

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ

**Белявин К.Е., Щукин В.Я., Кожевникова Г.В., Кожевников Д.А**

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Экспериментальные методы определения пластических свойств металлов и сплавов можно подразделить на экспериментальные деформационные и экспериментальные физические. В деформационных методах образец пластически деформируют до разрушения в условиях постоянной температуры и постоянной скорости деформации. В момент разрушения фиксируется накопленная деформация в виде:

– относительного удлинения после разрыва:

$$\delta = \frac{l_K - l_H}{l_H} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где  $l_H$  – длина рабочей части образца в начальном состоянии, мм;  $l_K$  – длина рабочей части образца в конечном состоянии при разрушении, мм;

– относительного сужения поперечного сечения после разрыва:

$$\psi = \frac{F_H - F_K}{F_H} \cdot 100\% , \quad (2)$$

где  $F_H$  – площадь поперечного сечения образца в начальной стадии испытания, мм<sup>2</sup>;  $F_K$  – площадь поперечного сечения образца в конечной стадии испытания при разрушении, мм<sup>2</sup>;

– степень деформации сдвига:

$$\Lambda = \int_0^t H dt , \quad (3)$$

где  $H$  – интенсивность скоростей деформации сдвига, с<sup>-1</sup>;  $t$  – время, с.

Пластичность металла определяется параметром: максимальный остаточный сдвиг  $\gamma_{\max}$ :

$$\gamma_{\max} = \arctg\left(\frac{\varphi_{\max} \cdot D}{2l}\right) \cdot 100\% , \quad (4)$$

где  $\varphi_{\max}$  – максимальный угол закручивания образца на его расчетной длине, рад;  $D$  – диаметр рабочей части образца, мм;  $l$  – расчетная длина образца, мм.

Показатели (1) и (2) используются в испытаниях на растяжение и сжатие. Показатель (3) – универсальный для всех видов испытания и по этой причине наиболее предпочтительный.

Идеальными условиями испытания являются такие, в котором в ходе всего испытания остаются постоянными не только температура и скорость деформации но и напряженное состояние: среднее напряжение  $\sigma/K$  и показатель третьего инварианта тензора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(T_\sigma)}/K$ , а также схема деформации: однонаправленная монотонная, разнонаправленная монотонная, разнонаправленная немонотонная с постоянным показателем

разнонаправленности. К сожалению, не всегда удается выдержать эти идеальные условия и в этом случае прибегают к отнесению результатов исследования к среднему значению непостоянного параметра в ходе эксперимента. Следует также учитывать, что в большинстве испытаний не учитывается неравномерность распределения напряженно-деформированного состояния в очаге деформации. В этом случае эксперимент определяет пластичность металла, усредненную по объему образца. В тоже время испытание методом поперечной прокатки позволяет определять пластичность локально – строго вдоль центральной оси образца.

Методом конечных элементов решена осесимметричная задача (3D) растяжения цилиндрического образца с концентратором. Впервые показано, что среднее напряжение увеличивается от поверхности до центральной оси образца до 3 раз, параметр третьего инварианта тензора напряжений увеличивается в том же направлении до 7 раз, накопленные деформации, наоборот, в указанном направлении уменьшаются на 25%.

Методом графического построения полей линий скольжения получено решение (2D) растяжения листа с концентратором напряжений. Впервые показано, что среднее напряжение возрастает от поверхности листа до его центральной части в 2,7 раза, параметр третьего инварианта тензора напряжений возрастает от 0 до 2,6. Точность решения по отношению к литературным источникам увеличена в 1,4 – 5 раз.

Впервые разработан новый метод экспериментального определения пластических свойств металлов и сплавов поперечной прокаткой дискообразного образца с осевыми отверстиями. Метод поперечной прокатки дискообразного образца позволяет локально (то есть строго по оси заготовки) определить пластичность металла, и тем самым гарантировать процесс изготовления детали методом поперечно-клиновой прокатки без вскрытия осевой полости. Точность данного метода, как показали исследования, превосходит точность широко применяемого метода растяжения цилиндрического образца. Достоинством данного метода является то, что вскрытие полости определяется визуально на торцевой поверхности образца после определенного количества циклов нагружения. Параметры напряжений и деформаций при прокатке дискообразного образца определяют методом конечных элементов с применением вычислительной техники, поскольку задачи 3D аналитически решать не удается.

Методом конечных элементов определены параметры напряженно-деформированного состояния на оси образца – в месте, где происходит разрушение металла при прокатке. Новый метод позволяет расширить область испытания пластических свойств металлов по среднему напряжению в 10 раз, по параметру третьего инварианта тензора напряжений в 8 раз.