

## РАЗВИТИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ТЕЧЕНИИ

Кожевникова Г.В.<sup>1</sup>, Шукин В.Я.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственное научное учреждение “Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси”,

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь, fti@tut.by

**Abstract:** The novelty of the suggested theory is in determining a dependence of the deformation critical value on two independent parameters of the stressed state: the mean stress and the parameter of the third invariant of the stress deviator. The novelty also consists in discovering a dependence of the deformation critical value on changes in the shear direction towards material fibers of metal.

Основы деформационной теории в большей степени заложены российским ученым В.Л. Колмогоровым. Согласно его работ [1] при пластической деформации в металле одновременно протекают два процесса: разрушения и сварки. Преобладание одного или другого процесса зависит от температуры, скорости деформации, напряженного состояния, свойств металла. При преобладании процесса разрушения макроразрушение наступает после достижения деформацией своей критической величины. До этого события в металле последовательно протекают следующие процессы: накопление дислокаций, образование микропор и микротрещин, слияние их в макротрещины и окончательное макроразрушение образца. Эти события могут фиксироваться на электронном микроскопе, точным измерением плотности металла и на последних стадиях разрушения измерением микротвердости.

Зависимость пластичности металла от напряженного состояния ранее определялась диаграммой пластичности. В качестве накопленных деформаций принята безразмерная величина – степень деформации сдвига  $\Lambda$ . В качестве напряженного состояния принята безразмерная величина – среднее напряжение. Деформационный критерий разрушения в этом случае запишется:

$$\Lambda \geq \Lambda_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где  $\Lambda_{\text{пр}}$  – предельная степень деформации сдвига.

Напряженное состояние (тензор и девиатор) минимально описывается тремя параметрами, например,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , два из которых независимы, а третье связано с ними условием пластичности Мизеса. Поэтому мы предложили вместо диаграммы пластичности использовать поверхность пластичности [2]. Третьей координатой здесь принята безразмерная величина – параметр третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)} / K$ , где  $J_3(D_\sigma)$  – третий инвариант девиатора напряжений.

$$\begin{aligned} J_3(D_\sigma) = & \frac{1}{27} [2 (\sigma_x^3 + \sigma_y^3 + \sigma_z^3) - 3 (\sigma_x^2 \sigma_y + \sigma_y^2 \sigma_z + \sigma_z^2 \sigma_x + \\ & + \sigma_x \sigma_y^2 + \sigma_y \sigma_z^2 + \sigma_z \sigma_x^2) + 12 \sigma_x \sigma_y \sigma_z + \\ & + 9 \sigma_x (\tau_{xy}^2 - 2 \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) + 9 \sigma_y (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 - 2 \tau_{zx}^2) + \\ & + 9 \sigma_z (-2 \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) + 54 \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}] = \\ & = (\sigma_1 - \sigma) (\sigma_2 - \sigma) (\sigma_3 - \sigma). \end{aligned} \quad (2)$$

Правомерность представления пластичности металла в зависимости от двух параметров напряженного состояния, то есть в виде непрерывной поверхности подтверждено нами [4] экспериментально на свинце, алюминии, меди. Одним методом испытания построить поверхность пластичности невозможно. Поэтому нами при различных  $\sigma/K$  и  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)} / K$  проводились эксперименты методами растяжения цилиндрического образца, растяжением цилиндрического образца с концентратором, кручения трубного образца, осадки цилиндрического образца, поперечной прокаткой цилиндрического образца с отношением длины к диаметру более 2 (когда в среднем сечении реализуется плоско-деформированное состояние), методом ЕСАР с углом

90°. В итоге было доказано [4], что зависимость пластичности от обоих параметров напряженного состояния  $\sigma/K$  и  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  независима и однозначна.

Как правило, в условиях реальных технологий вдоль линии тока в проблемных областях напряженное состояние, температура и скорость деформации изменяются. Поэтому возникает необходимость нахождения аппарата суммирования повреждаемости металла на разных этапах деформирования. В этой связи введен безразмерный параметр – повреждаемость  $\Pi$ . В исходном состоянии он равен 0, при разрушении он равен 1. Принято, что на этапах деформации повреждаемость суммируется линейно. Установлено, что по отношению к накопленным деформациям зависимость, как правило, нелинейна:

$$\Pi = \Lambda^p, \quad (3)$$

где  $p$  – показатель нелинейности накопления повреждаемости.

Оказалось, что экспериментальное нахождение относительного показателя нелинейности между двумя процессами с разными условиями деформации просто. Найти же сам абсолютный показатель нелинейности  $p^*$  достаточно сложно. Нами разработан специальный метод [2], позволяющий это сделать.

В итоге установлено две закономерности:

1. Существует пороговое значение среднего напряжения  $\sigma/K$ , ниже которого зависимость повреждаемости от накопленных деформаций становится линейной, то есть  $p^* = 1$ .

