

УДК 621.7.08:621.833:53.088.22:004.942

© Ю.В. Савченко

## **ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРУШЕНИЯ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ**

© Yu. Savchenko

### **PHYSICAL AND THEORETICAL BASIS OF THE DESTRUCTION OF SOLID ALLOYS**

Рассмотрены оценки влияния ударных волн разной интенсивности на механизм дефектообразования и процесс разрушения гетерогенной среды, основные соотношения непосредственно из рассмотрения баланса энергии, произвольно выделенного в среде элемента в разработанной промышленной высокоэффективной технологии производства режущего, разрушающего и формообразующего инструмента.

Розглянуто оцінки впливу ударних хвиль різної інтенсивності на механізм дефектоутворення та процес руйнування гетерогенного середовища, основні співвідношення безпосередньо з розгляду балансу енергії, довільно виділеного в середовищі елемента в розробленій промислової високоефективної технологія виробництва ріжучого, що руйнує і формотворного інструменту.

#### **Определение научной проблемы и ее значение.**

Материаловедческие исследования сплавов карбида вольфрама с кобальтом, никелем и железом проводятся, начиная с 1926 г, когда появился этот класс материалов. Наиболее удачным оказалось применение кобальта как связующей фазы. Поэтому кобальтовой связке посвящено наибольшее количество работ по твердым сплавам.

Практически все конструкционные материалы неоднородны по своей структуре. В одних случаях это обусловлено технологией изготовления материалов (пористость, различного рода инородные включения), в других вторая фаза вводится с целью достижения комбинации свойств, не присущих каждому из компонентов (твёрдые сплавы).

#### **Анализ исследований проблемы и публикации.**

Если некоторый объём гетерогенного твёрдого тела подвержен быстронапряжённому состоянию за пределами прочности материала, то разрушение носит множественный характер и сопровождается образованием осколков самых различных форм и размеров. Такое разрушение имеет место при ударе и взрыве. Проблема прогнозирования количества осколков и их различных характеристик имеет важное прикладное значение. Знание распределения энергии взрыва по среде, окружающей заряд, позволяет судить не только о геометрических размерах зоны разрушения, но и о крупности дробления. Разработка и производство боеприпасов интенсивно велись в военное и послевоенное время. На войсковых складах и в арсеналах страны скопилось громадное их количество, в

т.ч. более 1,6 млн. тонн подлежат утилизации [1]. Если устаревшие боеприпасы оказались ненужными, то их компоненты, в частности высококачественные металлы, вполне пригодны для использования.

Разработана промышленная высокоэффективная технология производства режущего, разрушающего и формообразующего инструмента из вольфрамокобальтовых и вольфрамоникелевых сплавов путём прямой регенерации вторичного сырья без использования термохимических и металлургических методов [2,3,4,5].

Необходимость оценки влияния ударных волн разной интенсивности на механизм дефектообразования и процесс разрушения гетерогенной среды обуславливает проведение теоретических исследований [6].

#### **Цели и задачи статьи.**

Рассмотрены основные соотношения разрушения твёрдых сплавов непосредственно из рассмотрения баланса энергии, произвольно выделенного в среде элемента.

#### **Изложение основного материала.**

В работах [7,8] высказано предположение о ведущей роли пластической деформации в любом процессе разрушения. Во многих работах это подтверждается экспериментально. Нет принципиальных физических различий между вязким и хрупким разрушениями. В обоих случаях разрушение обусловлено локализацией пластической деформации, но при вязком разрушении локализация деформации наступает после развития равномерной деформации, а при хрупком разрушении она возникает на ранней стадии деформирования и в пределах деформации Людерса.

Примером ведущей роли пластической деформации в разрушении является временная зависимость прочности, которая имеет вид:  $t = \frac{\delta_p}{\dot{\varepsilon}_{cp}}$ , где  $t$  - время разрушения;  $\dot{\varepsilon}_{cp}$  - средняя скорость пластической деформации;  $\delta_p$  - максимальное относительное удлинение образца.

Локализация деформации приводит к возникновению и развитию микроскопических трещин в наиболее деформируемых зонах. При деформировании кристаллических веществ было обнаружено сосредоточение микроскопических трещин в следах скольжения, то есть при протекании одного из основных механизмов пластической деформации. Возрастание деформации приводило к возникновению макротрещин вдоль следа скольжения. Очевидно, что разрушение металла при пластической деформации есть результат возникновения и развития субмикро-, микро-, и макроскопических дефектов.

