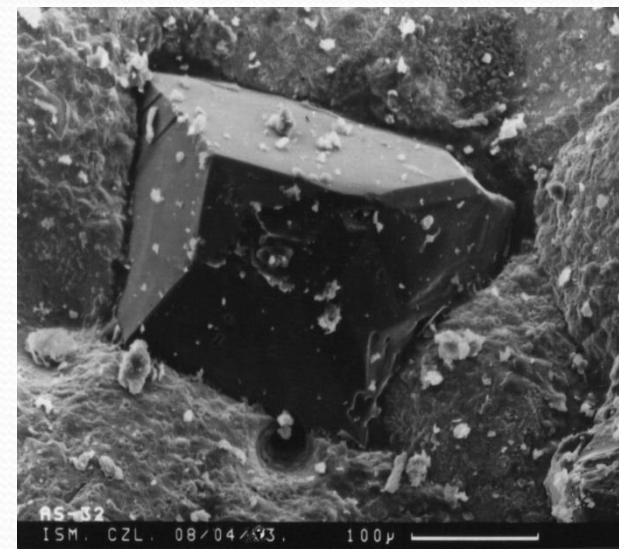
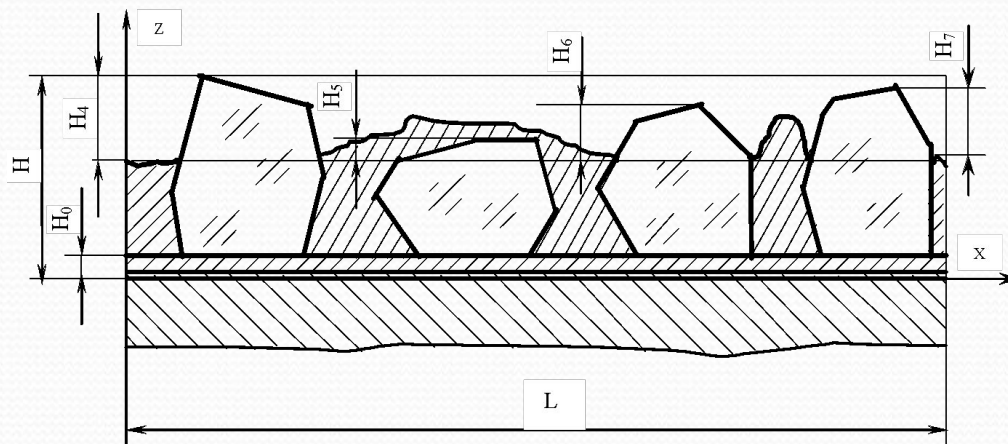
Обоснование выбора инструментального материала для обработки полимерных композиционных материалов

Свойства	Размерность	Алмаз	Карбид кремния SiC	Электрокорунд Al ₂ O ₃
Плотность *)	кг/м ³	(3,48-3,56) · 10 ³	(3,12-3,20) · 10 ³	(2,00-2,10) · 10 ³
Микротвердость	ГПа	100	30-33	20-24
Модуль упругости	ГПа	900	365	-
Предел прочности на сжатие	ГПа	2,00	1,50	0,76
Коэффициент теплопроводности	Дж/(м·с·К)	147	15,54	19,74
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·К)	504	588	756
Коэффициент линейного расширения	1 град·10 ⁻⁶	0,90-1,45	6,50	7,50
Предел прочности при изгибе	МПа	210-490	50-150	80-90
Абразивная способность		1,00	0,25-0,45	0,12-0,25
Теплостойкость	К	970-1170	1470-1570	1770-1970

