

## Новое о процессе резания

# 07, июль 2011

автор: Ярославцев В. М.

УДК 621.91.01

МГТУ им. Н.Э. Баумана

[nukmt@mx.bmstu.ru](mailto:nukmt@mx.bmstu.ru)

К настоящему времени в теории и практике резания накоплен большой фактический материал, который может служить основой для дальнейшего развития науки о резании. Обработка, систематизация, анализ и обобщение имеющихся многочисленных, подчас разрозненных и разнохарактерных данных о процессах и явлениях, сопровождающих обработку резанием, и их количественных характеристиках позволили автору статьи сделать вывод: *процесс резания можно считать одной из разновидностей взрыва*. Ниже показано, что резание является процессом динамическим и характеризуется взрывным механизмом разрушения.

Взрыв, как и всякое известное на данный момент физическое явление, поддается описанию через определения и параметры. Под взрывом понимают "процесс освобождения большого количества энергии в ограниченном объеме за короткий промежуток времени" [1]; "к взрывам относятся также процессы, в которых выделяется не внутренняя энергия вещества, а энергия внешнего источника" [2]. В технике к взрыву причисляют процессы мгновенного изменения состояния вещества [3].

Для всех разновидностей взрыва, независимо от физической природы источника энергии и способа ее освобождения, а также среды, в которой происходит взрыв, основными, определяющими параметрами этого явления считают время и удельное или объемное выделение энергии; в качестве дополнительных характеристик служат давление и температура. Наиболее типичными и широко распространенными примерами взрыва являются взрывы химических взрывчатых веществ (ВВ).

Характеристиками взрыва химических ВВ являются [4, 5]: малое время –  $\sim 10^{-5}$  с; объемное выделение энергии  $\bar{A}_W$ , характеризующее степень концентрации энергии, –  $\sim 4 \dots 8$  Дж/мм<sup>3</sup> (табл. 1); при этом давление  $p$  может достигать значений до 10 ГПа, а температура – 2000...4000 К.

Таблица 1

**Основные типы применяемых ВВ и их характеристики [5]**

<b>ВВ</b>	<b>Состояние ВВ</b>	<b>Плотность, т/м<sup>3</sup></b>	<b>Теплота взрыва, ккал/кг</b>	<b>Удельная работа взрыва (объемная), Дж/мм<sup>3</sup></b>
Тротил	Прессованный	1,45 – 1,55	1010	6,13 - 6,55
	Литой	1,52 – 1,58	1010	6,43 - 6,68
Аммонит	Порошкообразный, патронированный	0,95 – 1,10	1000	3,98 - 4,61
Аммонит № 6ЖВ	То же	1,00 – 1,20	1025	4,29 - 5,15
Аммонит скальный № 1	Прессованный	1,45 – 1,50	1270	7,71 - 7,98
Аммонал водо- устойчивый	Порошкообразный- патронированный	1,00 – 1,1	1156	4,84 - 5,32

При обработке резанием имеем: время деформирования и разрушения –  $10^{-4} \dots 10^{-7}$  с; удельная работа резания (работа, затрачиваемая на удаление единицы объема обрабатываемого материала)  $\bar{A}_W$  –  $2 \dots 70$  Дж/мм<sup>3</sup>; удельная сила резания (удельное давление резания)  $p_{St}$  –  $2 \dots 70$  ГПа.

Достоверность приведенных количественных характеристик процесса резания опирается на данные целого ряда крупнейших специалистов в области обработки резанием, справочные данные и результаты собственных исследований. Для сопоставления параметров обработки резанием и взрыва автором был сделан путем дополнительных расчетов переход от известных в науке о резании количественных характеристик деформационных процессов в зоне стружкообразования к параметрам, существенным для описания явления физического взрыва.

Для расчета временной характеристики были использованы результаты исследований скоростей деформаций, величины переходной зоны и соответствующих им значений скоростей резания. Так, обобщенные данные по конечным значениям деформаций  $\varepsilon$  и их скоростям  $\dot{\varepsilon}$  в работе [6] дают возможность вычислить время деформирования  $\tau = \varepsilon/\dot{\varepsilon}$ :  $\tau = (2\div 3) \cdot 10^{-4} \dots (2\div 3) \cdot 10^{-6}$  с. В работах [7, 8] приводятся сведения о величине  $\Delta x$  – переходной пластически деформируемой зоны I (рис.1) или "зоны сдвига" ( $\Delta x = 0,02$  мм и  $\Delta x = 0,0025$  мм) и соответствующие им скорости резания  $v$ . Откуда время деформирования  $\tau = \Delta x/v$  составляет  $10^{-5}$  и  $1,25 \cdot 10^{-6}$  с.