Все дислокационные механизмы зарождения трещин могут быть разделены на три группы. К первой группе отнесены модели, связывающие возникновение трещин с нагромождением дислокаций в отдельных плоскостях скольжения. Ко второй группе отнесены модели, связывающие возникновение микротрещин с взаимодействием дислокаций, расположенных в пересечениях полос скольжения или двойников, и нагромождением дислокаций в процессе развития пластической деформации. Третья группа моделей основана на безбарьерных

механизмах, то есть на взаимодействии между собой дефектов кристаллической решетки (дислокаций, вакансий и др.).

В разрушении, имеет место кинетическая концепция, основанная на преобладающей роли термофлуктуационных разрывов межатомных связей в процессе разрушения [9,10]. В этих работах на большом количестве самых разнообразных металлов было показано, что долговечность и растягивающие напряжения связаны формулой:  $\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{u_0 - \gamma\sigma}{kT}\right)$ , где  $\gamma$  - константа, определяющая свойства материала;  $k$  - постоянная Больцмана;  $u_0$  - имеет смысл энергии активации процесса, приводящего к разрыву, и для чистых металлов совпадает с энергией связи атомов в кристаллической решетке;  $\tau_0$  - по порядку величины совпадает с периодом колебаний атомов в кристаллической решетке (10-13 сек).

Проведенный анализ показал, что процесс пластической деформации определяет разрушение в условиях, когда реализуется ведущий элементарный механизм с энергией активации, равной энергии объемной самодиффузии. А если реализуется ведущий элементарный механизм с энергией, близкой к энергии активации разрыва межатомных связей, то разрушение контролирует пластическую деформацию.

Изучение состояния вопроса о деформации и разрушении твердых тел при статическом или очень медленном нагружении позволяет сделать вывод о значительной роли механизмов деформации в создании и развитии микротрещин. Эта роль будет возрастать и становится определяющей в процессах обработки металлов давлением, характеризующихся высокими скоростями деформации. В данной связи необходимо исследовать кинетику элементарных актов пластической деформации.

Первые опыты [11] на фтористом литии по определению зависимости скорости движения дислокаций от приложенного напряжения, а также последующие работы на NaCl, KBr, KCl, на полупроводниковых и металлических кристаллах позволили установить наиболее характерные особенности движения дислокаций.

Для большинства изученных кристаллов кривые скоростей дислокаций от величины касательных напряжений можно разделить на две области. Первая соответствует малым напряжениям и малым скоростям движения дислокаций. При этом изменение нагрузки в несколько раз может менять скорость дислокаций на несколько порядков. Скорость резко возрастает и при повышении температуры и уменьшении количества примесей в кристалле. При малых скоростях движения дислокаций, характерных для данной области, торможение их объясняется остановкой на барьерах, которые преодолеваются термоактивируемым путем. Обычно такие барьеры в кристаллах подразделяются на два типа - линейные и плоские. К первому типу относится барьер Пайерлса-Набарра, обусловленный периодическим полем кристаллической решетки, а ко второму - разнообразные точечные дефекты, ступеньки на дислокациях и дислокации "леса".

Вторая область зависимости скорости дислокаций от касательных напряжений соответствует большим напряжениям и большим скоростям движения дислокации. Представляет существенный интерес то, что в рассматриваемом интервале напряжений повышение температуры уменьшает скорость дислокаций в отличие от области термоактивированного движения, а введение примесей в кристалл слабо сказывается на задержку дислокаций. Следовательно, дислокация, обладая большой кинетической энергией, может преодолевать барьеры безактивационно. Это, в свою очередь, является важным подтверждением определяющей роли механизмов пластической деформации в процессе разрушения при больших величинах напряжений.