*) *Зависит от марки и величины кристалла*

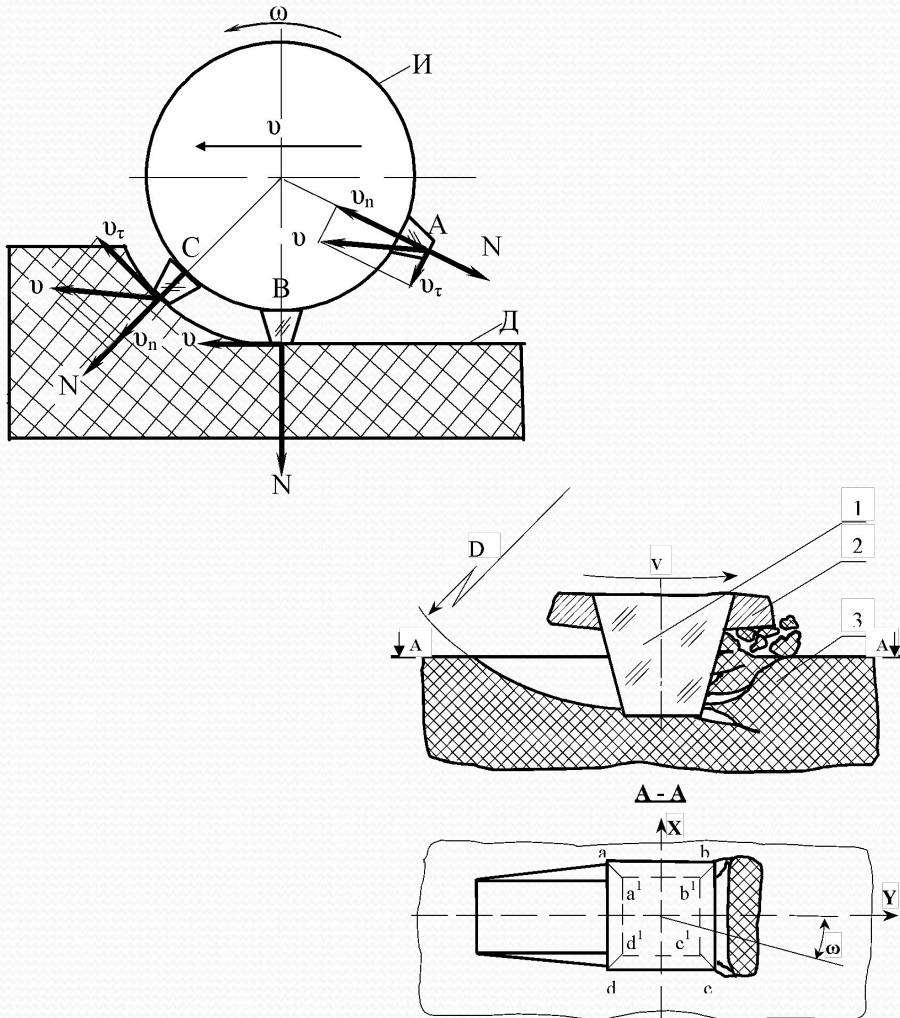
В связи с этим Важнейшей предпосылкой, которая была принята при обосновании выбора синтетического алмаза в качестве инструментального материала явилось следующее: высокая теплопроводность алмаза, которая в девять раз выше, чем у карбида кремния, и в семь раз, чем у электрокорунда. Сравнение физико-механических свойств карбида кремния и электрокорунда, которые широко применяются и используются в шлифовальных инструментах, с синтетическими алмазами показало, что последние имеют максимальную микротвердость и модуль упругости, а следовательно, обладают значительной износостойкостью и абразивной способностью. Указанные свойства явились определяющими при выборе способа изготовления алмазного инструмента. Опыт подтвердил, что размещение зерен синтетических алмазов на корпусе инструмента в один слой и закрепление их методом гальваностегии обеспечивает высокую эффективность применения такого инструмента в процессах механической обработки. Однако здесь мы столкнулись со следующей проблемой: повышение производительности неминуемо приводило к снижению качества обработки и наоборот. Это связано с тем, что до настоящего времени не существует единой теории или, приемлемой общей модели, описывающей основные известные закономерности процесса алмазно-абразивного резания. Отсутствие таковой общей основы не позволяет оптимизировать связь производительности с качеством и точностью обработки, интенсивности изнашивания инструмента и качества обработки с механохимическими и тепловыми явлениями. Указанные проблемы можно решить только на основе вскрытия механизма взаимодействия технологической системы «инструмент-деталь» и разработки научных основ управления контактными взаимодействиями и тепловыми процессами в зоне резания.

Имитационная модель однослойного алмазно – абразивного инструмента



1. Разработана и научно обоснована имитационная модель объемного строения однослойного алмазно-абразивного инструмента, изготовленного методом гальваностегии, которая базируется на статистическом моделировании, включает в себя:
 - 1) задание формы и размеров однослойного алмазно – абразивного пространства; статистические характеристики алмазных зерен и их состав;
 - 2) требования к электропроводности и чистоте поверхности алмазных зерен;
 - 3) задание поверхности связки и функционально – ориентированных параметров контактных поверхностей рабочих элементов в инструменте с учетом величины закрепления зерен алмаза в связке.
2. Модель позволяет устанавливать основные закономерности формирования параметров рабочей поверхности инструмента, в частности номинальной и фактической площади контакта технологической системы «инструмент – деталь».

