

Нанопроцессы при обработке резанием

09, сентябрь 2011

автор: Ярославцев В. М.

УДК 621.91.01

МГТУ им. Н.Э. Баумана

<http://wwwcdl.bmstu.ru/mt13/>

nukmt@mx.bmstu.ru

В основе современной базы знаний о физической сущности и процессах в зоне обработки лежат в настоящее время главным образом макроскопические представления. Очевидно, что по мере исчерпания внутренних резервных возможностей такого подхода результативность его применения при создании и совершенствовании новых методов и технологий снижается и не обеспечивает необходимого прогресса в этой области. Так, большое количество выполняемых сегодня в мире исследований процесса резания не приводит к соответствующим по значимости практическим достижениям, качественному повышению эффективности или структурному изменению процессов обработки, управление которыми производится на основе накопленных за длительный период времени эмпирических данных.

Дальнейший прогресс в области обрабатываемых технологий требует исследований и научно-теоретического обеспечения, выполненных на новом уровне знаний, а именно знаний, проникающих вглубь изучаемых явлений. Представляется, что прорыв к познанию качественно новых возможностей методов обработки может быть достигнут через изучение процессов, происходящих на микро- и наноуровне [1], что позволит обеспечить качественно новой информацией о процессах и явлениях в зоне обработки и создать фундамент для разработки более полной и достоверной модели процесса резания, выявить пути и средства коренного повышения его эффективности, получения недостижимых в данный момент параметров качества изделий.

Ниже автор приводит свое представление о процессах и явлениях, сопровождающих обработку резанием, основывающееся, в том числе, на личных разработках.

При обработке резанием в процессе стружкообразования имеет место непосредственное контактное взаимодействие двух твердых тел – инструмента и заготовки. В действительности «прямого» контакта этих тел не существует. Они отстоят

друг от друга и разного рода взаимодействия границ тел осуществляются посредством тех или иных *полей*, непрерывно распределенных в пространстве. Т.е. взаимодействие тел осуществляется через взаимодействие их полей в условиях окружающей среды. Среда (третье тело) отличается физико-механическими свойствами, но в целом имеет ту же природу взаимодействия с физическими телами и тот же механизм воздействия на рассматриваемый процесс.

По современным данным в природе имеется четыре типа фундаментальных полей взаимодействия: электромагнитное, слабое, сильное (ядерное) и гравитационное. В пространстве указанные взаимодействия переносят кванты соответствующих полей: фотоны, промежуточные векторные бозоны, глюоны и гравитоны.

Физический механизм контактного взаимодействия и взаимовлияния полей инструмента и заготовки в целом подобен тому, который осуществляется при различного рода взаимодействиях между отдельными частицами или системами элементарных частиц этих тел (веществ) на атомно-молекулярном уровне. Толщина полевого слоя на границе (на стыке) взаимодействующих тел зависит от структурных систем, которые они образуют, и от количественных параметров их состояния (температура, давление и др.).

В соответствии с изложенным все материалы и вещества мы вправе рассматривать как квазикомпозиционные материалы, в которых связующим (матрицей) являются поля энергетического взаимодействия (энергетические зоны) составляющих атомов, молекул, кристаллов, а арматурой (наполнителем) - соответствующие элементарные частицы. В этом случае сам процесс резания представляет собой взаимодействие энергетических полей на стыке материалов инструмента и заготовки, а результат обработки - это результат взаимодействия полей. Это принципиально новый подход, значительно расширяющий круг рассматриваемых явлений, позволяющий на основе анализа микро- и нанопроцессов упорядочить результаты макроэкспериментов и предсказывать результаты технологических воздействий на заготовку. Раньше такой подход к изучению методов обработки не применялся. Концепция взаимодействия полей дает возможность наряду с традиционными методами изучения и совершенствования процесса резания использовать качественно новый прием для разработки технологий обработки материалов, основанный на поиске изнутри условий высокоэффективной обработки.

Общая картина происходящего в зоне стружкообразования представляется следующим образом.

При обработке резанием внешнее механическое воздействие поля инструмента на поле заготовки (или наоборот) вызывает соответствующие проявления механических свойств взаимодействующих тел. В частности, распределенные по контактным площадкам

поверхностные силы вызывают в телах объемные поля напряжений. Напряжения в этом случае – внутренние удельные силы между смежными частицами материала.

