



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		
<b>Плотность, кг/м<sup>3</sup></b>	<b>1480</b>	<b>1500</b>	<b>1460</b>	<b>1360</b>	<b>7850</b>	<b>2750</b>
<b>Предел прочности, МПа</b>						
<b>при растяжении</b>	<b>1177</b>	<b>784</b>	<b>539</b>	<b>588</b>	<b>200-230</b>	<b>40-185</b>
<b>при сжатии</b>	<b>784</b>	<b>784</b>	<b>441</b>	<b>167</b>	<b>62</b>	<b>195</b>
<b>при изгибе</b>	<b>1471</b>	<b>1177</b>	<b>784</b>	<b>392</b>	<b>135</b>	<b>205</b>
<b>Модуль упругости, ГПа</b>						
<b>при растяжении</b>	<b>418</b>	<b>418</b>	<b>555</b>	<b>329</b>	<b>205</b>	<b>70</b>
<b>при сжатии</b>	<b>118</b>	<b>118</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)</b>	<b>0,70</b>	<b>0,47</b>	<b>0,39</b>	<b>0,14-0,17</b>	<b>32</b>	<b>209</b>
<b>Удельная теплоемкость, КДж/(кг·К)</b>	<b>0,90</b>	<b>1,03</b>	<b>1,00</b>	<b>1,47-1,89</b>	<b>0,561</b>	<b>0,894</b>

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.

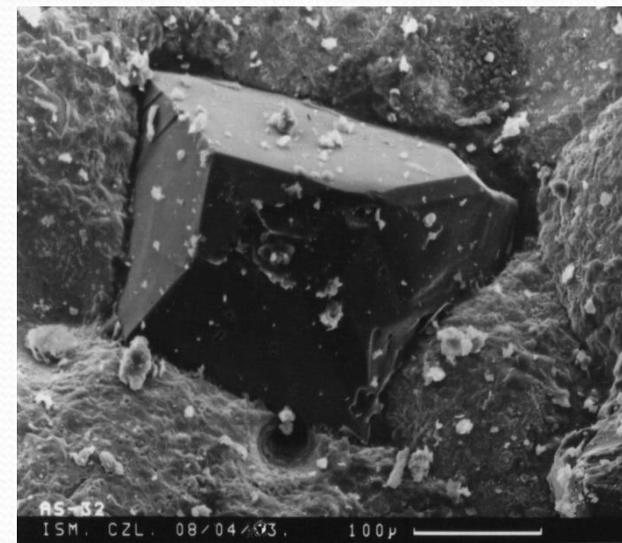
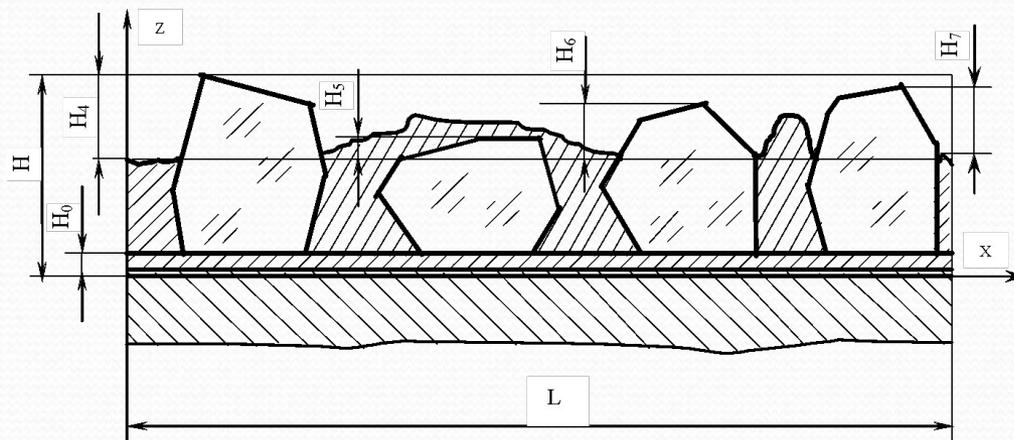
# Обоснование выбора инструментального материала для обработки полимерных композиционных материалов