Основные особенности механики контактного взаимодействия



1. Контактуют разнородные тела с различными свойствами
2. Резание однослойным алмазно-абразивным инструментом значительно отличается от резания инструментом, работающим в режиме самозатачивания
3. Контакт происходит при скоростях резания 20-80 м/с
4. При резании температура в зоне резания изменяется от 300 до 1300 К с достаточно высоким градиентом температуры в инструменте и обрабатываемой детали

1 – алмазное зерно
2 – связка
3 – обрабатываемый материал

Распределение температуры по глубине образцов ПКМ

Термо-пары	Удаление горячего сая ТП, мм	Обрабатываемый материал	
		Углепластик	Органостеклопластик
		Температура Θ , К	
1	0*	510	570
2	0,05	420	480
3	0,10	360	380
4	0,15	310	320
5	0,20	290	300

*) При перерезании горячего сая ТП

Моделирование температурных полей в технологической системе «инструмент – деталь»

Определение температурных полей в технологической системе «инструмент – деталь» сводится к решению системы дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau_1} = a_1 \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial x_1^2} \quad \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau_1} = a_2 \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial x_2^2}$$

Начальные и граничные условия:

$$\Theta_1(x_1, 0) = \Theta_2(x_2, 0) = \Theta_c$$

$$\Theta_1(0, \tau_1) = \Theta_2(0, \tau_1)$$

$$\frac{\partial \Theta_1(+\infty, \tau_1)}{\partial x_1} = \frac{\partial \Theta_2(-\infty, \tau_2)}{\partial x_2} = 0$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial \Theta_1(0, \tau_1)}{\partial x_1} + \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2(0, \tau_2)}{\partial x_2} + mC_2 \Theta_2(0, \tau_1) = g$$

где Θ_1 , Θ_2 и Θ_c – температура, соответственно, инструмента, детали и окружающей среды, К;
 τ_1 – время контактирования элемента инструмента в пределах дуги контакта, с;

a_1 , a_2 – коэффициенты температуропроводности, соответственно, инструмента и детали, м²/с;
 λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности инструмента и детали, Вт/(м·К);

$$\lambda_1 \frac{\partial \Theta_1(0, \tau)}{\partial x_1}, \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2(0, \tau)}{\partial x_2}, A\Theta_2(0, \tau_1) -$$

доля теплоты, поглощаемая, соответственно, инструментом, деталью и стружкой, Вт/м²;
 $A = mC_2$ – энергия теплоты стружки, Дж;

m – масса стружки, которая срезается инструментом с единицы площади за единицу времени, кг/(м²·с);

C_2 – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К).

Плотность теплового потока

$$g = g_1 - g_2 = \frac{P_z \nu - A \Theta_c B \sqrt{Dt}}{S_{r(a)} B \sqrt{Dt}}$$

Моделирование температурных полей в технологической системе «инструмент – деталь»

Решение системы дифференциальных уравнений при начальных и граничных условиях методом интегрального преобразования Лапласа имеет следующий вид:

$$\Theta_1 = \frac{g}{A} F_1 + \Theta_c$$

$$\Theta_2 = \frac{g}{A} F_2 + \Theta_c$$

F_1 и F_2 – значения функций, характеризующих интенсивность распределения температурных полей инструмента и детали по координате x и времени t

$$F_1 = \left[-\exp\{b(k_1 + b\tau_1)\} \operatorname{erfc}\left(b\sqrt{\tau_1} + \frac{k_1}{2\sqrt{\tau_1}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{k_1}{2\sqrt{\tau_1}}\right) \right]$$

$$F_2 = \left[-\exp\{b(k_2 + b\tau_1)\} \operatorname{erfc}\left(b\sqrt{\tau_1} + \frac{k_2}{2\sqrt{\tau_1}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{k_2}{2\sqrt{\tau_1}}\right) \right]$$

b – коэффициент, учитывающий распределение температурных полей в инструменте и детали

$$b = \frac{A}{\lambda_1/\sqrt{a_1} + \lambda_2/\sqrt{a_2}}$$

где g – тепловой поток без учета доли теплоты, поглощаемой стружкой, Вт/м²;

F_1 и F_2 – значения функций, характеризующих интенсивность распределения температурных полей инструмента и детали по координате x и времени t .

Результаты расчета температуры инструмента и детали (углепластик типа ЭЛУР)

Результаты расчета температуры инструмента и детали (органостеколопластик типа Т42/1-76)

Подача	Скорость резания, м/с					
	30	45	60	30	45	60
	Температура, К					
	инструмент			деталь		
	$X=0$					
3	367	422	473	367	422	473
6	405	466	536	405	466	536
9	429	494	569	429	494	569
12	446	512	592	446	512	592
	$X=100 \text{ мкм}$					
3	316	327	334	310	313	317
6	346	351	357	309	312	315
9	364	371	373	308	310	317
12	375	383	385	303	310	317

Подача	Скорость резания, м/с					
	30	45	60	30	45	60
	Температура, К					
	инструмент			деталь		
	$X=0$					
3	528	628	681	528	628	681
6	557	639	753	557	639	733
9	570	656	798	570	656	798
12	651	798	852	651	798	852
	$X=100 \text{ мкм}$					
3	455	469	487	359	368	371
6	476	485	488	369	375	389
9	483	493	500	382	391	400
12	547	560	580	437	448	464

Анализ данных, приведенных в таблицах, показывает, что с увеличением скорости резания и особенно с ростом подачи температурное поле инструмента и детали повышается.