Поля напряжений, характеризующие силы, действующие между атомами, создают в контактирующих телах соответствующие поля деформаций. На уровне атомов или ионов, образующих структуру материала, это выражается в смещении их относительно установившихся до этого равновесных положений, а также происходит упругая деформация локальных полей взаимодействующих между собой атомов и ионов тела. Эти поля несколько (очень немного) «сплющиваются», преодолевая ядерную силу отталкивания ионов или атомов на близких расстояниях, что и служит соответствующей компенсацией действующих напряжений. При высоких значениях напряжений происходит разрушение существующих атомно-молекулярных связей, перестройка структуры материала и образование новых связей, обеспечивающих новое равновесное состояние претерпевшего изменения материала.

Таким образом, сущность процесса преобразования свойств материала при резании, как и во всех других известных технологических методах обработки, заключается в нарушении его текущего равновесного состояния. Единым физическим инструментом изменения сложившегося равновесия является энергия, под воздействием которой включаются физико-химические процессы, которые стремятся поддержать равновесное состояние материала в новых энергетических условиях. При этом разрушаются старые атомно-молекулярные связи и образуются новые. В результате после восстановления первоначальных параметров окружающей среды структура и свойства материала, претерпевшего дополнительное энергетическое воздействие, будут отличаться от исходных.

Взаимодействие полей механических сопровождается при резании взаимодействием температурных полей, объемными химическими, диффузионными процессами и множеством других процессов и явлений, одновременное протекание которых и обеспечивает перестройку структуры материала, его послойную и зеренную дефрагментацию и разрушение, образование новых атомно-молекулярных связей.

Так, методом структурной электронографии установлено, что после обработки тонким шлифованием, притиркой и отделочным шлифованием поверхностные слои состоят из трех зон [3].

Первая зона (наружная) представляет собой адсорбированную сгущенную пленку газа толщиной от 2 до 3 Å. Пленку можно удалить нагревом в вакууме, однако при соприкосновении поверхности с воздухом она образуется снова.

Вторая зона в зависимости от вида обработки составляет от 15 до 80 Å и состоит из окислов нитридов и металла, обезуглероженного действием высоких температур при шлифовании, из частиц абразива, окислов и пыли – после притирки, из частиц окислов и пыли – после отделочного шлифования.

Третья зона распространяется на глубину 15000...50000 Å и состоит из деформированных зерен металла. После тонкого шлифования этот слой содержит включения карбидов, выделившихся под действием высоких температур и делающих этот слой хрупким. Третья зона переходит в металл, нетронутый механической обработкой.

С энергетической точки зрения процесс резания металлов относится к локализованным высокоэнергетическим технологическим методам обработки, который сопровождается большим числом сложных взаимосвязанных и взаимообусловленных физико-химических процессов и явлений. При резании большая мощность электродвигателя металлорежущего станка передается на малый по размерам контактный участок обрабатываемой заготовки. Приложенная извне механическая энергия локализуется в зоне резания в местах протекания процессов деформации и разрушения и преобразуется при этом в другие виды энергии.

Расчеты показывают, что по своим энергетическим характеристикам процесс резания на микроуровне соответствует явлению взрыва [3, 4].

В таблице даны сравнительные характеристики параметров обработки резанием, характеризующие взрыв как физическое явление, и такие же параметры одного из самых распространенных видов взрыва - взрыва химических взрывчатых веществ (ВВ).

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

*) Приведены численные значения объемного выделения энергии наиболее распространенных типов химических ВВ, таких как тротил, аммонит №7, аммонит №6ЖВ, аммонит скальный №1, аммонал водостойчивый.

***) Данные объемного выделения энергии и действующих давлений в процессе резания получены на разных операциях, при обработке широкой номенклатуры конструкционных материалов и разных режимах обработки.*

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

Как видно, динамические параметры процесса резания не только не уступают взрыву ВВ, но могут существенно превосходить их. Технологические особенности разных видов обработки с различными кинематическими схемами нагружения не меняют высокоэнергетического взрывного характера разрушения при обработке резанием [3]. Состояние материала в стружке и поверхностном слое обработанной поверхности является следствием не только самого взрыва, но и вызванных им эффектов.

