

Новый метод исследования свойств материалов при воздействии высоких динамических давлений

77-30569/345938

02, февраль 2012

Ярославцев В. М.

УДК 620.17: 621.91.01

МГТУ им. Н.Э. Баумана

mt13@bmstu.ru

Процессы деформирования и разрушения материалов при различных условиях статического и динамического нагружения связывают с изменениями их механических свойств, которые на практике определяются по результатам разных видов механических испытаний. Большинство механических испытаний проводят в течение минут (статические) или долей секунды (например, ударные). Исключение составляют длительные статические и усталостные испытания. Вместе с тем, в технике и природе деформации и разрушение могут развиваться в широчайшем временном диапазоне: длительность процесса может составлять десятилетия, даже столетия, а может завершаться за $10^{-5} \dots 10^{-8}$ с и менее. Стремление интенсифицировать технологические процессы привело к применению таких высокоскоростных и высокоэнергетических методов обработки, как штамповка и сварка взрывом, прессование и упрочнение взрывом, детонационно-газовое напыление, электроимпульсная обработка пластическим деформированием (электрогидроимпульсная, магнитно-импульсная), сверхскоростное резание и другие, каждый из которых характеризуется своими диапазонами скоростей деформаций, давлений, температур и пр., составляя в целом широкий спектр указанных параметров.

Влияние времени, скорости нагружения, скорости деформирования, истории нагружения в процессе деформирования, температуры и высоких давлений на вид разрушения является в настоящее время одной из малоизученных и наименее подкрепленных опытными данными экспериментальных частей учения о свойствах материалов. Поэтому на практике при выполнении прочностных и других расчетов основываются главным образом на данных статических испытаний материалов: $\sigma_{0,2}$, σ_B , HV и др., что приводит к значительной разнице между вычисленными характеристиками и их экспериментальными значениями. Например, ошибка расчетного определения силы резания при лезвийной обработке может достигать двух и более раз. Это означает, что стандартные испытания материалов на растяжение или сжатие не отражают всей сложности процессов в зоне стружкообразования и соответствующих закономерностей изменения свойств материалов при резании. В то же время, теория резания располагает в настоящее время аналитическими зависимостями [1, 2], которые связывают между собой механические свойства обрабатываемого материала и условия протекания

деформационных процессов в зоне стружкообразования до разрушения через силовые факторы. Измерение силовых факторов при резании позволяет для заданных условий обработки оценить состояние и свойства материала в результате воздействия всей совокупности сложнейших физико-химических процессов и явлений, характерных для метода резания.

Процессы деформирования и разрушения обрабатываемого материала при резании зависят и тесно связаны с особенностями протекания на всех уровнях (макро-, микро- и нано-) энергетических изменений состояния динамической системы взаимодействующих элементов. В настоящее время исследованиями, выполненными в МГТУ им. Н.Э. Баумана, установлено, что изменение состояния материала в зоне стружкообразования при применяемых на практике режимах обработки носит *взрывной характер* [3, 4], а сам процесс резания можно рассматривать как одну из разновидностей взрыва. 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 локальное накопление в виде внутренней энергии сопротивления разрыву атомарно-молекулярных связей и энергии сопротивления структурным превращениям. Накопление и концентрация энергии приводит к потере энергетической устойчивости элементарными центрами разрушения, такими как электронные оболочки. Непрерывная череда управляемых энергетически взрывов следует до момента окончания процесса обработки. Во многих случаях параметры обработки резанием (удельная энергия, время протекания процесса, давление и др.), характеризующие взрыв как физическое явление, не только не уступают, но и существенно превосходят соответствующие параметры взрыва широко распространенных химических взрывчатых веществ (ВВ). Так, в настоящее время установлено [3, 4], что при резании: объемное выделение (преобразование) энергии $W = 2 \dots 70$ Дж/мм³; время протекания процесса $\tau = 10^{-4} \dots 10^{-7}$ с; давление p до 10...70 ГПа; средние температуры T до $1,5 \cdot 10^3$ К и выше. Для сравнения численные значения соответствующих характеристик наиболее распространенных химических ВВ составляют [5, 6]: $W = 4 \dots 8$ Дж/мм³; $\tau \sim 10^{-5}$ с; p до 10 ГПа; $T = 2 \cdot 10^3 \dots 4 \cdot 10^3$ К (в эпицентре взрыва). *Подобные условия воздействия на материал изучает физика высоких давлений.*

Динамические условия нагружения материала при резании и высокая удельная энергия, участвующая в преобразовании его свойств в зоне стружкообразования, по своим показателям во многом совпадают с условиями специальных испытаний материалов на воздействие высоких динамических давлений (ВДД) путем создания ударных волн сжатия от детонации взрывчатых веществ и других методов импульсного нагружения.