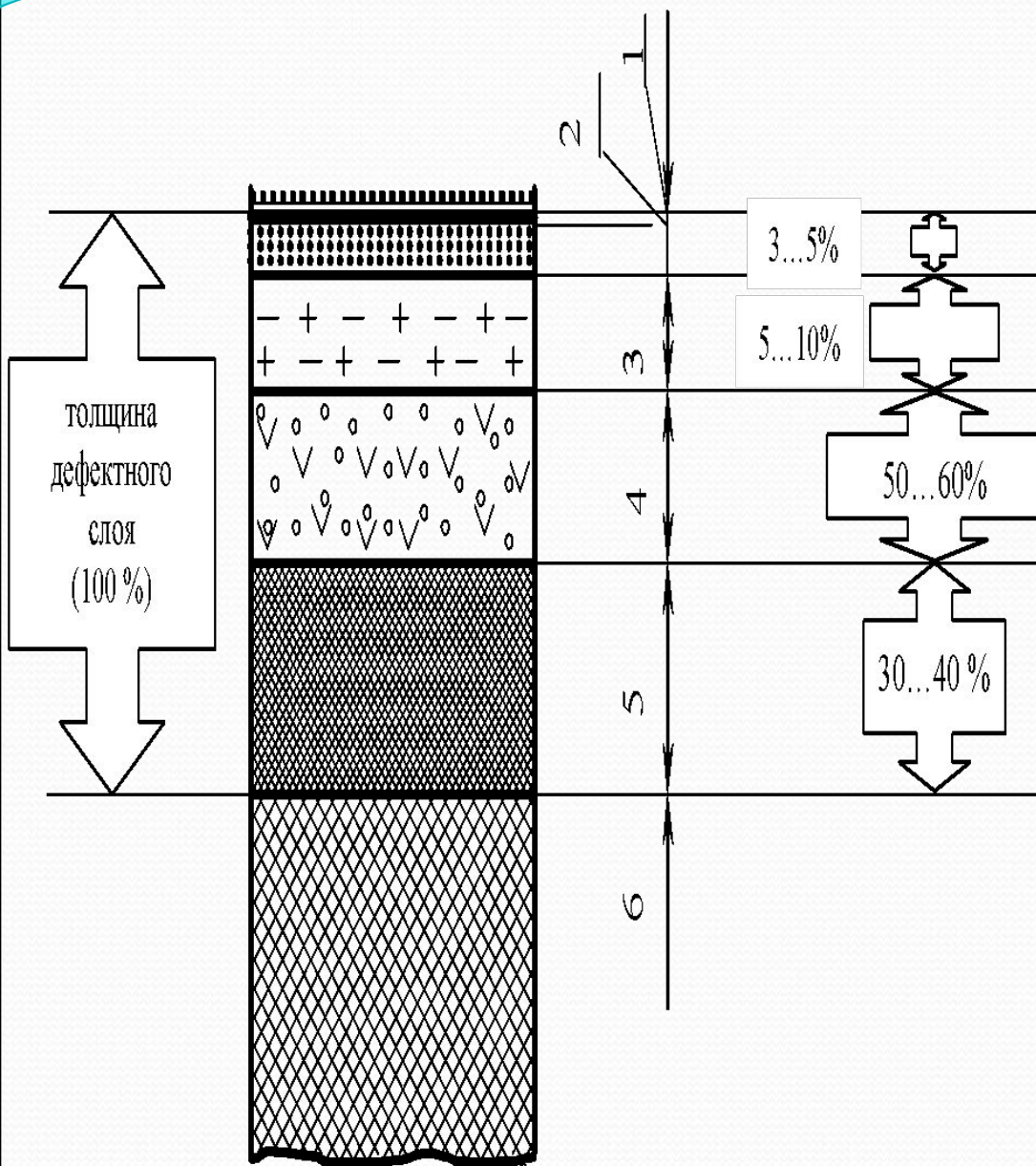
При этом, характер распределения температурного поля в инструменте и детали по координате X существенно различен.

