

УДК 621.73.043.004

**Испытание пластичности металла при ступенчатом изменении
напряженного состояния**

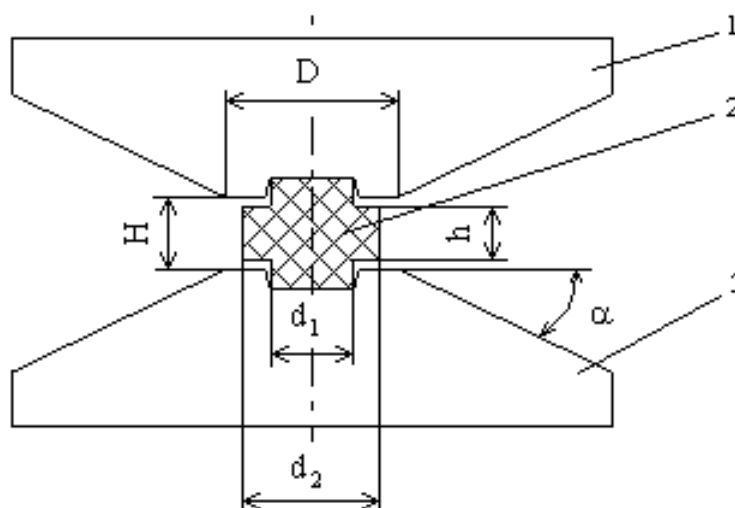
Н.В. Биба, С.А. Стебунов, С.В. Смирнов, Д.И. Вичужанин

Довольно часто в процессах обработки давлением частицы металла при деформировании последовательно испытывают действие напряжений разных знаков (например, при переходе частиц со свободной поверхности заготовки на контактную и наоборот). При этом в зависимости от направления смены знака напряжений может происходить как частичное залечивание деформационных микродефектов, так и интенсификация их развития [1]. Соответственно этому, возможно увеличение или уменьшение предельной деформации, которую способен выдержать металл до момента разрушения. Ступенчатое изменение напряженного состояния не обязательно сопровождается изменением направления деформирования. Влияние последнего на накопление поврежденности и разрушение подробно изучено и описано в виде математических моделей в работах [2,3]. Влияние собственно ступенчатого изменения напряженного состояния экспериментально подтверждено при изучении физических и механических свойств металлических образцов при двухстадийной деформации [1,4]. Обычно напряженное состояние в таких экспериментах изменяется путем регулирования давления жидкости в контейнере, в котором происходят испытания. Несмотря на то, что в литературе имеются описание как самих экспериментов, так и изложение их результатов, они до сих пор являются уникальными, так как техника высоких давлений является весьма сложной как при создании, так и при эксплуатации. Целью данной работы являлась разработка методики и образцов для про-

ведения испытаний в условиях ступенчатого изменения напряженного состояния при использовании серийных испытательных машин.

Предварительный анализ методов механических испытаний показал, что перспективными в этом смысле могут быть испытания на осадку образцов с различной формой боковой поверхности, в частности, имеющие буртик прямоугольного сечения (рис. 1). Моделирование процесса деформирования и напряженно-деформированного состояния образцов осуществляли с помощью конечно-элементной программы QFORM [5,6], применяемой в промышленности и научных исследованиях для расчета процессовковки и штамповки

Всего было осуществлено моделирование деформирования 27 вариантов образцов с различным соотношением размеров. Исходя из принципов теории подобия, осадку образцов в штампах описывали в зависимости от сочетания безразмерных параметров d_1/d_2 , h/d_2 , h/H , d_2/D (обозначения размеров приведены на рис. 1).



1 – верхний штамп; 2 – образец; 3 – нижний штамп

Рис. 1 Образец для испытаний на осадку

Параметры варьировались в следующих пределах: $d_1/d_2 = 0,48...0,6$; $h/d_2 = 0,08...0,6$, $h/H = 0,15...1$, $d_2/D = 0,78...0,97$. Первые два параметра характеризуют форму буртика образца, а два другие - положение образца в штампе. Расчеты показали, что в зависимости от значений этих параметров можно существенно менять характер деформирования образца. В общем случае можно выделить следующие характерные стадии деформирования буртика, при которых меняется его напряженное состояние: 1) осадка верхней части образца до момента соприкосновения торцевой поверхности буртика с рабочей поверхностью штампа; 2) осадка буртика на рабочей поверхности штампа; 3) радиальное истечение металла за пределы рабочей поверхности штампа. Стадия 3, в зависимости от соотношения размеров буртика и штампа, может протекать в двух вариантах: а) при определенном сочетании параметров, в частности при $h/d_2 > 0,5$, $h/H < 0,8$, $d_2/D > 0,9$, интенсивность радиального истечения недостаточна, чтобы компенсировать осевую деформацию, поэтому происходит вдавливание рабочих поверхностей штампа в буртик и его частичное обжатие коническими поверхностями штампов; б) в другом случае, интенсивность радиального истечения металла достаточна, чтобы буртик не вступал в контакт с конической поверхностью штампов. В зависимости от сочетания характерных параметров, при испытаниях могут реализовываться отдельные или все отмеченные выше стадии. В таблице, в качестве примера, приведены результаты моделирования формоизменения, иллюстрирующие деформирование таких представительных образцов.