На основе экспериментальных данных, полученных при исследовании оценок повреждаемости металла [12] подтверждается справедливость математического описания накопления поврежденности как некоторой функции от степени деформации сдвига. Предполагая, что образование макроскопической трещины гриффитсова размера происходит в момент достижения критического значения пластической деформации, получено условие разрушения металла [13]. В категориях теории пластичности оно имеет вид:

$$\Psi = \int_0^{t_p} \frac{H}{\Lambda_p} d\tau = 1. \quad (1)$$

Физический смысл этого выражения заключается в достижении величиной пластического "разрыхления" в момент  $t = t_p$  критического значения, после чего происходит образование трещины гриффитсова размера и наступает стадия катастрофического разрушения. Здесь  $\Lambda_p$  - степень деформации сдвига. Этот критерий пластичности наиболее полно удовлетворяет требованиям однозначности, относительности, универсальности, аддитивности, чувствительности и вполне приемлем для практических инженерных расчетов:

$$\Lambda_p = \int_0^p H d\tau, \quad (2)$$

где  $H$  - интенсивность скоростей деформации сдвига.

В общем случае предельная степень деформации сдвига может быть определена экспериментально как функция показателя напряженного состояния  $\sigma/T = K$ , интенсивности скорости деформации сдвига ( $H$ ), температуры ( $\Theta$ ) и показателя немонотонности процесса деформирования ( $B$ ) [13], то есть иметь вид:

$$\Lambda_p = \Lambda_p(K, H, \Theta, B). \quad (3)$$

Следовательно, зная основные показатели НДС вдоль траектории движения частиц деформируемого металла, по уравнениям (1) и (3) степень деформации сдвига можно представить в виде:

$$\Lambda_p = \frac{\Lambda_p[K(\tau)]}{B(\tau)}, \quad (4)$$

а условие разрушения [10]

$$\Psi = \int_0^{t_p} B(\tau) \frac{H}{\Lambda_p[K(\tau)]} d\tau. \quad (5)$$

Показатель напряжённого состояния не остается постоянным, поэтому вводится средний показатель напряжённого состояния, определяемый по формуле [12]:

$$K_{ср} = \frac{1}{\Lambda_p} \int_0^{\overline{\Lambda_p}} K(\Lambda) d\Lambda. \quad (6)$$

Дальнейшим развитием теории разрушения при пластической деформации явилось обобщение условия (5) на немонотонное, знакопеременное деформирование, которое в той или иной степени наблюдается в большинстве процессов обработки материалов давлением. В данном случае для коэффициента немонотонности в уравнении (5) предлагается использовать следующую функциональную зависимость:

$$B(\tau) = \left( \frac{\Delta\Lambda_i}{\Lambda_{p0}} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}, \quad (7)$$

где  $\Lambda_{p0}$  - предельная степень деформации;  $\Delta\Lambda_i$  - степень деформации сдвига на  $i$ -ом этапе;  $\gamma$  - показатель степени уравнения Коффин-Мэнсона.

На основании анализа знакопеременного кручения обобщены результаты на случай более сложных процессов немонотонной деформации [10]. Тогда степень использования запаса пластичности может быть определена по формуле:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\Delta\Lambda_i}{\Lambda_p(K_i)} \right]^{a(K_i)}. \quad (8)$$

Здесь  $a(K_i)$  - коэффициент, имеющий определенный физический смысл. Он учитывает способность металла к залечиванию дефектов при циклической деформации.

Известно, что пластичность металла имеет статистический характер [10]. Экспериментально было показано, что данная пластичность имеет нормальный закон распределения вида:

$$f(\Lambda_p) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\Lambda_p - \overline{\Lambda_p}}{\sigma} \right)^2 \right],$$

где  $\overline{\Lambda_p}$  и  $\sigma^2$  - математическое ожидание и дисперсия отклонения пластичности металла.

Вероятность появления значения  $\Lambda_p$  в интервале  $[\alpha, \beta]$  может быть определена по формуле

$$P(\alpha < \Lambda_p < \beta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\alpha}^{\beta} \exp \left( \frac{\Lambda_p - \overline{\Lambda_p}}{2\sigma} \right) d\Lambda_p \quad (9)$$

а использование запаса пластичности с определенной вероятностью (P) вычисляется из уравнения:

$$\Psi(p) = \sum_{i=0}^n \frac{\Delta\Lambda_i}{\Lambda_p(K_i) - t\sigma} \quad (10)$$

При решении конкретных практических задач вид уравнения (10) может изменяться.

### **Выводы и перспективы дальнейших исследований.**

На основании изложенного можно сделать некоторые выводы:

1. Процессы обработки материалов давлением сопровождаются сложными физическими явлениями, обеспечивающими деформируемость металла.