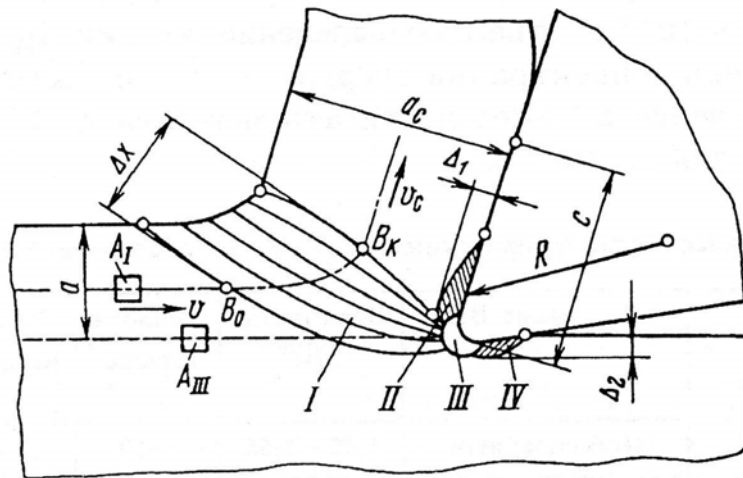


Рис. 1. Зоны деформаций и разрушения при превращении срезаемого слоя в стружку

Опытное определение времени деформирования материала было выполнено и автором. Исследования позволили установить, что даже для низких скоростей резания (0,3 м/с) ширина  $\Delta x$  зон I и III (см. рис.1) является малой и составляет 0,02...0,01 мм и менее. При этом время деформации  $\tau$ , как отношение  $\Delta x/v$ , равно  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  с. Ширина областей деформирования срезаемого слоя определялась для ряда материалов с помощью металлографических исследований методом микрокоординатных сеток.

Наибольшие скорости резания характерны для шлифования (до 100 м/с и более). Если для условий шлифования принять величину  $\Delta x$  равной  $\sim 0,01$  мм, как при лезвийной обработке (оценка по максимуму), то при скорости 100 м/с время деформации материала будет составлять  $10^{-7}$  с.

Таким образом, *время* характеризует обработку резанием как *динамический* процесс, обеспечивающий практически мгновенное изменение состояния обрабатываемого материала и его разрушение в зоне резания.

Для оценки напряженности процесса резания используются понятия "удельная сила резания" или "удельное давление резания" [7, 9, 6, 10 и др.], которые представляют собой отношение главной составляющей силы резания  $P_Z$  на площадь сечения срезаемого слоя  $S \cdot t = a \cdot b$ , т.е.  $p_{St} = P_Z / S \cdot t$  или  $p_{St} = P_Z / a \cdot b$ . Ряд зарубежных справочников по резанию, например [10], приводит величину давления на срезаемый слой как базовую для расчета составляющей  $P_Z$  силы резания по формуле Кинцле.

В табл. 2 представлены собранные из разных литературных источников [7, 10-14 и др.] численные значения силы  $P_Z$  и рассчитанные автором с их использованием и приведенных в табл. 2 данных для  $S$ ,  $t$  ( $a$ ,  $b$ ) значения удельного давления резания  $p_{St}$  для разных видов обработки и режимов резания, различных групп и марок обрабатываемых материалов. Частично значения  $p_{St}$  были взяты непосредственно из табличных и графических данных [10, 7, 14]. Для оценки  $p_{St}$  использовались также экспериментальные данные автора.

Таблица 2

**Расчетные данные энергетических параметров процесса резания**

Ис-точник	Вид об-ки резан.	Обрабатываемый материал	Режим резания			Сила $P_Z$ , Н	Уд. Сила резания $p_{St}$ , ГПа	$\bar{A}_w$ , Дж/мм <sup>3</sup>
			$v$ , м/с	$S$ , мм/об ( $a$ , мм)	$t$ , мм ( $b$ , мм)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
[11]	Точение и Растачиван.	Конструкционная сталь $\sigma_s=750$ МПа		0,01	1	94,9	9,5	9,5
				0,02	1	160	8,0	8,0
				0,08	1	451	5,6	5,6
				0,2	1	900	4,5	4,5
				0,5	1	1784	3,6	3,6

[12]	Точение	34ХН3М	3,3	0,02	1	123	6,2	6,2
			3,2	0,08	1	240	3,0	3,0
			2,8	0,2	1	500	2,5	2,5
			1,8	0,5	5	5020	2,0	2,0
		08Х17Н5М3	1,38	0,02	1	146	7,3	7,3
		07Х16Н6	3,37	0,08	1	322	4,0	4,0
			2,9	0,2	1	653	3,3	3,3
			1,2	0,5	2	2700	2,7	2,7
		ХН62ВМКЮ	0,80	0,02	1	738	36,9	36,9
		ХН60МВТЮ	0,67	0,08	1	692	8,7	8,7
		ХН82ТЮМЕ	0,58	0,2	1	1412	7,1	7,1
		Высокопроч- ные стали $\sigma_b \geq 1600$ МПа	0,43 0,67 0,48	0,02 0,08 0,2	0,5 0,5 0,5	100 243 509	10,0 6,1 5,1	10,0 6,1 5,1
[10]	Точение	СК 45 $\sigma_s=670$ МПа	1,6 – - 2	0,063		3,3*	3,3	
		18CrNi6 $\sigma_s=630$ МПа		0,063 0,1		5,2* 4,5*	5,2 4,5	
[10]	Фрезеро- вание	СК 45N		(0,0025)		70*	70	
				(0,005)		30*	30	
				(0,01)		13*	13	
				(0,02)		7,5*	7,5	
				(0,05)		5*	5	
	Прогна- вание	СК 45		(0,001)		45*	45	
				(0,0025)		18*	18	
				(0,005)		10*	10	
[7]	Стро- гание	35	0,23	(0,15)	(2,5)		2,9*	
		30ХГСА	0,25	(0,15)	(2,5)		3,2*	
1	2	3	4	5	6	7	8	9