Таблица

Формоизменение образцов в зависимости от соотношения их размеров и размеров штампов

Вариант	Параметры	Стадии нагружения					
1	$h/H=1$ $d_1/d_2=0.54$ $h/d_2=0.09$ $d_2/D=0.9$						
2	$h/H=0.8$ $d_1/d_2=0.6$ $h/d_2=0.4$ $d_2/D=0.8$						
3	$h/H=0.8$ $d_1/d_2=0.5$ $h/d_2=0.5$ $d_2/D=1$						

В качестве характеристик напряженного состояния удобно использовать безразмерные инвариантные комплексы [2,3]:

показатель напряженного состояния

$$k = \frac{\sigma}{T};$$

и показатель Лоде

$$\mu_{\sigma} = 2 \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{\sigma_{11} - \sigma_{33}} - 1,$$

где $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ - среднее нормальное напряжение, $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ - главные напряжения;

$T = \sqrt{0.5s_{ij}s_{ij}}$ - интенсивность касательных напряжений; s_{ij} - компоненты девиатора напряжений.

Показатель k характеризует относительный уровень среднего нормального напряжения. При $k > 0$ преобладают нормальные растягивающие напряжения, при $k < 0$ - сжимающие. Показатель $\mu_\sigma = -1$ соответствует напряженному состоянию одноосного растяжения, $\mu_\sigma = +1$ - одноосного сжатия, а при $\mu_\sigma = 0$ реализуются условия плоского напряженного состояния.

Степень деформации сдвига Λ , накопленная материальной частицей, может быть определена интегрированием вдоль траектории ее смещения [2]

$$\Lambda = \int_0^t H d\tau,$$

где $H = \sqrt{2\xi_{ij}\xi_{ij}}$ - интенсивность скоростей деформации сдвига; ξ_{ij} - компоненты тензора скоростей деформации сдвига; t - время деформирования.

Были изготовлены образцы с параметрами, приведенными в таблице. Цель эксперимента - выявления участков образцов, состояние которых определяет момент их визуально контролируемого разрушения. Материал образцов - сталь СтЗсп после отжига при температуре 700°C в течение 1 часа. Образцы были подвергнуты осадке на универсальной испытательной машине ZDMU-10. В процессе испытания образцы периодически разгружали и изучали под инструментальным микроскопом для выявления признаков разрушения. Фотографии образцов в исходном состоянии, промежуточной стадии деформирования и после разрушения приведены на рис. 2.

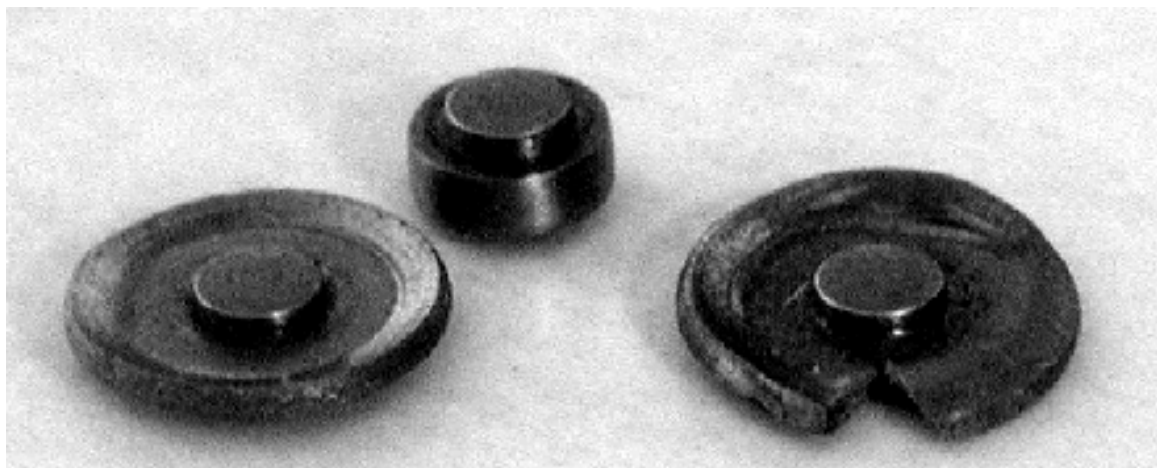


Рис. 2 Фотографии образцов в исходном состоянии (в центре), промежуточной стадии деформирования (слева) и после разрушения (справа)