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. Источником взрыва служит концентрация выделившейся в процессе сложных, быстротекущих разного рода физико-химических явлений лучевой энергии.

Таким образом, при резании в зонах кумуляции (локализации) энергии происходит взрывное преобразование микроструктуры и свойств материала, а средой (прослойкой) между обрабатываемым материалом и инструментом является пространство с условиями взрыва.

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 [5], 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.

В микропорах материала при импульсном воздействии давления резания с параметрами взрыва происходит ударное сжатие среды, развиваются процессы, характерные для имплозии. Это может сопровождаться локальным импульсом чрезвычайно высокой температуры [6]. Из уравнения состояния для идеального газа (закон Мариотта - Гей-Люссака) следует, что при давлениях 10...70 ГПа всплеск температуры достигает $3 \cdot 10^7 \dots 2 \cdot 10^8$ К. Данная количественная оценка не учитывает потерь энергии, связанных с изменением фазового состояния вещества в указанном температурном диапазоне. Тем не менее, можно полагать, что процессу резания свойственны явления, характерные для температур на 1-2 и более порядков выше температуры, зафиксированной в настоящее время на периферии зоны резания.

При резании металлов в технологической системе возникают термоэлектрические токи, возбуждаемые термоэлектронной эмиссией, термоэлектрическими и термомагнитными эффектами. Существенную роль при термоэлектрических эффектах играет контактная разность потенциалов на стыке трения в результате межмолекулярного взаимодействия разнородных материалов (например, заготовки и инструмента) при высоких температурах (явление Зеебека). При прохождении электрического тока в материале с неоднородным распределением температуры в его объеме идут процессы выделения или поглощения тепла (эффекты Пельтье, Томсона). Явление термоэлектронной эмиссии при резании сопровождается термомагнитными и

гальваномагнитными эффектами (Холла, Нернста, Эттингаузена, Маджи-Риги-Ледюка и др.), определяющими воздействие магнитного поля на теплопроводность и силу тока.

Ударно-волновое сжатие обрабатываемого материала также приводит к появлению электродвижущей силы (ЭДС) и электромагнитному излучению [4].

Механическое воздействие на металл и образование в нем трещин различного уровня (от отдельных несовершенств кристаллического строения материала до макротрещин) вызывает явление экзоэлектронной эмиссии – испускание электронов холодным металлом. В этом случае энергия, необходимая для вылета экзоэлектрона из металла, освобождается при переходе атома из слабосвязанного состояния в более сильно связанное состояние на поверхности.

В зонах интенсивных деформационных процессов имеет место кручение элементарных объемов материала вокруг своей оси в направлении сдвига по схеме «сдвиг + поворот» [3], при этом мгновенные значения угловых скоростей могут достигать $10^5..10^6$ рад/с и более, что импульсно инициирует в корне стружки магнитомеханические явления (возбуждение магнитного поля при вращении электропроводного материала).

Разные по своей физической природе электромагнитные процессы и явления, связанные с ними, протекают в зоне стружкообразования одновременно, переплетаются и представляют собой «жгут» взаимодействующих и взаимовлияющих энергетических образований, которые и формируют конечный результат обработки.

На макроуровне установлено влияние электромагнитных явлений и эффектов при резании металлов на износ и период стойкости режущего инструмента.

Динамические процессы при резании вызывают генерирование волн механической и электромагнитной природы, которые несут информацию о физико-механических условиях в зоне стружкообразования. Регистрация и анализ волн напряжений и электромагнитных колебаний позволяет использовать их для активного контроля процесса резания и оптимизации режимов обработки (методы диагностики на основе исследований акустической эмиссии, электромагнитных, экзоэлектронных колебаний и др.).

Приведенные выше результаты показывают, что ударно-волновое воздействие на твердые деформируемые тела является уникальным средством получения неравновесных состояний вещества. Это связано с высокими значениями градиентов термодинамических и кинематических параметров во фронте ударной волны, что приводит как к упорядочиванию, так и к разупорядочиванию структуры вещества на любом уровне – от механической структуры до внутримолекулярных процессов.