Температурное поле более глубоких слоев ($X=100 \text{ мкм}$) инструмента и обрабатываемого материала уменьшается крайне неравномерно и зависит, главным образом, от их теплофизических характеристик, прежде всего, теплопроводности.

Высокая теплопроводность алмаза и металлической связки обеспечивают равномерный прогрев рабочей поверхности инструмента, исключая температурную неоднородность. Это должно снижать интенсивность изнашивания алмазсодержащего рабочего слоя инструмента.

Сопоставление данных таблиц с результатами экспериментальных данных ученых показывает, что величина относительной ошибки не превышает 15-20 %.

Механизм образования и формирования поверхностного слоя полимерных композиционных материалов при алмазно – абразивной обработке



Установлен механизм поверхностного слоя обработанной поверхности термореактивных ПКМ под действием механических напряжений, теплоты и окислительно-химических процессов неизбежно разрушается и механодиспергируется, ухудшая эксплуатационные показатели изделий.

Глубина распространения разрушения и механодиспергирования в поверхностном слое зависит от условий обработки, главным образом, от скорости резания и подачи от 20 до 200 мкм.

Толщина дефектного слоя в зависимости от условий резания изменяется от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров.

Схематизируя структуру поверхностного слоя, его можно разделить на четыре субмикрослоя:

(1 и 2 слой) наружный структурированный слой полимера, составляющий (3-5 %) общей толщины;

(3 слой) механически уплотненный слой разрушенного полимера (5-10 %);

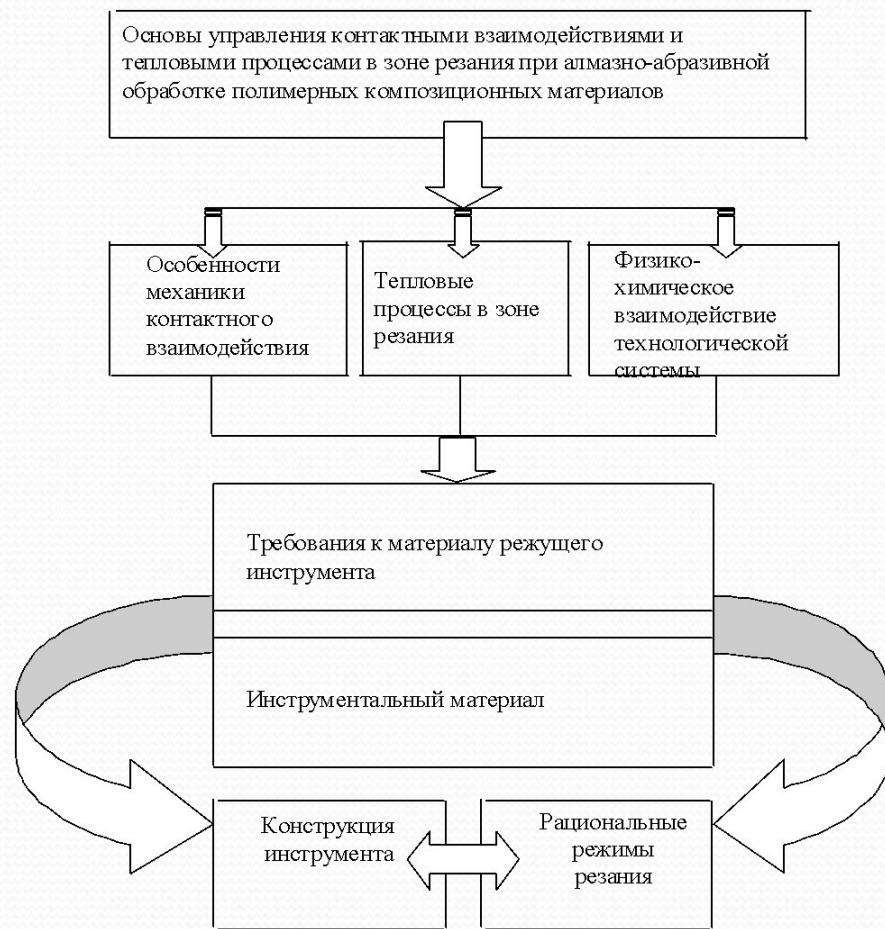
(4 слой) разрыхленный слой механодиспергированного наполнителя и разрушенного полимера (50-60 %);

(5 слой) переходной в исходную структуру ПКМ (30-40 %).