Исследованиями в области высоких давлений (ВД) установлено, что действие на материал ВД (более 0,1 ГПа) в сочетании с повышенными температурами может вызывать значительные изменения его структуры и свойств [6 – 8]. Под ВД 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 ВД металлические фазы обладают сверхпроводимостью.

В то же время условия нагружения материала в процессе резания существенно многообразнее его статического или динамического всестороннего сжатия высоким давлением в экспериментальных исследованиях физики высоких давлений. При резании наряду с указанными факторами в зоне стружкообразования имеют место такие процессы и явления [1, 2], как разрушение через взрыв, термопластический сдвиг, кручение, металлургические процессы, сверхтекучесть, наростообразование и др. Таким образом, воздействие процесса резания на материал, отделяемый в виде стружки, можно рассматривать как особый, неизученный к настоящему времени тип воздействия на конденсированную среду. В соответствии с этим есть основания полагать, что метод резания может найти эффективное применение как *новый метод исследования (изучения)* физико-механических свойств материалов и условий динамического разрушения в уникальных, единственных в своем роде условиях высокоскоростного нагружения.

Резание как метод исследования свойств материалов характеризуется следующими техническими и методическими возможностями и *достоинствами*:

1. Универсальность.

Возможность испытаний практически любых конструкционных материалов, поскольку обработке резанием поддаются сегодня почти (*практически*) все известные (*конструкционные, применяемые на практике, в различных отраслях машиностроения*) материалы.

2. Гибкость.

Изменение скорости нагружения материала (скорости резания v) от очень низких значений [3] до режимов сверхскоростного резания и варьирование другими параметрами процесса (подачей S , глубиной резания t , технологическими средами и др.), позволяет в широких пределах изменять такие условия испытаний, как скорость деформации $\dot{\epsilon}$ ($3 \dots 10^7$ с⁻¹) и время деформирования ($1 \dots 10^{-7}$ с), температуру (от криогенных до $1,5 \cdot 10^3$ К и выше) и давление ($1 \dots 70$ ГПа).

3. Методическое обеспечение.

К настоящему времени мировой практикой исследований процесса резания накоплен обширный экспериментальный материал, получивший отражение в многочисленных справочниках по режимам обработки и технологических рекомендациях. Имеющиеся эмпирические зависимости энергетических характеристик процесса резания и их связь с режимами и другими условиями обработки дают возможность в широких пределах управлять параметрами испытаний, целенаправленно регулировать меру воздействия различных физических факторов на материал заготовки.

Для изучения процессов деформирования и разрушения материала, контактных явлений, силовых факторов, тепловых явлений и других процессов и явлений при резании разработаны экспериментальные методы исследования, соответствующая регистрирующая аппаратура, установлены возможности различных экспериментальных способов и средств измерения, даются методические рекомендации по их применению на практике.

4. Доступность технической экспериментальной базы.

При изучении свойств материалов в условиях действия высоких динамических давлений в настоящее время используют специальные аппараты. ВДД получают с помощью искрового разряда, ядерных взрывов и взрывов химических ВВ, импульсного магнитного поля, одновременного действия взрыва и магнитного поля и др. [6, 8]. Подготовка образцов материалов и их испытания перечисленными методами требует сравнительно больших трудовых и материальных затрат. *Специальной подготовки персонала исследователей.*

Металлорежущее оборудование как базовый элемент экспериментальных установок для исследования материалов в условиях резания имеет широкое распространение повсеместно. Технические характеристики существующего парка станков чрезвычайно разнообразны по таким параметрам, как диапазоны скоростей рабочих движений, мощности приводов, тяговые усилия и другие. Станки разных групп и типов, *а также применяемый режущий инструмент* могут обеспечивать различные схемы нагружения образцов материала. Исследовательские организации и промышленные предприятия располагают обученным персоналом, способным квалифицированно обслуживать станочное оборудование.