В результате исследований было установлено, что для образцов, форма которых обеспечивает реализацию стадии деформирования 2 (осадка буртика на рабочей поверхности штампа), сетка видимых радиальных трещин образуется в начале стадии 3 (радиальное истечение металла за пределы рабочей поверхности) в части торцевой поверхности буртика, вышедшей из контакта со штампами. Как показали расчеты, эта область находится под действием интенсивных растягивающих напряжений и претерпевает наибольшую пластическую деформацию. Однако возникшие трещины не имеют дальнейшего развития, так как они расположены между областью сжимающих напряжений, имеющей место под штампом, и областью со значительно более умеренным уровнем растягивающих напряжений, расположенной вблизи боковой поверхности буртика. Установлено, что возникновение разрушающей трещины начинается на ребре между боковой и торцевой поверхностью буртика образца (точка А на рисунках в таблице). Трещина тотчас соединяется с упомянутыми радиальными трещинами, поэтому момент разрушения

образца легко наблюдается визуально. Расчеты показывают, что выдавливаемый из-под бойков металл преимущественно смещается в радиальном и тангенциальном направлениях, в связи с этим толщина буртика изменяется незначительно. После образования трещины деформация в этом месте осуществляется практически полностью за счет тангенциального течения металла, поэтому дальнейшее продолжение сжатия бойков вызывает лишь увеличение ширины трещины (см. рис. 2). Это позволяет, измеряя радиус образца в месте трещины, достаточно точно фиксировать момент разрушения, что, например не всегда удается при проведении испытаний на осадку гладких цилиндрических образцов.

Рассмотрим возможность изменения напряженного состояния в критической точке А в зависимости от соотношения размеров образца и штампов.

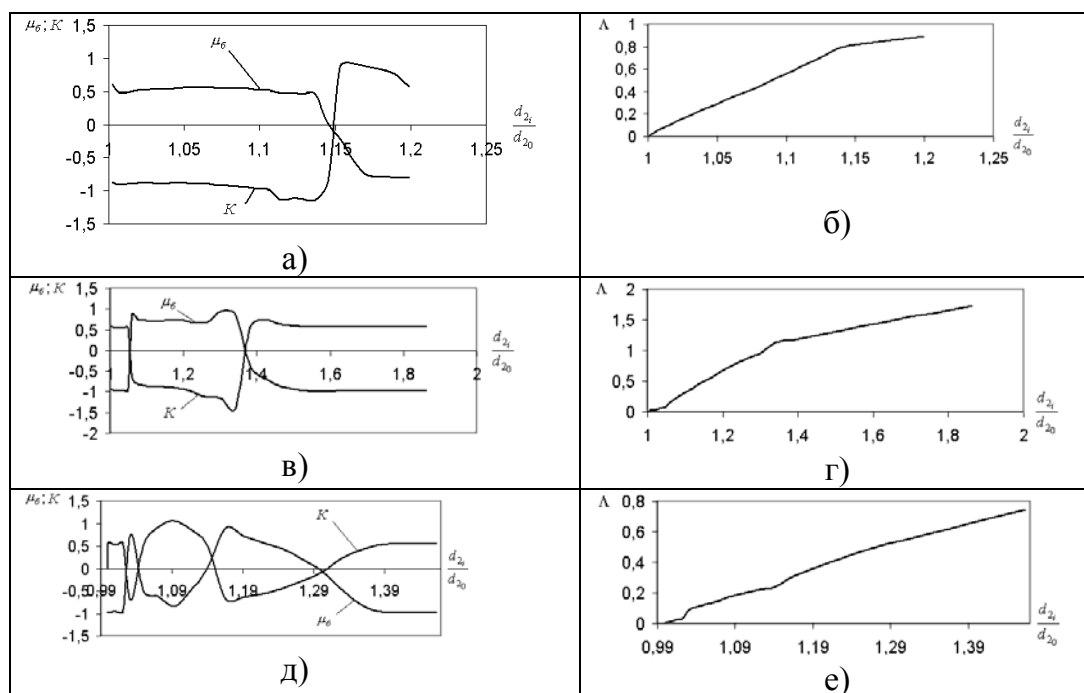


Рис. 3. Изменение характеристик напряженно-деформированного состояния в точке А образцов в процессе деформирования (d_{20} , d_{21} – начальное и текущее значения диаметра буртика): а, б – вариант 1 образца; в, г – 2; д, е – 3.

На рис. 3 приведены результаты расчета показателя напряженного состояния k и показателя Лоде μ_σ в процессе испытания для образцов, приведенных в таблице, которые характеризуют возможные варианты истории изменения напряженного состояния.