Высокоэффективная технология алмазно – абразивной обработки современных ПКМ

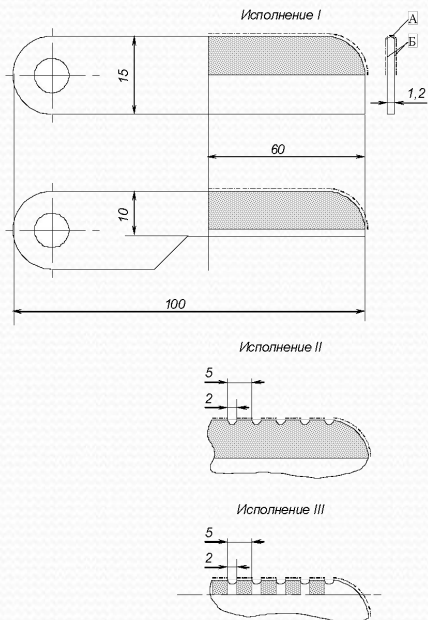
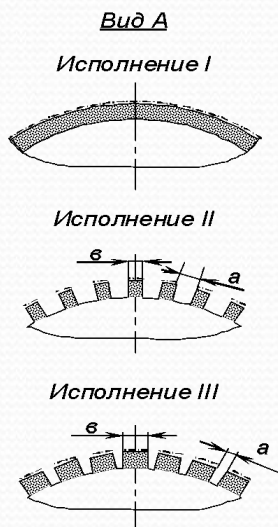
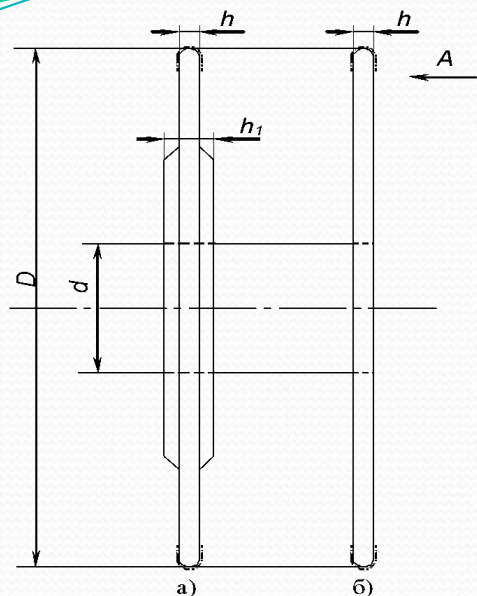
Концепция высокопродуктивной алмазно – абразивной обработки ПКМ, которая базируется на управлении механохимическими и теплофизическими явлениями путем направленного и регулируемого управления контактными взаимодействиями и тепловыми процессами в зоне обработки, которые минимизируют механохимические и структурные превращения в полимерной составляющей обрабатываемого материала.

При этом контактные процессы направлены исключительно на поддержание высокой режущей способности алмазного инструмента за счёт направленного создания эффективных функционально – ориентированных параметров контактных поверхностей рабочих элементов в инструменте, а теплофизические процессы направлены на формирование бездефектного поверхностного слоя обрабатываемого материала.



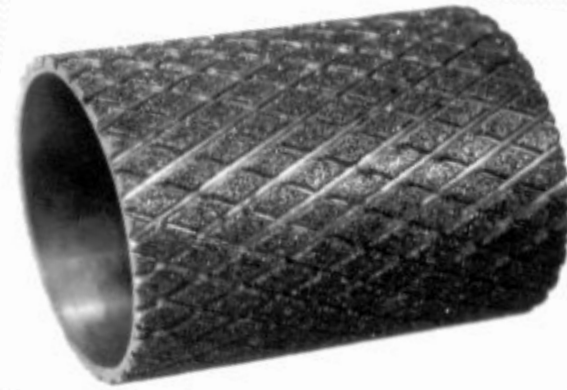
Алмазно – абразивные круги (барабаны) для высокопродуктивной механообработки полимерных композиционных материалов