[13]	Точение	30X	1	0,149	5	2100	2,8	2,8
		40XHM	0,28	0,03	1	700	23,3	23,3
		40XHM	0,28	0,1	1	1100	11,0	11,0
		35X3MH		0,1	4	1000	2,5	2,5
[*]	Струга- ние	50PACШ	0,33	(0,2)	(3,5)	2100	3,0	3,0
		BT6	0,33	(0,2)	(3,5)	2500	3,57	3,6
		Л63	0,33	(0,2)	(3,5)	900	1,29	1,3
	Точение	37X12H8Г8МФБ	0,54	0,06	1,5	490	5,4	5,4
			0,94	0,1	2	920	4,6	4,6
		ХН77ТЮР	0,65	0,05	1,5	645	8,8	8,8
		0,53	0,1	2	1120	5,6	5,6	
[14]	Шлифов. (1 зерно)	ШХ15		(0,003) (0,005)				44-61* 36-48*

Примечания. 1. \* - данные  $p_{St}$  и  $\bar{A}_W$ , взятые непосредственно из литературных источников

2. [\*] - данные автора

Расчетные, табличные и графические данные показывают, что удельные силы резания в зависимости от условий обработки могут изменяться в интервале 2-70 ГПа. При малых толщинах среза (0,02 – 0,001 мм) значения  $p_{St}$  особенно большие и могут достигать 70 ГПа и более. Следовательно, процесс резания является не только *динамическим* процессом, но и характеризуется *высоким давлением* (в физике к высоким давлениям относят давления, превышающие 0,1 ГПа [4]).

Ключевой параметр, определяющий наличие взрыва – объемное выделение энергии, автором оценивался через удельную работу резания  $\bar{A}_W$  (Дж/мм<sup>3</sup>), которая характеризует энергоемкость обработки и связана с силой резания зависимостью  $\bar{A}_W = P_Z v / (S \cdot t \cdot v)$  или,

что то же самое,  $\bar{A}_W = P_Z \cdot v / (a \cdot b \cdot v)$ . Исходные данные для расчетов и их результаты приведены в табл. 2. Там же представлены данные по величине удельной работы  $\bar{A}_W$ , взятые непосредственно из [7, 14]. Количественная оценка энергоемкости процесса резания показала, что высокие значения удельных сил резания обуславливают большие удельные работы, затрачиваемые на процесс деформирования, разрушения и формирование поверхностного слоя обработанной поверхности, и что энергетические условия обработки резанием соответствуют параметрам приведенного для сравнения химического взрыва, а при удалении тонких слоев материала многократно превосходят их. Так, например, при толщинах срезаемого слоя  $\sim 0,02 \dots 0,0025$  мм значение удельной энергии может достигать  $37 \dots 70$  Дж/мм<sup>3</sup>, что примерно в  $6 \dots 11$  раз выше, чем при взрыве тротила и в  $8 \dots 18$  раз – аммонита порошкообразного (см. табл.1). Как показали расчеты автора этой энергии достаточно, чтобы удаляемый слой материала довести до температуры плавления и расплавить 5-8 раз.

Приведенные численные характеристики напряженности процесса резания  $p_{St}$  и  $\bar{A}_W$  являются типовыми, о чем свидетельствуют оценочные расчеты величин удельных давлений и удельных работ, выполненные по данным большого количества технологических испытаний различных авторов.

Большое количество энергии, освобождение которой происходит за кратчайшее время ( $10^{-4} \dots 10^{-7}$  с) в узкой зоне стружкообразования ( $0,02 \dots 0,0025$  мм), приводит к мгновенному изменению состояния и исходных количественных параметров свойств обрабатываемого материала. По своим показателям эти изменения идентичны изменениям, зарегистрированным в физике высоких динамических давлений (ВДД) при специальных испытаниях в условиях кратковременного воздействия ударных волн сжатия от детонации ВВ.

Высокие давления (2-70 ГПа) и динамичность деформационных процессов, протекающих со скоростью  $\sim 10^4 \dots 10^8$  1/с, дают основания считать, что в зоне резания создаются условия разрушения, подобные искусственно создаваемым за счет использования энергии взрыва при исследовании ВДД. Это позволяет использовать положения физики высоких динамических давлений для характеристики параметров обработки резанием и оценить мгновенные локальные температуры в момент разрушения деформируемого материала. Согласно закономерностям физики ВДД "температура

определяется уравнением состояния вещества и зависит от величины достигнутого давления и сжатия. В конденсированных средах при давлении высоком порядка нескольких единиц или нескольких десятков ГПа температуры достигают значений в сотни и тысячи К" [4].