Свойства	Размерность	Алмаз	Карбид кремния SiC	Электрокорунд Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Плотность *)	кг/м <sup>3</sup>	(3,48-3,56) · 10 <sup>3</sup>	(3,12-3,20) · 10 <sup>3</sup>	(2,00-2,10) · 10 <sup>3</sup>
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 <sup>-6</sup>	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*

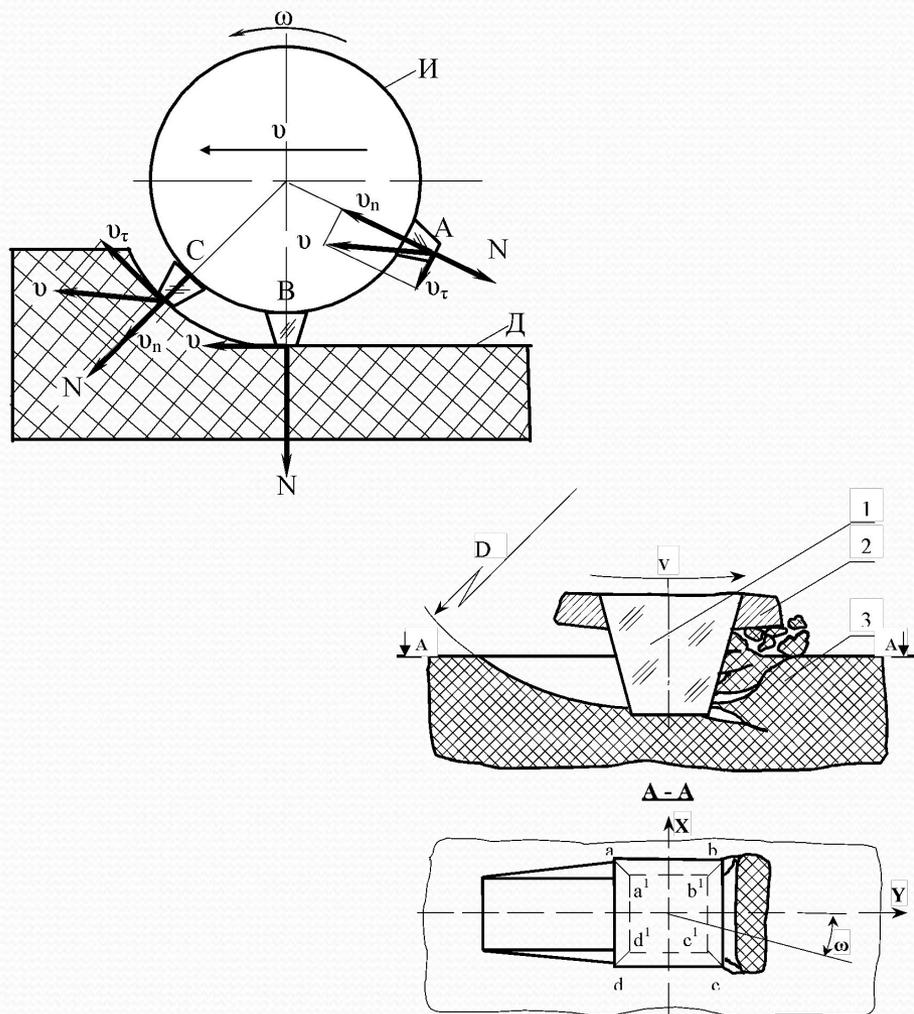
В связи с этим Важнейшей предпосылкой, которая была принята при обосновании выбора синтетического алмаза в качестве инструментального материала явилось следующее: высокая теплопроводность алмаза, которая в девять раз выше, чем у карбида кремния, и в семь раз, чем у электрокорунда. Сравнение физико-механических 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 $\Theta$ , 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  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  и  $\Theta_c$  – температура, соответственно, инструмента, детали и окружающей среды, К;  
 $\tau_1$  – время контактирования элемента инструмента в пределах дуги контакта, с;