Однослойные алмазно – абразивные круги и ножовочные полотна

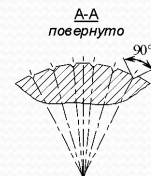
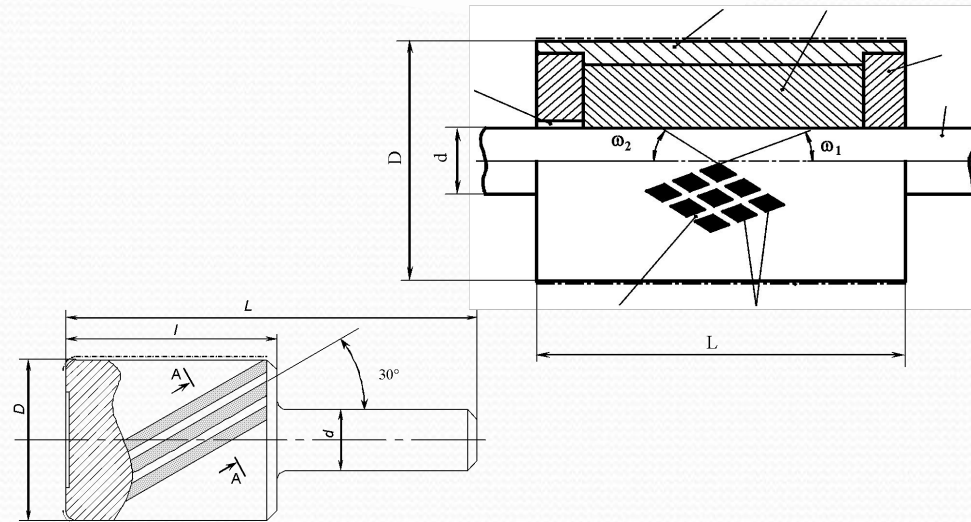


1. Повышение срока службы инструмента по сравнению с базовой технологией не менее чем в 5-7 раз.
2. Увеличение производительности обработки в 2,5-3,0 раза.
3. Улучшение качества обработанной поверхности (свести к минимуму действие термоокислительной деструкции полимерной составляющей, исключение прижогов, сколов кромок, расслоений и других дефектов на обработанной поверхности ПКМ, обеспечивая при этом шероховатость поверхности в пределах R_z 20...40 мкм.

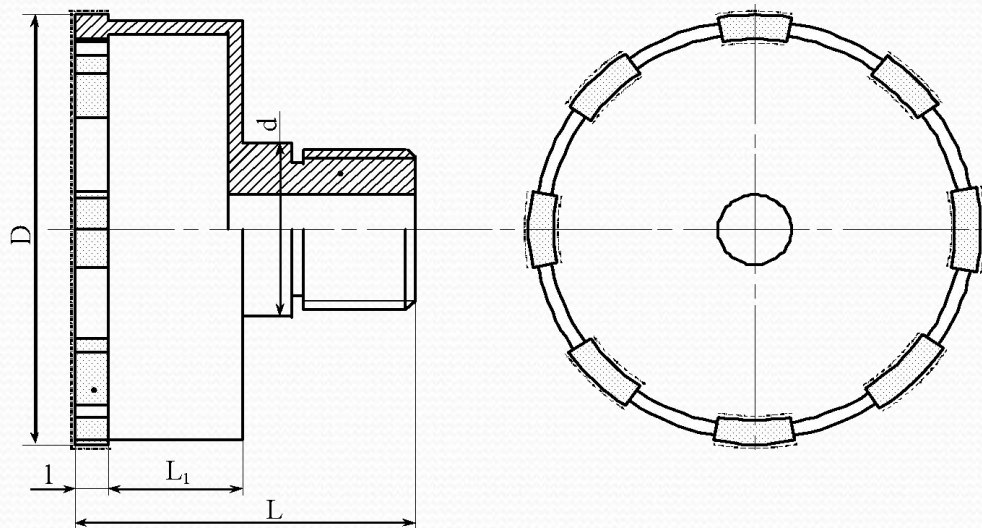
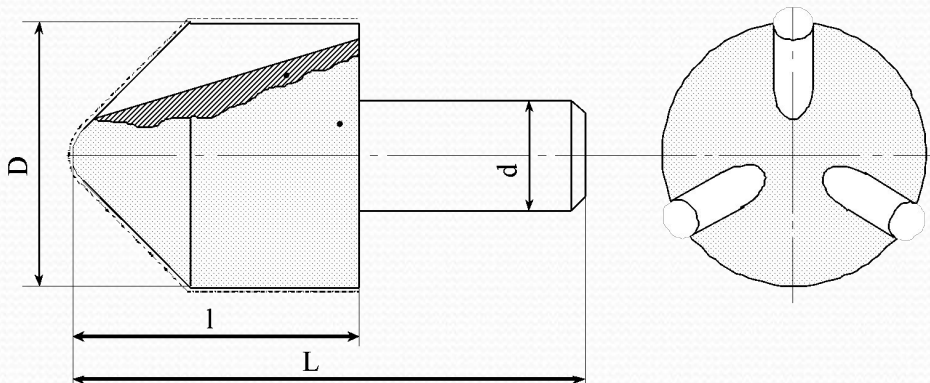
Однослойные алмазно – абразивные круги (барабаны) и шлифовальные головки для шлифования полимерных композиционных материалов



1. Повышение срока службы инструмента по сравнению с базовой технологией, основанной на применении абразивного инструмента:
 - 1) при шлифовании угле-, стекло- и органостеклопластиков в 5...10 раз;
 - 2) сотовых заполнителей в 9...10 раз;
 - 3) Увеличение производительности обработки 3...9 раз;
2. Обеспечение разнотолщинности шлифованных поверхностей ПКМ в пределах $\pm 0,1$ мм и повышение точности обработки в 2,0...2,5 раза;
3. Улучшить качество обработанной поверхности (свести к минимуму действие термической деструкции, исключить прижоги, расслоения, ворсистость и обеспечить шероховатость в пределах $R_z 20...40$ мкм
4. Обеспечить глубину деструктивно-диспергированного поверхностного слоя в пределах 20...200 мкм, что в 3...5 раз меньше чем при лезвийной и абразивной обработке.