Обобщение приведенных выше характеристик взрыва химических ВВ и соответствующих данных процесса резания представлено в табл. 3.

Таблица 3

**Сравнительные данные динамических характеристик взрыва химических ВВ и процесса резания**

Характеристики	Взрыв химического ВВ	Процесс резания
Объемное выделение энергии, Дж/мм <sup>3</sup>	4...8	2...70
Время протекания процесса, с	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup> ...10 <sup>-6</sup> (10 <sup>-7</sup> )
Давление, ГПа	до 10	2...70
Температура, К	до 2·10 <sup>3</sup> ...4·10 <sup>3</sup> (в эпицентре)	до 1,5·10 <sup>3</sup> *) осредненная)

\*) Приведены осредненные температуры, зафиксированные на периферии зоны резания. Экспериментальных данных по температуре в местах протекания взрыва и разрушения при резании сегодня нет.

Определения явления взрыва и сравнение его количественных характеристик с аналогичными параметрами процесса резания позволяет подтвердить высказанное выше утверждение автора статьи, что резание является разновидностью взрыва, так как настоящее время в природе не известно другого физического явления, которое характеризовалось бы такими же параметрами изменения состояния вещества и называлось иначе, чем **взрыв**.

Взрыв при резании имеет свои особенности и свой механизм накопления и освобождения энергии. Взрыв происходит в среде твердого тела, подверженного воздействию внешней механической энергии, передаваемой рабочим инструментом



заготовке. Постоянство контакта обеспечивает непрерывное поступление механической энергии и ее накопление в виде внутренней энергии сопротивления разрыву атомарно-молекулярных связей и энергии сопротивления структурным превращениям. Накопление следует до момента потери энергетической устойчивости элементарными центрами разрушения, такими как электронные оболочки [15]. Источником взрыва служит концентрация выделившегося в процессе сложных, быстротекущих разного рода физико-химических явлений тепла. Одним из изученных в настоящее время процессов, протекающих в зоне стружкообразования, является процесс пластического деформирования материала срезаемого слоя. Именно поэтому автор предлагает новые для теории резания механизм и модель разрушения через взрыв, построенные на закономерностях пластического течения и пластического разрушения.

Физическая и физико-технологическая модели процесса резания рассматриваются автором на основе положения о технологическом процессе как едином механизме преобразования одного вида энергии в другой, одного качества в другое. Такой подход позволил впервые в теории резания описать процесс резания как целостное явление. Преобразование приложенной извне энергии происходит в результате взаимодействия всех элементов технологической системы и их взаимного обмена энергиями. На микроуровне результат таких преобразований выражается в изменении исходного состояния и свойств обрабатываемого материала. Свойства изменяются и трансформируются в условиях протекания сложных, многообразных, трудноуправляемых и разнохарактерных физико-химических процессов и явлений, определяющих тот или иной метод обработки. Процессы, идущие на микроуровне, в результате множественного суммирования переходят на макроуровень, где преобразованная внешняя энергия проявляется в виде полученных, например, точности, шероховатости или других результирующих показателей обработки.

Преобразование приложенной в стыке трения внешней механической энергии начинается при резании в момент первого касания заготовки инструментом. Отделение материала срезаемого слоя от заготовки происходит вдоль режущих кромок лезвийных инструментов в зоне *III* (рис. 1), непосредственно примыкающей к радиусу округления. На рис. 1 представлена общепринятая модель зоны резания с выделенной дополнительно наиболее напряженной локальной микрообластью зоны стружкообразования *III*.

Обозначенный на линии среза элементарный микрообъем материала  $A_{III}$  (рис. 1) в процессе перемещения при резании сначала испытывает все возрастающее действие напряжений сжатия, а затем, непосредственно у режущей кромки, совместное интенсивное действие напряжений сжатия и сдвига. Поле напряжений в области режущей кромки вызывает большие по величине и скорости деформации, создавая зону предразрушения, характеризующуюся сверхинтенсивным деформационным процессом, сопровождающимся накоплением энергии, потерей устойчивости равновесного состояния деформируемой системы и освобождением энергии, что приводит к взрыву и разрушению обрабатываемого материала. Разрушение наступает в результате разрыва межмолекулярных и атомарных связей. В результате одна часть материала заготовки после разрушения в зоне  $III$  становится стружкой и удаляется по передней поверхности инструмента, а вторая составляет поверхностный слой обработанного участка заготовки.

Металлографические исследования корней стружек, выполненные в разное время для многих конструкционных материалов, выявляют закономерность растекания обрабатываемого материала вдоль поверхностей контакта с режущим инструментом. На микрошлифах эффект растекания выглядит в виде тончайших, толщиной 1,5...10 мкм, «усов», расположенных практически параллельно друг другу. Объяснения этому факту не дано, есть лишь фиксация наличия слоистого строения материала и его высокой твердости в результате воздействия процесса резания.