$a_1$ ,  $a_2$  – коэффициенты температуропроводности, соответственно, инструмента и детали, м<sup>2</sup>/с;  
 $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – 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/м<sup>2</sup>;  
 $A = mC_2$  – энергия теплоты стружки, Дж;

$m$  – масса стружки, которая срезается инструментом с единицы площади за единицу времени, кг/(м<sup>2</sup>·с);

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

Плотность теплового потока

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

# 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  $t$

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

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

$b$  – 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/м<sup>2</sup>;

$F_1$  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.

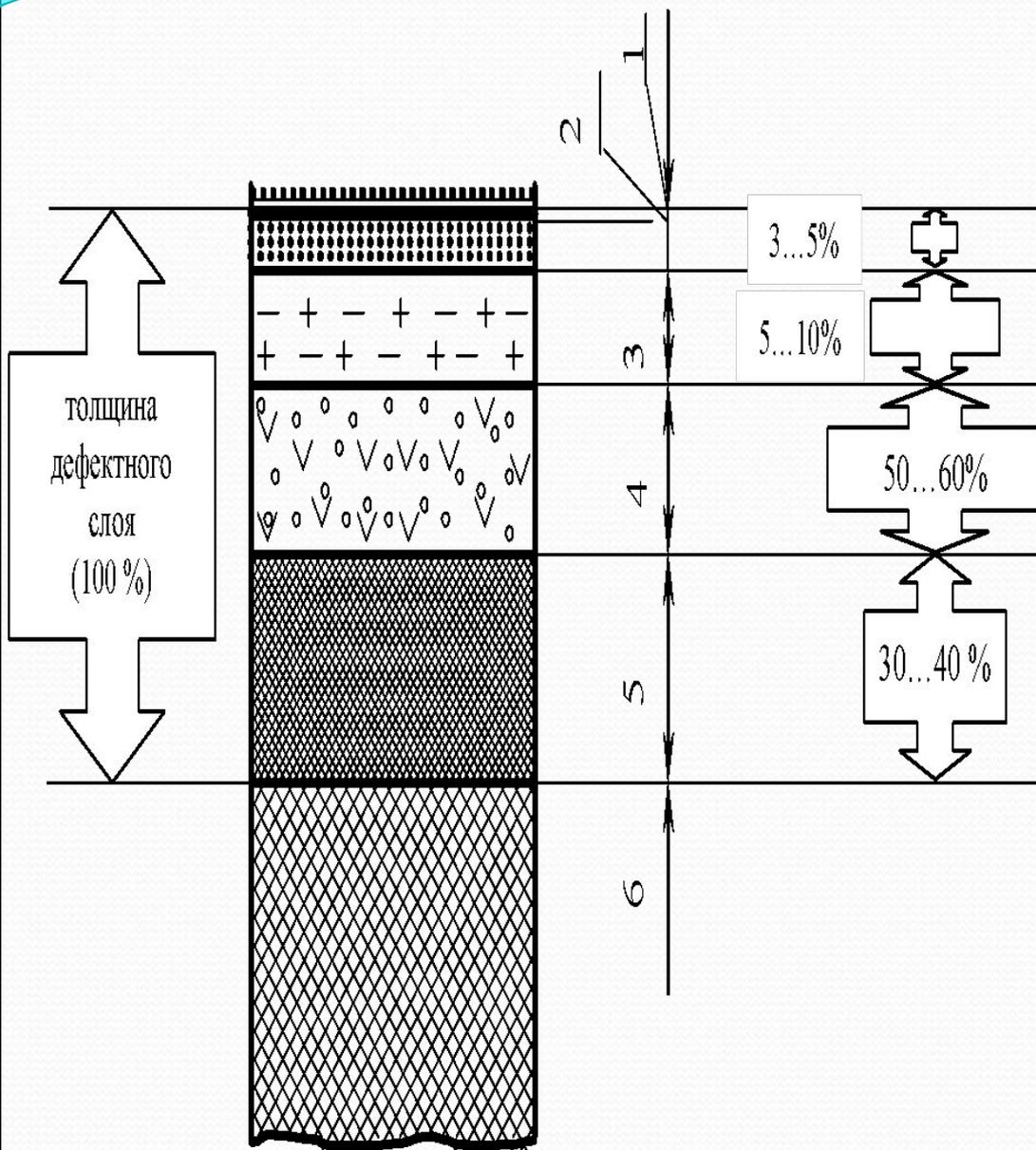
При этом, характер распределения температурного поля в инструменте и детали по координате  $X$  существенно различен.

