

С. И. ГУБКИН

НАРУШЕНИЕ ЗАКОНА ПОДОБИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

(Представлено академиком Н. С. Курнаковым 25 VI 1940)

В теории пластической деформации большое значение имеет закон подобия, установленный Фр. Кик (Fr. Kick, Das Gesetz, der proportionalen Widerstände, Leipzig, 1885). Согласно этому закону тела считаются подобными, если при отношении их линейных размеров a ($\frac{H_1}{H_2} = a$) площади их относятся, как a^2 ($\frac{F_1}{F_2} = a^2$), и объемы, как a^3 ($\frac{v_1}{v_2} = a^3$). Сущность закона подобия заключается в следующем: если отношение линейных деформаций ($\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}$) подобных тел равно отношению их линейных размеров, т. е. равно a , то отношение необходимых усилий для создания этих деформаций должно равняться a^2 ($\frac{P_1}{P_2} = a^2$) и отношение работ деформаций должно равняться a^3 ($\frac{A_{g1}}{A_{g2}} = a^3$). Этот закон можно доказать и на основе современных положений пластической деформации. Действительно, при линейном растяжении или сжатии работа деформации может быть представлена выражением:

$$A_g = K v \ln \frac{H}{h}.$$

При рассмотрении сжатия: H — высота тела до сжатия, h — высота тела после сжатия, v — объем тела, K — среднее сопротивление деформации в процессе сжатия, $\Delta H = H - h$ — линейная деформация сжатия.

При наличии двух подобных тел работа деформации для первого тела:

$$A_{g1} = K_1 v_1 \ln \frac{H_1}{h_1},$$

а для второго:

$$A_{g2} = K_2 v_2 \ln \frac{H_2}{h_2}.$$

Пусть отношение линейных размеров подобных тел $\frac{H_1}{H_2} = a$ и отношение объемов $\frac{v_1}{v_2} = a^3$. Докажем, что работы, затраченные для получения линейных деформаций, относящихся между собой, как a ($\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} = a$), должны относиться, как a^3 ($\frac{A_{g1}}{A_{g2}} = a^3$).

Действительно, $\ln \frac{H_1}{h_1} = \ln \frac{H_1}{H_1 - \Delta H_1}$; $\ln \frac{H_2}{h_2} = \ln \frac{H_2}{H_2 - \Delta H_2}$; так как $\frac{H_1}{H_2} = a$ и $\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} = a$, то $\ln \frac{H_1}{H_1 - \Delta H_1} = \ln \frac{H_2 \cdot a}{H_2 \cdot a - \Delta H_2 \cdot a} = \ln \frac{H_2}{H_2 - \Delta H_2} = \ln \frac{H_1}{h_2} = \ln \frac{H_1}{h_1}$, т. е. относительные деформации этих тел в одном из главных направлений равны, а, следовательно, должны быть равны и средние сопротивления деформаций, т. е. $K_1 = K_2$. В таком случае

$$\frac{A_{g1}}{A_{g2}} = \frac{v_1}{v_2} = a^3.$$

При отсутствии подобия тел сохранится закон пропорциональности, согласно которому для равных относительных деформаций

$$\ln \frac{H_1}{h_1} = \ln \frac{H_2}{h_2} \text{ (следовательно, } K_1 = K_2 \text{)}$$

работы деформаций относятся только, как их объемы,

$$\frac{A_{g1}}{A_{g2}} = \frac{v_1}{v_2} = \text{любому заданному числу.}$$

В Лаборатории механических испытаний ИОНХ АН СССР проводится большая работа по изучению пластических свойств магниевых сплавов. В процессе проведения этой работы появилось сомнение в существовании закона пропорциональности при деформации магния.

Для проверки появившихся сомнений были поставлены специальные эксперименты по осаживанию на вертикальном копре цилиндрических образцов магния. Образцы были приняты двух размеров $H_1 = 20$ мм; диаметр $D_1 = 15$ мм; $v_1 = 3530$ мм³ и $H_2 = 10$ мм; диаметр $D_2 = 15$ мм; $v_2 = 1765$ мм³.

Деформация была произведена с высоты 1 м бойками различного веса. Потерянная при ударе энергия была учтена. Эксперименты были проведены при температуре 20, 200, 300, 400 и 450°. При температурах выше комнатной образцы к началу эксперимента находились в печи, установленной на наковальне копра. В этой печи образцы и получали нагрев; в момент эксперимента печь откидывалась и боек наносил удар по образцу. В результате замера полученных осадок при различных работах деформации были построены кривые, представленные на фиг. 1.