Положение о взрыве при резании позволяет принять допущение о существовании областей обрабатываемого материала, в которых в силу их расположения в зоне резания и в результате мощного энергетического воздействия непрерывно возникающих взрывов, слои материала микроскопической толщины претерпевают переход в необычное, неизученное в настоящее время состояние, характеризующееся сверхтекучестью, и как расплав или магма обволакивают радиус округления режущей кромки инструмента и его контактные поверхности. Условия возникновения явления сверхтекучести в среде твердого тела сопоставимы с условиями, вызывающими взрыв при резании, и являются их следствием. При этом мгновенные состояния динамического равновесия обеспечивают среду построения слоистой конструкции из материала с новыми свойствами. Процессы, происходящие в зоне разрушения через взрыв, вызывают изменения, приближающие

исходные свойства обрабатываемого материала к прочностным характеристикам режущего инструмента.

Следует отметить, что роль третьего тела в виде прослойки материала, находящегося в состоянии сверхтекучести, и его влияние на характеристики трения и особенности износа режущего инструмента до настоящего времени не изучены.

Непрерывность действия внешней нагрузки с высокой периодичностью ( $10^{-4} \dots 10^{-7}$  с) в зоне резания формирует условия, аналогичные получаемым в результате использования взрывных и быстродействующих ударных механизмов при изучении физикой высоких динамических давлений эффектов ударных волн сжатия. Сверхвысокие скорости деформаций и сверхвысокие давления являются естественными условиями для процесса резания, они возобновляются и поддерживаются самим физико-химическим механизмом преобразования энергии при резании. Именно поэтому обработка резанием сопровождается непрерывным взрывным процессом: в зоне *III* постоянно формируются условия и готовятся новые очаги взрывов, которые следуют друг за другом со скоростью деформационных процессов, непрерывная цепочка которых идет вплоть до окончания процесса резания. Взрывной процесс разрушения с отделением материала стружки соответствует моменту начала образования текущего участка обработанной поверхности, и, следовательно, физико-химические параметры взрыва и его эффектов непосредственно участвуют в формировании качества поверхностного слоя и гарантии долговечности изготовленного изделия.

Процессы деформирования и разрушения материала в зоне первичной деформации *I* имеют свои особенности. При образовании стружки каждый конечный элемент объема  $A_I$  материала срезаемого слоя (см. рис. 1), проходя по траектории  $B_0B_K$  своего движения в переходной зоне *I*, непрерывно наращивает скорость и интенсивность сдвиговой деформации. Элементарные смещения осуществляются в направлениях касательной к поверхности сдвига в рассматриваемой точке деформируемого слоя. При этом имеет место кручение элементарных объемов материала вокруг своей оси в направлении сдвига. Движение объемных элементов разных размеров происходит по схеме "сдвиг+поворот" [16], при этом мгновенные значения угловых скоростей могут достигать  $10^5 \dots 10^6$  рад/с и более, что импульсно инициирует в корне стружки магнитомеханические явления (возбуждение магнитного поля при вращении электропроводного материала). Кручение до

настоящего времени как вид деформации при обработке резанием не рассматривалось. Импульсное изменение скорости и степени деформации прерывается в точке  $V_K$  на конечной границе зоны  $I$ . Совокупность энергий внутренних процессов и явлений проявляется в виде единичных всплесков, которые в условиях структурно-неоднородной среды носят множественный характер. Их внешнее проявление количественно описывается статистическими характеристиками, т.е. сопротивление деформированию представляет собой математическое ожидание всех микролокальных мгновенных взаимодействий внутренних связей в текущий момент времени.

На начальной стадии процесса резания всплеск деформаций и давления формирует зону предразрушения, завершаясь взрывом и последующим микроразрушением. Выделившаяся при этом энергия приводит в действие новые взрывные процессы в других, смежных поверхностях сдвига. Таким образом, зона предразрушения играет роль как бы детонатора, инициирующего взрыв. Этот неупорядоченный и, в то же время, статистически квазистационарный процесс продолжается до тех пор, пока осуществляется резание.

Динамическое разрушение материала в зоне  $I$  при резании происходит в условиях высоких сжимающих напряжений, действующих нормально поверхности сдвига (см. рис. 1), что обеспечивает плотный контакт по стыку разрушения. В результате чистые, без окислов, поверхности раздела материала после микроразрушения в условиях высоких нормальных давлений и температуры образуют за счет когезионных процессов новое соединение по отдельным, локальным микроучасткам. Отдых является обязательным элементом процесса. За время отдыха идет накопление внутренней энергии и как бы расслабление или затухание функций сопротивления изменениям. Затем накопленная энергия порождает активность разрушенных или полуразрушенных атомарных связей. Начинается процесс восстановления или обновления. Физический механизм процесса реновации материала в зоне резания подобен процессу сварки и происходит за счет внутренних энергий, выделяющихся при преобразовании энергии входа.