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 деструктурируется и механодиспергируется, ухудшая эксплуатационные показатели изделий.

Глубина распространения деструктирования 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 деструктурированного полимера (5-10 %);

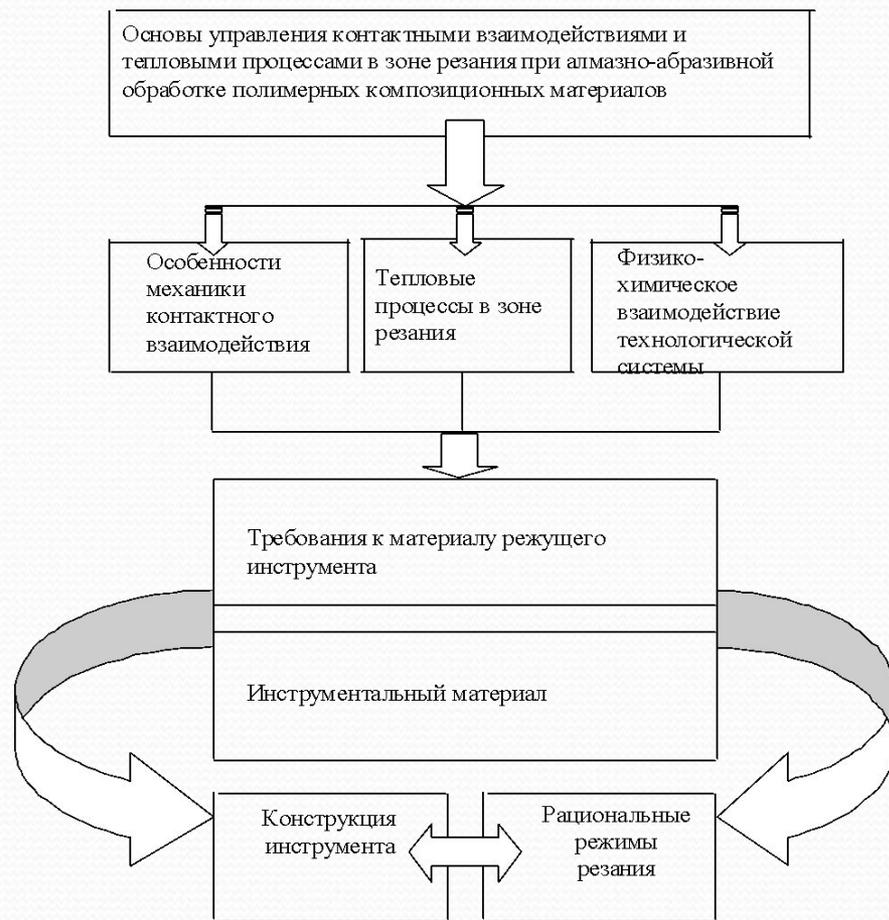
(4 слой) разрыхленный слой механодиспергированного наполнителя и деструктурированного полимера (50-60 %);