Однослойные алмазно – абразивные сверла для сверления отверстий в полимерных композиционных материалах



1. Повышение срока службы инструмента по сравнению с базовой технологией, основанной на применении лезвийного быстрорежущего и твердосплавного инструмента:

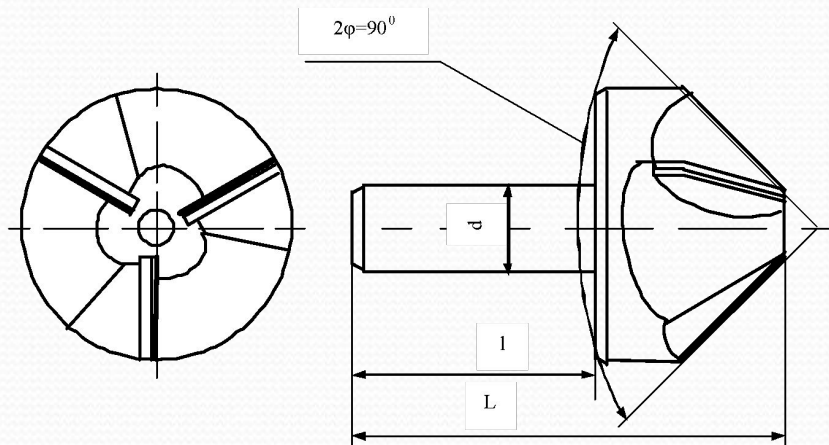
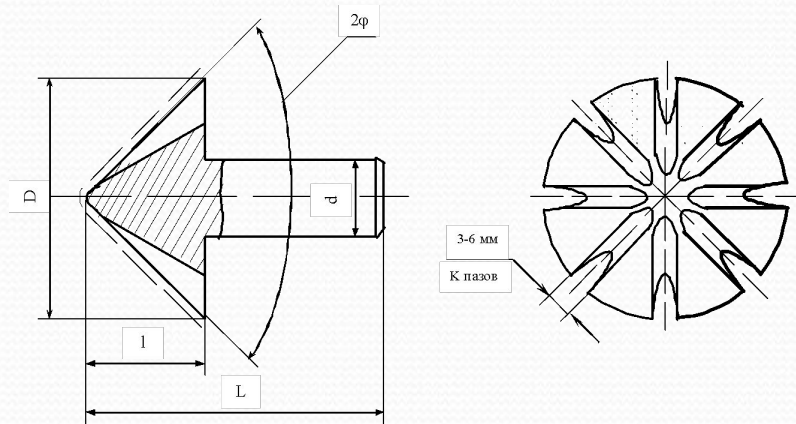
2. при сверлении отверстий в угле-, стекло- и органостеклопластиках в 5...10 раз.

3. Увеличение производительности обработки в 3...9 раз.

4. Улучшение качества обработанной поверхности (сведение к минимуму действия термической деструкции полимерной составляющей, исключение прижогов, расслоений, ворсистости, выкрашивания кромок и других дефектов на обработанной поверхности изделий, обеспечивая при этом параметр шероховатости в пределах $Rz\ 20...40$).

5. Повысить точность обработки в 2,0...2,5 раза, обеспечивая при этом получение отверстий по точности не ниже 10 квалитета.

Зенкеры конические (однослойные алмазно – абразивные и оснащенные пластинами)



1. Повышение срока службы инструмента по сравнению с базовой технологией, основанной на применении лезвийного быстрорежущего и твердосплавного инструмента при зенковании углепластиков в 7-8 раз, боропластиков – в 4-5 раз, органопластикой – в 10-12 раз;

2. увеличение производительность обработки в 3-5 раз;

3. улучшить качество обработанной поверхности, исключить поверхностные дефекты в зоне кромок – выкрашивания и округления, наружные трещины; исключить отслоения и внутренние дефекты –расслоения, растрескивание и прижоги; свести к минимуму действие термической деструкции полимерной составляющей, обеспечивая при этом параметр шероховатости Rz 20-40 мкм.