При продолжающемся в процессе стружкообразования динамическом нагружении и деформировании рассматриваемого микрообъема материала происходит новый взрыв и следующий за ним разрыв атомарных связей с последующим микроразрушением. После атомного взрыва вновь следует отдых и реновация материала, обновление атомарных

связей. И так далее. Процесс повторяется на протяжении всего времени превращения в стружку рассматриваемого элементарного объема материала срезаемого слоя, сопровождающегося переходом из одного энергетического состояния тела в другое. При этом идет непрерывная цепь взрывов, разрушение одних межмолекулярных взаимосвязей, образование новых и преобразование через эти процессы внешней механической энергии в энергии, необходимые для решения технологических задач заданного процесса обработки. Главной особенностью процесса деформирования и разрушения через взрыв в зоне *I* является сохранение, как правило, сплошности материала путем образования на поверхностях сдвига когезионных связей.

Описанный механизм деформирования и разрушения находит качественное подтверждение в экспериментальных исследованиях многих авторов. Отмечается, например, что в процессе стружкообразования наблюдается появление отдельных микротрещин внутри металла, внутренних микро- и макрополостей в условиях вакуума и отмечается возможность их «заваривания» [17]. С позиций рассмотренного механизма стружкообразования взрыв с локальным разрушением межмолекулярных взаимосвязей может вызывать образование трещин, микро- и макрополостей. Особенно большое влияние на образование трещин могут оказывать газовые включения в металлах.

Процессы разрушения и восстановления находят отражение в особенностях сопротивления материала деформированию в зоне резания.

Как отмечают авторы многочисленных исследований, изменение в широких пределах степени деформации материала при резании практически не влияет на сопротивление сдвигу в зоне стружкообразования, иначе говоря, при больших деформациях материал не упрочняется. Более того, в некоторых случаях наблюдается разупрочнение материала с увеличением степени деформации, что обычно предшествует переходу от образования сливной стружки к суставчатой [17]. Отмечается, что причина стабилизации и снижения сопротивления сдвигу при резании не вполне ясна и этому явлению в литературе дают разные объяснения. Например, Б. Чао, К. Триггер и Л. Зильстра связывают явление разупрочнения с особыми условиями деформации при больших скоростях сдвига, П. Бриджмен – с локальными разрушениями, Н. Зорев – с исчерпанием физической возможности материала к упрочнению при пластическом деформировании [13].

По мнению автора это означает, что стандартные испытания материалов при простом статическом растяжении или сжатии не отражают всей сложности процессов в зоне стружкообразования при резании. Поэтому экстраполяция обычной экспериментальной зависимости  $\sigma_i-\varepsilon_i$  в область больших деформаций не дает удовлетворительного совпадения с опытными данными обработки резанием. Объяснение явления стабилизации или разупрочнения материала в зоне стружкообразования при больших деформациях можно найти с позиций нового подхода к обработке резанием.

Описанная выше модель деформирования и взрывного механизма разрушения материала позволяет выделить два характерных последовательно действующих во времени процесса: упруго-пластической деформации (до момента исчерпания запаса пластичности материала и его разрушения в конкретных условиях) и циклической деформации по схеме "термопластический сдвиг-взрыв-разрушение-отдых-реновация-...". Процесс упруго-пластических деформаций обрабатываемого материала при известных допущениях может быть описан классической диаграммой интенсивностей напряжений и деформаций  $\sigma_i-\varepsilon_i$ , тогда как процесс циклической деформации в эту диаграмму не вписывается. В связи с этим предлагается построенная на базе известной диаграммы растяжения-сжатия ее новая версия, которая имеет продолжение в область больших пластических деформаций (рис. 2).

На диаграмме больших пластических деформаций  $\sigma_i-\varepsilon_i$  для условий высокоскоростных деформационных процессов выделим два участка: *A* – участок упруго-пластической деформации, где механизм образования стружки в зоне резания определяется закономерностями пластического деформирования материалов; *B* – участок больших термопластических деформаций.

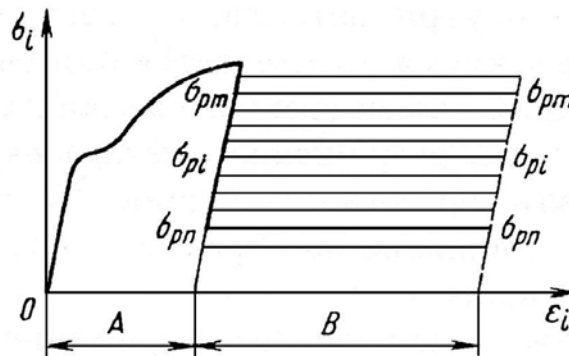


Рис. 2. Диаграмма больших пластических деформаций для условий высокоскоростных деформационных процессов