Согласно вышеизложенному, относительные деформации могут быть равны в том случае, когда их отношение равно отношению линейных размеров:

$$\text{если } \frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} = \frac{H_1}{H_2} = a, \text{ то } \ln \frac{H_1}{h_1} = \ln \frac{H_2}{h_2}. \text{ В нашем случае } \frac{H_1}{H_2} = a = \frac{20}{10} = 2.$$

Относительные деформации будут равны при $\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} = 2$, в этом случае $K_1 = K_2$ и согласно закону пропорциональности

$$\frac{A_{g1}}{A_{g2}} = \frac{v_1}{v_2} = 2.$$

Исходя из величин деформаций, для которых получены кривые, представленные на фиг. 2, наиболее целесообразно произвести расчет для относительной деформации 10%. Кстати эта деформация весьма часто встречается в производственных условиях при ковке сплавов.

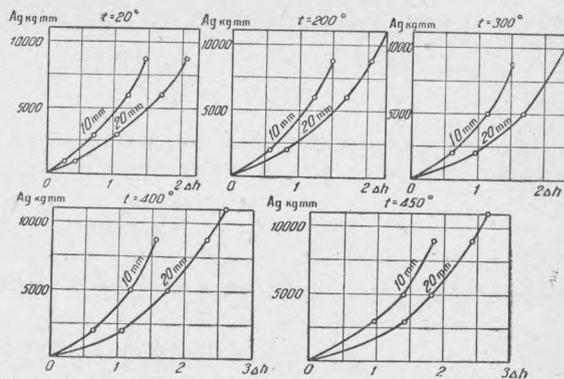
Примем $\Delta H_1 = 2$ мм, в таком случае $\Delta H_2 = 1$ мм. Составим таблицу, в которой для относительной степени деформации 10% для каждой температуры дано отношение работ $\left(\frac{A_{g1}}{A_{g2}} \frac{\text{кг мм}}{\text{кг мм}} \right)$ согласно эксперимен-

тальным данным, иллюстрированным кривыми на фиг. 1, и согласно расчету, по закону пропорциональности (табл. 1).

Таблица 1

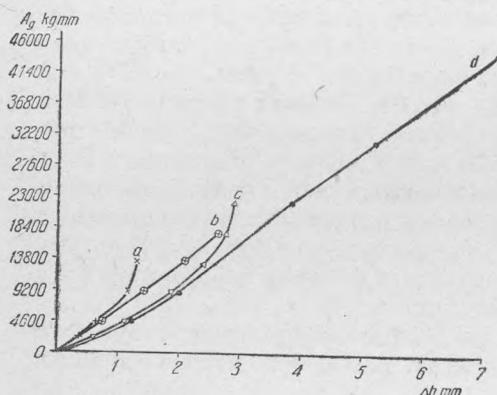
Температура, °C	$\frac{A_{g1}}{A_{g2}}$	$\frac{A_{g1}}{A_{g2}}$ согласно закону пропорциональности
	согласно экспериментальным данным	
20	$\frac{8400}{4700} = 1,79$	2
200	$\frac{8400}{4600} = 1,825$	2
300	$\frac{7400}{4300} = 1,72$	2
400	$\frac{6700}{3800} = 1,76$	2
450	$\frac{5950}{2950} = 2$	2

Из рассмотрения табл. 1 следует, что закон пропорциональности нарушается для всех температур, за исключением температуры 450°.



Фиг. 1. Зависимость между работой деформации и осадкой образца из магния.

Аналогичное отступление было отмечено и для сплава магния Ma_3 (Al = 5,56%; Zn = 0,99%; Mn = 0,33%; Mg — остальное), для которого были взяты образцы тех же размеров, как и для магния, и тем же путем осажены при различных температурах. На фиг. 2 приведены кривые для температур 20 и 400°. На основании результатов экспериментов, которые иллюстрируют кривые фиг. 2, состав-



Фиг. 2. Зависимость между работой деформации и осадкой образца из сплава Ma_3 . Кривая *a* построена для образца высотой 10 мм при температуре деформации 20°. Кривая *b* построена для образца высотой 20 мм при температуре деформации 20°. Кривая *c* построена для образца высотой 10 мм при температуре деформации 400°. Кривая *d* построена для образца высотой 20 мм при температуре деформации 400°.

Таблица 2

Температура, °C	Степень деформации	$\frac{A_{g1}}{A_{g2}}$ согласно экспериментальным данным	$\frac{A_{g1}}{A_{g2}}$ согласно закону пропорциональности
20	10%	$\frac{14000}{9000} = 1,55$	2
400	10%	$\frac{9000}{4700} = 1,91$	2
400	30%	$\frac{37000}{24000} = 1,54$	2

лена табл. 2 для относительных степеней деформации 10 и 30%.

Таким образом и для сплава Ma_3 также удалось подметить отступление от закона пропорциональности.