При наличии исходного зазора между поверхностями штампов и буртика ($h/H < 1$) реализуется стадия деформирования 1, которая характеризуется значениями показателей напряженного состояния $k=0,58$ и $\mu_\sigma = -1$, то есть соответствует напряженному состоянию одноосного растяжения [3]. Это совпадает также с выводами, полученными в работах [7,8]. Продолжительность этой стадии в экспериментах может варьироваться путем изменения зазора между поверхностями штампов и буртика. При отсутствии зазора ($h/H = 1$) реализуется стадия деформирования 2. Тормозящее действие сил трения на контакте несколько снижает значение показателя напряженного состояния ($k = 0,7 \dots 0,8$) по сравнению с аналитическим решением [2,3] ($k=0,58$), с которым, кстати, совпадает расчетное значение k на экваторе буртика в начале нагружения при отсутствии искривления боковой поверхности. После выдавливания металла за пределы контакта с рабочими и коническими поверхностями штампов, для точки А вновь реализуется напряженное состояние одноосного растяжения ($k=0,58$ и $\mu_\sigma = -1$).

Двухступенчатое нагружение может быть осуществлено по двум схемам: "сжатие - растяжение" (вариант 1 в таблице); "растяжение-сжатие" ($h/H < 1$, а значения h/d_2 и d_2/D должны быть выбраны так, чтобы разрушение образца происходило до момента выдавливания металла за пределы рабочей поверхности штампов). Следует отметить, что в последнем случае, также как и при осадке гладкого цилиндрического образца, разрушение

будет происходить в точке, расположенной на экваториальной линии боковой поверхности буртика [7,8].

Трехступенчатое нагружение по схеме "растяжение - сжатие - растяжение" (вариант 2 в таблице) может быть реализовано при использовании образцов с $h/H < 1$, отсутствии их разрушения на стадии 2 и деформировании на стадии 3 по варианту "б" .

Нагружения по схемам "сжатие - растяжение - сжатие - растяжение" и "растяжение - сжатие - растяжение - сжатие - растяжение" (вариант 3 в таблице) может быть осуществлено в случае осадки образцов с относительно большой высотой буртика и при значениях параметра d_2/D около 1, что должно обеспечить деформирование на стадии 3 по варианту "а".

Ввиду того, что при столь сложной истории нагружения не представляется возможным воспользоваться результатами аналитических решений, для интерпретации экспериментальных данных необходимо осуществлять математическое моделирование процесса испытаний для фактических начальных размеров образцов. Привязка к результатам конкретных экспериментов может быть осуществлена по измерению какого-либо контрольного размера образца после испытаний. Как следует из сказанного выше, таким размером может служить величина радиуса R_f образца в месте разрушающей трещины (или значение безразмерного комплекса $d_2/2R_f$) . Для обработки результатов испытаний может быть предложена следующая методика:

- образцы подвергаются испытаниям на осадку с их периодическим осмотром для выявления образования разрушающей трещины;

- в месте обнаруженной раскрывшейся радиальной трещины замеряется радиус образца R_f ;
- осуществляется математическое моделирование процесса испытания при начальных и граничных условиях аналогичных экспериментальным;
- по величине $d_2/2R_f$ на расчетных графиках типа рис. 3 определяется участок, соответствующий изменению характеристик напряженно-деформированного состояния в конкретных испытаниях.

Результаты испытаний могут быть использованы для сравнительных исследований пластичности металлов в условиях ступенчатого изменения напряженного состояния ($k = -1 \dots +0.58$, $\mu_\sigma = -1 \dots +1$), а также для идентификации моделей разрушения.

Библиографический список

1. Smirnov S.V., Domilivskaya T.V., Bogatov A.A. In: Advanced Methods in Materials Processing Defects, by M. Predeleanu and P.Gilormini. Elsevier Science B.V., 1997, p. 71 – 80.
2. Пластичность и разрушение / под ред. В.Л. Колмогорова. М.: Металлургия, 1977, 336 с.
3. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1984, 144 с.
4. Пластичность и прочность твердых тел при высоких давлениях /Береснев Б.И., Мартынов Е.Д., Радионов К. и др. М.: Наука, 1970, 160 с.
5. Гун Г..Я., Биба Н.В., Садыхов О.Б. и др. Автоматизированная система Форм-2Д для расчета формоизменения в процессе штамповки на основе метода конечных элементов// Кузнечно-штамповочное производство. 1992. №9-10. с. 4-7.
6. N. Viba, A. Lishiny, S. Stebounov Efficiency of using simulation for stamping technology development //in Journal Forging and Stamping Production, No 5, 2001, pp.39-44
7. Мигачев Б.А. Квалиметрия на базе мониторинга математическими и аппаратурными методами. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН. 2000, 175 с.
8. Мигачев Б.А. Особенности определения условия разрушения при испытании металла способом осадки. Дефектоскопия. 1999, №10.