2. Процессу пластической деформации сопутствуют как процессы возникновения и развития микротрещин, так и процессы "залечивания" их.

3. Увеличение скоростей деформаций и напряжений при обработке металлов способствует возрастанию роли пластической деформации в процессе нарушения сплошности металла.

#### Перечень ссылок

1. Шикун В. Новая жизнь корпусов снарядов/ В. Шикун // - Военный парад, Москва, 7, 1997. - С.37-39
2. Патент №15322, МКИ В22F 3/08, 3/12; С22В 34/36 (Україна), Дідик Р.П., Савченко Ю.В., Вьюнник О.М., Анциферов А.В., Пашенко Н.И., Тубельева Г.Д. та ін. Спосіб регенерації вольфрамівмісних твердих сплавів. - Бюл. №6. -2000.
3. Schneider, A., Anciferov, A., Savchenko, Yu., Didyk, R., and Vjunik A. (1999). *Verfahren und Einrichtung zur Wiedergewinnung von harten Legierungen*. 196 27 983 В22F 9/06 (DE).
4. Savchenko Iu. Cutting-edge industrial technology of mining tool manufacturing/ Iu. Savchenko, A. Gurenko, O. Naumenko // - Mining of Mineral Deposits. - Volume 10 (2016), Issue 4, pp. 105-110.
5. Савченко Ю.В. Створення бурового інструменту з високим ресурсом і властивостями / Ю.В. Савченко // Сборник научных трудов международной конференции «Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта 2014». – Д.: НГУ, 2014. – С. 295 –301.
6. Савченко Ю.В. Моделирование разрушения гетерогенной среды при высокоэнергетических нагрузках/ Ю.В. Савченко, О.С. Караваева // Трансфер технологій: від ідеї до прибутку: матеріали 1 міжнар. наук.-практ. конф. студ., асп. и мол. ученых в 2 Т.- Д.: НГУ, 2010 Т. 1. – с. 101-103.
7. Степанов А.В. Новый механизм пластического деформирования кристаллов/ А.В. Степанов, А.В. Донской // -ЖТВ, 1964, т.24, №2, с .161-171.
8. Степанов А.В. Основы практической прочности кристаллов/ А.В. Степанов //-М.: Наука, 1974, 132 с.
9. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел/ С.Н. Журков // - Вестник АН СССР, 1966, № 3, с 46-49.
10. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел/ В.Р.Регель, А.И.Слущкер, Э.Е.Томашевский// М.: Наука, 1974,-560 с.
11. Jonston W.C. Dislocation velocities, dislocation densities and Plastic Flow in Lithium Fluoride crystals/ W.C. Jonston, J.J. Gibman // – J. Ahhl. Phys., 1959, v. 30, № 2, p. 129-144.
12. Колмагоров В.М. Пластичность и разрушение/ В.М. Колмагоров, А.А. Богатков, Б.А. Мигачев и др.// М.: Металлургия, 1977. - 336 с.
13. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушения/. В.Л. Колмогоров//-М.: Металлургия, 1970,- 320 с.

#### ABSTRACT

**Purpose.** The basic relationships of fracture of solid alloys are considered directly from consideration of the energy balance arbitrarily allocated in the medium of the element.

**The method.** As a research technique in the present work, an analysis was made of the existing mechanisms of defect formation and the process of destruction of a heterogeneous medium

**Findings.** A comparative analysis of the mechanisms of defect formation on the process of destruction of a heterogeneous medium.

**The originality.** Fundamental way of shock wave treatment to stimulate destruction of powder product of any configuration in order to obtain a high quality powder for further formation, sintering and tool manufacturing of multiple use is demonstrated; ecologically friendly technology of hard alloys and cermet components of outdated military hardware and ammunition recycling.

**Practical implications.** On the basis of the foregoing, it is concluded that processes of processing materials with pressure are accompanied by complex physical phenomena that ensure the deformability of the metal; the process of plastic deformation is accompanied by both the processes of the emergence and development of micro cracks, and the processes of "healing" them; an increase in the rates of deformation and stress during the processing of metals promotes an increase in the role of plastic deformation in the process of disruption of the continuity of the metal.

**Keywords:** *mathematical model, heterogeneous medium, defect formation, strength*