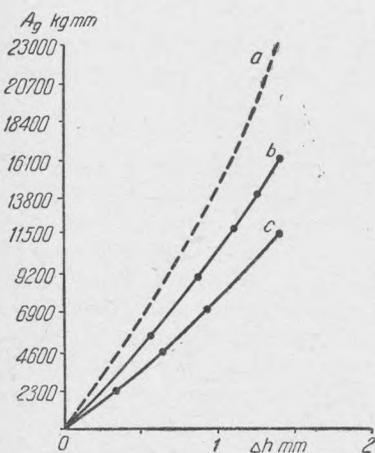
Установленные отступления от закона пропорциональности привели к убеждению в необходимости проверить также и закон подобия при комнатной температуре для сплава Ma_3 как одного из распространенных

магниевого сплава. С этой целью были изготовлены подобные образцы двух типов: $H_1=32$ мм и $H_2=20$ мм; $D_1=24$ мм и $D_2=15$ мм; в этом случае

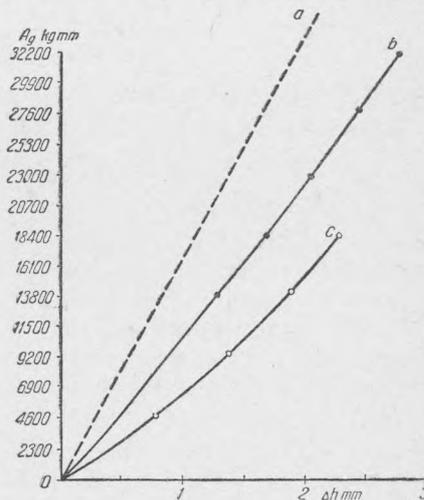
$$\frac{H_1}{H_2} = a = \frac{32}{20} = 1,6; \quad \frac{v_1}{v_2} = 4,095 = (1,6)^3 = a^3.$$

Образцы были деформированы бойками различного веса с высоты 0,5 м (средняя скорость деформации 1,6 м/сек) и с высоты 1 м (средняя скорость деформации 2,2 м/сек).

Результаты экспериментов при деформации с высоты 0,5 м изображены на фиг. 3, а результаты с высоты 1 м — на фиг. 4. На каждой из этих фигур представлены три кривые *a*, *b* и *c*. Кривые *c* получены экспериментально для образца высотой 20 мм, кривые *b* — также экспериментально для образ-



Фиг. 3. Зависимость между работой деформации и осадкой образца из сплава Mg_3 для высоты падения бойка—0,5 м. Кривая *c* получена экспериментально для образца высотой 20 мм. Кривая *b* получена экспериментально для образца высотой 32 мм. Кривая *a* получена расчетным путем для образца высотой 32 мм.



Фиг. 4. Зависимость между работой деформации и осадкой образца из сплава Mg_3 для высоты падения бойка 1 м. Кривая *c* получена экспериментально для образца высотой 20 мм. Кривая *b* построена экспериментально для образца высотой 32 мм. Кривая *a* получена расчетным путем для образца высотой 32 мм.

цов высотой 32 мм. Кривые *c* получены для образцов высотой 32 мм расчетным путем, исходя из закона подобия. Если взять отношение осадок большого и малого образца равным $a=1,6$, то отношение работ, затраченных для получения этих осадок, должно быть равным $4,095 (a^3)$. Таким образом по экспериментальной кривой *c* для малого образца можно получить кривую *a* расчетным путем для большого образца.

Приведенные кривые убедительно показывают нарушение закона подобия при линейном осаживании на копре сплава Mg_3 при комнатной температуре. Отступление от закона подобия более резко выражено для более высокой средней скорости деформации (сравните кривые на фиг. 3 и 4).

Следует отметить, что указанное отступление от законов подобия и пропорциональности наблюдается при сравнительно высоких скоростях, при малых скоростях деформации отступление замечено не было. Причину нарушения закона подобия следует искать в повышении температуры образца в процессе деформации. Чем быстрее протекает процесс деформации, тем больше повышается температура образца и тем, следовательно, меньше становится сопротивляемость деформации, и расход энергии на

деформацию уменьшается. Повышение температуры должно зависеть от скорости деформации, от свойств исследуемого вещества и от соотношения размеров поверхности образца к его объему: чем это отношение больше, тем меньше эффект повышения температуры, так как больше возможности выделившемуся теплу уйти в окружающую среду. Чем меньше температурный эффект, тем меньше отступление от закона подобия. Это положение, очевидно, должно быть правильным для всех металлов и их сплавов, поэтому сейчас в Лаборатории механических испытаний ИОНХ АН СССР идет проверка сделанных выводов для меди, алюминия и армко-железа.

Лаборатория механических испытаний
Института общей и неорганической химии
Академии Наук СССР

Поступило
4 VI 1940