Сверхскоростные термодинамические деформационные процессы на участке  $A$  подготавливают условия для взрыва, разрушения и сварки (образования когезионных связей). Момент изменения механизма деформирования в зоне резания (граница между участками  $A$  и  $B$ ) представлен на диаграмме в виде ступенчатого излома. Инициирование первого множества взрывов приводит к постоянному их повторению до завершения процесса перехода рассматриваемого микрослоя обрабатываемого материала в стружку. Сопротивление деформированию на участке  $B$  определяется совместным, интегральным действием быстротекущих внутренних процессов: термодинамического сдвига, взрыва, ударного сжатия, динамического разрушения и сварки. Для описания энергетического условия, при котором существует явление физического взрыва, будем пользоваться понятием "взрыв" как условной энергетической характеристикой, отвечающей за потерю устойчивости внутреннего сопротивления динамическому разрушению. При установившихся условиях протекания всех внутренних процессов зависимость  $\sigma_i - \varepsilon_i$  на участке  $B$  выражается пучком прямых, параллельных оси деформации. Пучок прямых на участке  $B$  отражает разную величину сопротивления деформированию материала (осредненные значения полей напряжений) в зависимости от физико-химических условий на локальных участках, которые подвержены в данный момент времени процессам взрыва, разрушения, сварки, и составляет семейство разнонапряженных линий сдвига. На диаграмме также даются зависимости  $\sigma_{pm} - \sigma_{pm}$ ,  $\sigma_{pi} - \sigma_{pi}$ ,  $\sigma_{pn} - \sigma_{pn}$ , которые соответствуют условиям образования трех различных типов стружек и перехода одного типа стружки в другой.

Как видно из рис. 2, характер кривых  $\sigma_i - \varepsilon_i$  при  $\sigma_i \approx \sigma_{pm}$  на участке  $B$  для разных материалов хорошо объясняет отмечавшуюся ранее стабильность средних значений напряжений в плоскости сдвига и малую их зависимость от степени деформации. Снижение уровня когезионного взаимодействия сопрягаемых поверхностей в моменты разрушения на участке  $B$  (прямая  $\sigma_{pi}$ , например) выражается в уменьшении средних значений напряжений в плоскости сдвига или в «разупрочнении» материала, на что также неоднократно указывали исследователи. «Разупрочнение» увеличивается с ростом степени деформации, т.е. величины участка  $B$  зависимости  $\sigma_i - \varepsilon_i$ .

Количественные характеристики контактного взаимодействия материала на стыке разрушения при его деформировании на участке больших деформаций определяют особенности процесса стружкообразования и тип образующейся стружки. Внешний вид удаленного слоя может изменяться в широких пределах. Поэтому в настоящее время принято рассматривать отдельно различные, характерные случаи внешнего проявления механизма стружкообразования. Вместе с тем известно, что при резании материала с одинаковыми исходными свойствами изменения условий обработки вызывают переход одного типа стружки в другой, что позволяет полагать единый физико-химический механизм их образования.

Если способность материала к образованию новых межмолекулярных связей высокая и обеспечивает прочность, близкую к прочности материала до его разрушения, то реализуется зависимость с высоким уровнем сопротивления сдвиговым деформациям на участке  $B$  ( $\sigma_{pn} - \sigma_{pn}$  на рис. 2). В этом случае образуется стружка, относящаяся к семейству сливных – стружка когезии. К поверхностям сдвига, в которых уже наступил процесс «сдвиг-разрушение-реновация-сдвиг...», непрерывно подключаются новые поверхности. Этим объясняются достаточно однородные свойства деформированного материала по всей длине образующейся сливной стружки.

Обработка материалов, для которых межмолекулярное взаимодействие на сопрягаемых поверхностях сдвига при конкретных условиях резания проявляется относительно слабо, сопровождается образованием стружки надлома или элементной стружки, т.е. стружек разрушения. На графике рис. 2 верхний предел такого слабого взаимодействия условно показан некоторой зависимостью  $\sigma_{pn} - \sigma_{pn}$ , нижним является совмещение прямой  $\sigma_{pn} - \sigma_{pn}$  с осью абсцисс, т.е. полное отсутствие когезионного схватывания. Разрушение и микросдвиг по одной из поверхностей скалывания в условиях слабого взаимодействия приводит к резкому снижению усилия сопротивления материала его смещению (см. рис. 2). Это нарушает равновесие сил в зоне резания и приводит к локализации сдвига элемента стружки по ослабленным направлениям. Развитие деформации по плоскости скалывания реализуется через циклический процесс «сдвиг-разрушение-когезия-сдвиг...», рассмотренный выше. Внешне это проявляется в виде мгновенного, как бы спонтанного распространения трещины. Процесс завершается



полным отделением элемента стружки от срезаемого слоя. Далее образование отдельных блоков элементной стружки или частиц стружки надлома периодически повторяется.

Промежуточные значения сопротивления материала разрушению при деформации (зависимость  $\sigma_{pi} - \sigma_{pi}$  рис. 2) соответствуют образованию при резании широкого спектра суставчатых стружек или стружек смещения. При прочности межмолекулярных связей, приближающихся к значениям  $\sigma_{pm} - \sigma_{pm}$ , вид стружки практически не отличается от сливной. По мере снижения прочности когезионных связей суставчатость стружки возрастает, т.е. выступы и впадины на ее свободной стороне, характеризующие строение стружки как бы состоящей из отдельных блоков, проявляются в большей степени. Вместе с тем, в отличие от образования стружки надлома и элементной стружки, наметившаяся поверхность скалывания не пронизывает стружку по всей толщине, и нарушения когезионных связей между отдельными блоками-суставами не происходит.

Таким образом, образование разных типов стружек, имея в основе своей единый физико-химический механизм, связан с разной интенсивностью межмолекулярного взаимодействия в плоскости сдвига на участке больших деформаций  $B$  рис. 2.