2. Установлены зависимости абсолютного показателя нелинейности  $p^*$  от обоих параметров напряженного состояния  $\sigma/K$  и  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ .

Нами также установлена закономерность изменения предельной степени деформации сдвига  $\Lambda_{\text{ГР}}$  от характера деформации: проходит ли деформация в одном неизменном направлении по отношению к материальным частицам металла или это направление изменяется, или осуществляется знакопеременное деформирование. Вполне логичным следует предположить, что сдвиг в металле по различным направлениям (плоскостям) позволяет накапливать больше дефектов в виде дислокаций и микротрещин, поэтому и накопленные до разрушения деформации могут быть большими. При знакопеременных деформациях известно, что согласно критерию Менсона-Коффина эти накопленные деформации значительно превосходят однонаправленные.

Зависимость между предельной степенью деформации сдвига  $\Lambda_{\text{ГР}}$  без изменения направления сдвига к материальным частицам металла и с изменением  $\Lambda_{\text{ГР}}^*$  нами принято описывать выражением:

$$\Lambda_{\text{ГР}}^* = (\Lambda_{\text{ГР}})^\Omega, \quad (4)$$

где  $\Omega \geq 1$  – показатель увеличения пластичности при разнонаправленном деформировании.

Анализ указанных зависимостей свидетельствует, что показатель  $\Omega$  уменьшается с уменьшением среднего напряжения  $\sigma/K$ , что позволяет предположить наличие среднего напряжения  $\sigma/K$ , при котором закономерность (4) становится линейной:  $\Omega = 1$ .

Для реальных процессов обработки металлов давлением важным является определение ресурса пластичности металла  $\Lambda$ , то есть какой запас пластических свойств остался до разрушения [5]:

$$\Lambda = 1 - \Pi_i = 1 - (\Lambda/\Lambda_{\text{ГР}})^{p^*}. \quad (5)$$

По характеру деформации могут быть разделены по мере возрастания пластичности на:

– однонаправленную монотонную деформация, и к ним могут быть отнесены чистый сдвиг, однонаправленное кручение трубы, гибка листа, ЕСАР в одном направлении, кручение трубы с растяжением;

– разнонаправленная монотонная деформация, и к ним могут быть отнесены осадка, растяжение цилиндрической образца, растяжение листа, сдвиг в одной плоскости, но в двух направлениях;

– разнонаправленная немонотонная деформация, и к ним могут быть отнесены растяжение с концентратором, знакопеременные кручения и знакопеременная ЕСАР, поперечная прокатка и большинство производственных процессов обработки металлов давлением.

Условие равенства ресурса пластичности на каждом из этапов деформирования запишется:

$$1 - (\Lambda/\Lambda_{\text{ПР}})^{p^*} = 1 - (\Lambda^*/\Lambda_{\text{ПР}^*})^{p^*}. \quad (10)$$

Отсюда нетрудно получить зависимость между деформациями на этапе деформирования с различным характером деформации:

$$\Lambda^* = \Lambda \cdot (\Lambda_{\text{ПР}})^{\Omega-1}. \quad (11)$$

Ряд сплавов, например, на основе титана подвержены значительному уменьшению размера зерна при деформации и, как следствие, росту их пластических свойств. В этом случае при расчете ресурса пластичности данный фактор должен обязательно учитываться [6]. Мы в своей практике сталкивались не с потерей, а с ростом пластичности в процессах деформации титановых сплавов более чем на 50 %.

Пластичность металлов носит вероятностный характер, поэтому наши исследования показали, что разрушение сталей описывается нормальным законом распределения Гаусса.

Программы компьютерного моделирования процессов пластической деформации используют в большей степени энергетические критерии разрушения, которые, как показали наши исследования, уступают деформационным по универсальности и точности и могут использоваться в ограниченном диапазоне технологических параметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пластичность и разрушение / под общ. ред. В.Л. Колмогорова. — М.: Металлургия, 1977. — 336 с.
2. Kozhevnikova, G. Cross-wedge rolling / G. Kozhevnikova. — Minsk: Belorusskaya nauka, 2012. — 321 с.
3. Красневский, С.М. Разрушение металлов при пластическом деформировании / С.М. Красневский, Е.М. Макушок, В.Я. Щукин. — Минск: Наука и техника, 1983. — 173с.
4. Теория и технология формирования поперечно-клиновой прокатки / Шу Сюэдао, В.Я. Щукин, Г.В. Кожевникова, Сунь Баошоу, Пен Вэньфэй. — Академическая библиотека университета Нинбо, КНР, 2014. — 314 с.
5. Shchukin, V. New Trends in Development of Cross-Wedge Rolling Technology / V. Shchukin, G. Kozhevnikova // Forge (USA). — Oct 26, 2015. — P. 18–22.
6. Кожевникова, Г.В. Повышение усталостной прочности валов посредством поперечно-клиновой прокатки / Г.В. Кожевникова, А.О. Рудович, В.Я. Щукин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. — 2017. — № 12. — С. 19–31.