Наиболее эффективным техническим средством испытания материалов на основе метода резания, обеспечивающим быстрое получение и обработку опытных данных, представляется использование специальных автоматизированных стендов, созданных на базе современных станков с ЧПУ. В этом случае станок с ЧПУ дополнительно оснащается устройствами для автоматического контроля исследуемых параметров и автоматической обработки получаемой информации с помощью ЭВМ, входящей в состав такого стенда. Работа подобного испытательного стенда может осуществляться с помощью управляющих программ, предусматривающих необходимые диапазоны изменения параметров воздействия (разную «историю нагружения») на исследуемый образец материала. Запрограммированный циклический повтор режима нагружения (постоянного или непрерывно изменяющегося) позволяет накапливать наблюдения и производить в процессе испытания статистическую обработку экспериментальных данных.

Наличие достаточно совершенной, отработанной десятилетиями материальной и методической базы для выполнения исследований материалов в специфических условиях их нагружения при резании дает возможность без больших материальных затрат и в короткий промежуток времени получить большой опытный материал. Обобщение экспериментальных данных о поведении материалов при сложных динамических условиях нагружения может служить основой прогнозирования конструкционной прочности материалов при соответствующих условиях их нагружения в процессе эксплуатации. Для высокоскоростных и высокоэнергетических технологических методов обработки результаты таких исследований формируют информационную базу оценки технологичности в зависимости от условий обработки, разработки оптимальных операционных технологических процессов и управления ими.

Особенности резания позволяют также использовать этот процесс как новое средство создания высоких динамических давлений в такой области научных исследований, как физика высоких давлений.

Литература

1. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 368 с.
2. Гольдшмидт М.Г. Деформации и напряжения при резании металлов. – Томск: СГТУ, 2001. – 180 с.
3. Ярославцев В.М. Новое о процессе резания // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение, 2000. – №4. – С. 32-46.
4. 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.
5. Штамповка взрывом. Основы теории / Под ред. М.А.Анучина. – М.: Машиностроение, 1972. – 152 с.
6. Физическая энциклопедия. В 6 томах / Гл. ред. А.М.Прохоров. – М.: Сов. энциклопедия. Т.1, 1988. – 704 с.
7. Ададуров Г.А., Гольданский В.И. Превращения конденсированных веществ при их ударно-волновом сжатии в регулируемых термодинамических условиях // Успехи химии, 1981, т. 50, С. 1810.
8. Свойства конденсированных веществ при высоких давлениях и температурах: Информационное издание / Под ред. Р.Ф. Трунина. – Арзамас-75: Изд-во ВНИИ экспериментальной физики, 1992. – 398 с.

New method of research of material properties under high dynamic pressures 77-30569/345938

02, February 2012

Yaroslavtsev V.M.

Bauman Moscow State Technical University
mt13@bmstu.ru

The author shows comparability of dynamic characteristics of cutting processes and tests of materials in high dynamic pressures environment. Possibilities and advantages of using the cutting method as a new method of studying physical-mechanical properties of materials were considered at high-speed deformation and destruction.

Publications with keywords: [properties of materials](#), [research method](#), [a cutting method](#), [high dynamic pressures](#), [high-speed deformation and destruction](#)

Publications with words: [properties of materials](#), [research method](#), [a cutting method](#), [high dynamic pressures](#), [high-speed deformation and destruction](#)

Reference

1. Zorev N.N., Problems of mechanics of the process of cutting of metals, Moscow, Mashgiz, 1956, 368 p.
2. Gol'dshmidt M.G., Strains and stresses in metal cutting, Tomsk, STT, 2001, 180 p.
3. Iaroslavtsev V.M., New about the cutting process, Vestnik MGTU. Ser. Mashinostroenie - Bulletin of BMSTU. Ser. Mechanical Engineering 4 (2000) 32-46.
4. Iaroslavtsev V.M., Explosion and superfluidity at metal cutting, in: Proceedings of the 6th All-Russia conference-seminar on Engineering and physical challenges of new technology, Moscow, May 16-18, 2001, Moscow, 2001, pp. 65-66.
5. In: M.A. Anuchin (Ed.), Explosive forming. Fundamentals of Theory, Moscow, Mashinostroenie, 1972, 152 p.
6. In: A.M. Prokhorov (Ed.), Physical encyclopedia. 6 Volumes. The vol. 6, Moscow, Sovetskaia entsiklopediia, 1988, 704 p.
7. Adadurov G.A., Gol'danskii V.I., Transformations of condensed substances in their shock-wave compression under controlled thermodynamic conditions, Uspekhi khimii 50 (10) (1981) 1810-1827.
8. In: R.F. Trunin (Ed.), The properties of condensed substances at high pressures and temperatures: Information publication, Arzamas-75, Izd-vo VNII eksperimental'noi fiziki, 1992, 398 p.