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

# Высокоэффективная технология алмазно – абразивной обработки современных ПКМ

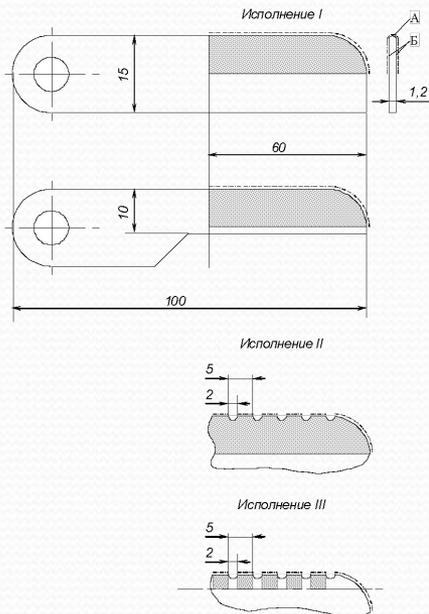
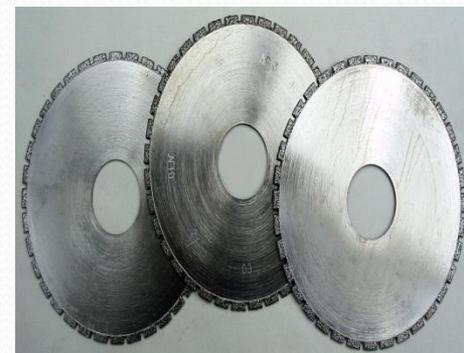
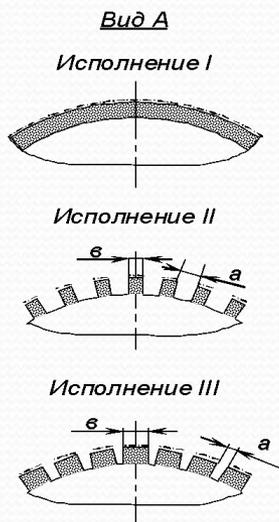
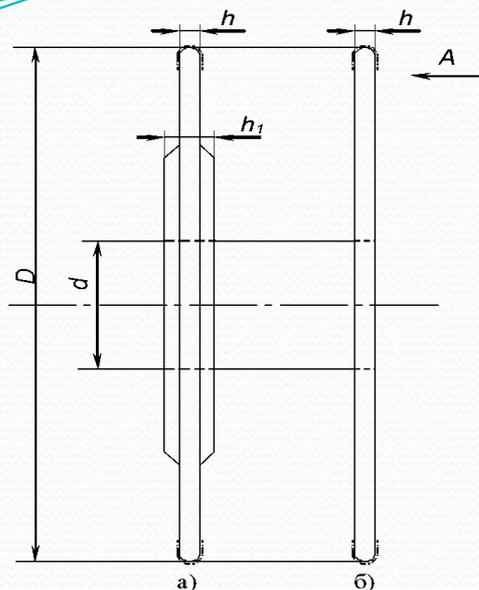
Концепция высокопродуктивной алмазно – абразивной обработки ПКМ, которая базируется на управлении механохимическими и теплофизическими явлениями путем направленного и регулируемого управления контактными взаимодействиями и тепловыми процессами в зоне обработки, которые минимизируют механохимические и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



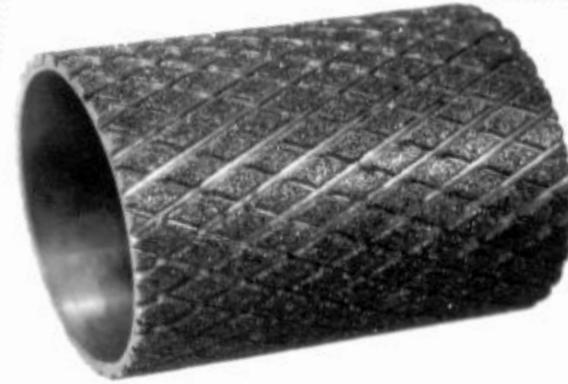
Алмазно – абразивные круги (барабаны) для высокопродуктивной механообработки полимерных композиционных материалов