Уникальные характеристики процесса резания могут формировать также неординарные физико-механические и химические свойства металла. Наиболее близкие к резанию условия кратковременного воздействия ударных волн сжатия на материал изучает физика высоких давлений (ФВД). Достижения ФВД позволяют частично прогнозировать ожидаемые результаты исследования процесса резания на атомно-молекулярном и нано уровнях.

Установлено, что действие на материал высокого давления (более 0,1 ГПа) в сочетании с повышенными температурами может вызывать значительные изменения его структуры и свойств [7]. Под высоким давлением происходит увеличение плотности вещества, многие кристаллические вещества переходят в более плотные кристаллические модификации (полиморфизм), энергетически выгодными становятся структуры, известные для более тяжелых элементов той же группы. Высокие температуры ускоряют достижение равновесного, энергетически более выгодного состояния. Изменение исходного энергетического состояния системы проявляется в изменении физических, химических и механических свойств вещества, связанных с явлениями на атомно-молекулярном уровне. Это находит отражение в изменении параметров твердости, прочности материала, его электропроводности, теплопроводности, магнитного сопротивления, электромагнитного излучения и др. Многие образующиеся при высоком давлении металлические фазы обладают сверхпроводимостью.

В то же время, условия нагружения материала в процессе резания существенно отличаются от его статического или динамического всестороннего сжатия высоким давлением в экспериментальных исследованиях ФВД. При резании наряду с указанными выше факторами имеют место такие процессы и явления, как разрушение через взрыв, термопластический сдвиг, кручение, металлургические процессы, сверхтекучесть, наростообразование и ряд других, что также может приводить к новым, еще не изученным эффектам. В соответствии с изложенным можно полагать, что воздействие процесса резания на материал нужно рассматривать как особый, неизученный к настоящему времени тип воздействия на среду.

Исследования процесса резания в этом направлении могут найти следующие практические применения [3]:

1. Создание информационной базы с целью управления параметрами качества в традиционных технологиях механической обработки резанием с учетом динамических характеристик процесса в зоне стружкообразования.
2. Разработка новых конструкционных материалов с нетрадиционным сочетанием физических и механических свойств.

3. Разработка новых технологий получения материалов со специальными свойствами.

4. Создание новых методов испытания свойств материалов и их динамического разрушения в уникальных, единственных в своем роде, условиях высокоскоростного нагружения.

Таким образом, познание механизмов преобразования свойств материала на наноуровне может служить основой целенаправленных управляющих технологических воздействий на материал заготовки для повышения эффективности и обеспечения необходимых параметров обработки с учетом внутренних законов протекания физических процессов, а также предполагает применение метода резания в смежных областях техники и технологии.

Literatura

1. Nazarov Yu.F. Nanotehnologiya v proizvodstve mashin i priborov. – М.: Saturn-S, 2003. – 180 s.

2. Kovan V.M. Osnovy tehnologii mashinostroeniya. – М.: Mashgiz, 1959. – 496 s.

3. Yaroslavcev V.M. Novoe o processe rezaniya // Vestnik MGTU. Ser. Mashinostroenie, 2000. - №4. – S. 32-46.

4. Fizika vzryva / Pod red. L.P. Orlenko. – Izd. 3-e, pererabotannoe. – V 2-h t. T. 2. – М.: FIZMATLIT, 2002. – 656 s.

5. Yaroslavcev V.M. Vzryv i sverhtekuchest' pri obrabotke metallov rezaniem // Materialy 6-go Vserossiiskogo Soveschaniya-seminara «Injenerno-fizicheskie problemy novoi tehniki». Moskva, 16-18 maya 2001. – М., 2001. – S.65-66.

6. Yaroslavcev V.M. Kolichestvennaya ocenka temperaturnogo parametra vzryva pri rezanii // Tezisy dokladov Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferencii «Aerokosmicheskie tehnologii i obrazovanie na rubeje vekov». Rybinsk, 13-15 maya 2002. – RGATA, 2002. – S. 21-22.

7. Svoistva kondensirovannyh veschestv pri vysokih davleniyah i temperaturah: Informacionnoe izdanie / Pod red. R.F. Trunina. - Arzamas-75: Izd-vo VNII eksperimental'noi fiziki, 1992. - 398 s.