Детальное изучение процессов и явлений, происходящих в зоне резания, закономерностей их протекания представляется важным, поскольку они являются источниками преобразованной энергии и формируют реальный результат обработки. Технологический процесс обработки резанием преобразует механическую энергию через деформационные процессы, взрыв и его проявления, которые в свою очередь вызывают в среде твердого тела металлургические и сварочные процессы. Металлургические и сварочные процессы, проходя в замкнутом объеме без непосредственного контакта с внешней средой, характеризуются высокими степенями очищения расплавленного и закристаллизовавшегося металла. Об этом свидетельствуют измерения микротвердости поверхностных слоев обработанной поверхности: все исследования в области резания отмечают повышение твердости в 1,1...1,4 раза по сравнению с твердостью исходного материала.

Кроме процессов сварки, металлургии и связанных с ними процессов кристаллизации в зоне резания идут процессы адгезии, диффузии, когезии, наростообразования, имеет место внутреннее и внешнее трение, кручение, электромагнитные излучения и другие. Отсюда следует, что качество обработанной

поверхности и гарантия долговечности обрабатываемого объекта зависят от всех процессов и явлений, происходящих как в зоне резания, так и в пограничных с ней областях. Поэтому в основу положений о процессе резания необходимо принять не только представление о пластических деформациях, но и о взрыве как источнике многих видов энергий, инициирующих при резании качественно разные физико-химические процессы и явления, которые формируют основные характеристики обработки.

Представления о резании как взрывном, динамическом процессе с действующими высокими импульсными давлениями дает возможность уже сегодня обогатить теорию и практику механической обработки материалов всеми научными достижениями, которыми располагает физика высоких динамических давлений. Это позволяет разработать новую теоретическую базу с учетом нетрадиционных для обработки резанием явлений ударно-волнового сжатия, протекания разных процессов изменения агрегатного состояния обрабатываемого материала в результате воздействия взрывной волны и ее эффектов, таких, например, как высокие локальные температуры, фазовые превращения, изменение плотности материала и скоростей протекания физико-химических процессов и др.

Вместе с тем, сам процесс резания можно рассматривать как новый гибкий метод испытания материалов в уникальных динамических условиях их нагружения. Резание позволяет изучить взрыв в твердом теле и его закономерности. Эмпирические зависимости энергетических характеристик процесса резания и их связь с режимами обработки дают возможность в широких пределах управлять параметрами взрыва и регулировать меру его воздействия на материал.

### *Литература*

1. Большая Советская Энциклопедия. В 30 томах / Гл. ред. А.М.Прохоров. 3-е изд. М.: Сов. Энциклопедия. Т.5, 1971. 640 с.
2. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М.Прохоров. М.: Сов. энциклопедия, 1983. 928 с.
3. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. В 2-х частях. Часть I. Деформация и разрушение. М.: Машиностроение, 1974. 472 с.
4. Физическая энциклопедия. В 6 томах / Гл. ред. А.М.Прохоров. М.: Сов. энциклопедия. Т.1, 1988. 704 с.

5. Штамповка взрывом. Основы теории / Под ред. М.А.Анучина. М.: Машиностроение, 1972. 152 с.
6. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
7. Клушин М.И. Резание металлов. М.: Машгиз, 1958. 454 с.
8. Рехт Р.Ф. Разрушающий термопластический сдвиг // Труды амер. об-ва инж. мех. Серия Е. Прикладная механика. 1964. Т.31, №2. С. 34-39.
9. Резание металлов / Г.И. Грановский [и др.]. М.: Машгиз, 1954. 412 с.
10. Справочник по технологии резания материалов. В 2-х кн. Кн. 1. / Ред. нем. изд.: Г. Шпур, Т. Штеферле; Пер. с нем. В.Ф. Колотенкова и др.; Под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Машиностроение, 1985. 616 с.
11. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1 /Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К.Мещерякова. 4-е изд. М.: Машиностроение, 1985. 656 с.
- 12.Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник / Я.Л. Гуревич [и др.]. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1986. 240 с.
- 13.Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 368 с.
- 14.Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. М.: Машиностроение, 1977. 263 с.
- 15.Уманский Я.С., Скаков Ю.А. Физика металлов. Атомное строение металлов и сплавов: Учебник для вузов. М.: Атомиздат, 1978. 352 с.
- 16.Панин В.Е., Коротаев А.Д., Макаров П.В. Физическая мезомеханика материалов // Известия вузов. Физика. 1998. №9. С. 8-36.
- 17.Развитие науки о резании металлов / В.Ф.Бобров [и др.]. М.: Машиностроение, 1967. 416 с.

*Материалы ранее были опубликованы в статьях:*

- 1.Ярославцев В.М. Новое о процессе резания // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение, 2000. №4. С. 32-46.
2. Ярославцев В.М. Взрыв и сверхтекучесть при обработке металлов резанием // Материалы 6-го Всероссийского Совещания-семинара «Инженерно-физические проблемы новой техники». Москва, 16-18 мая 2001. М., 2001. С. 65-66.