# Однослойные алмазно – абразивные круги и ножовочные полотна

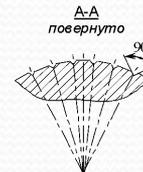
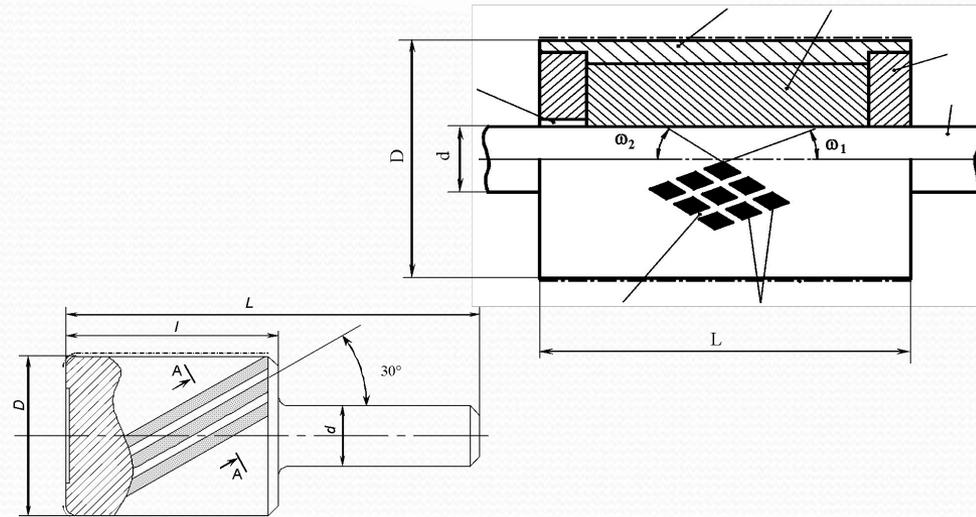


1. Повышение срока службы инструмента по сравнению с базовой технологией не менее чем в 5-7 раз.
2. Увеличение производительности обработки в 2,5-3,0 раза.
3. Улучшение качества обработанной поверхности (свести к минимуму действие термоокислительной деструкции полимерной составляющей, исключение прижогов,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

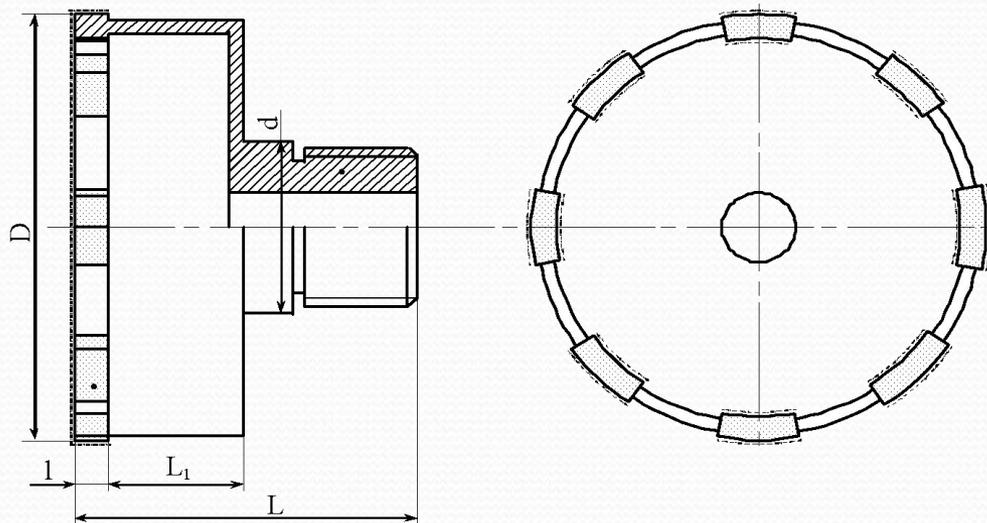
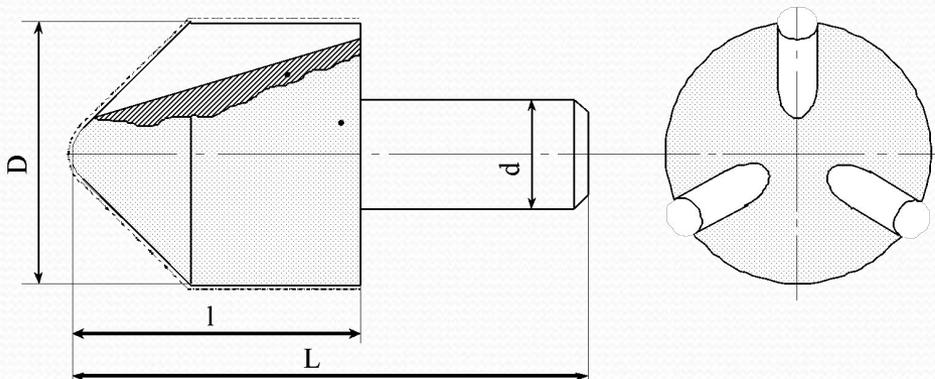
# Однослойные алмазно – абразивные круги (барабаны) и шлифовальные головки для шлифования полимерных композиционных материалов



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:

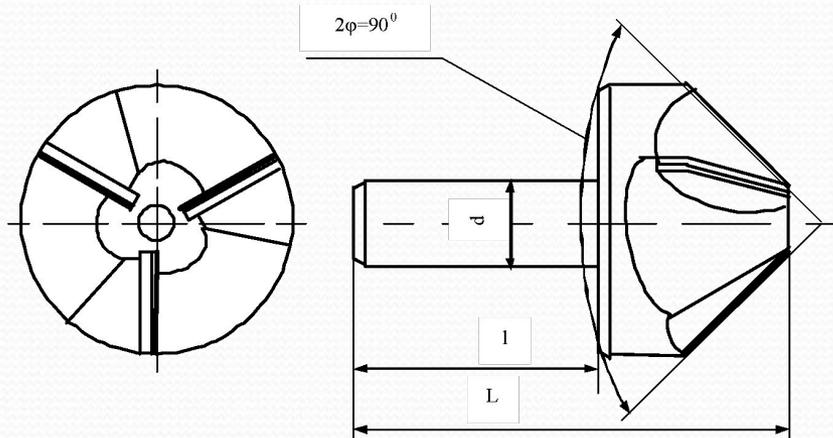
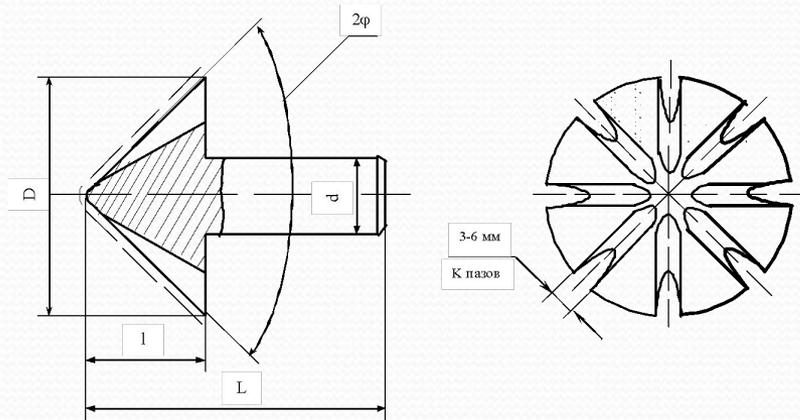
2. при сверлении отверстий в угле-, стекло- и органостеклопластиках в 5...10 раз.

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.