

## УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6М ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ

А. М. Брагов, А. К. Ломунов

(Горький)

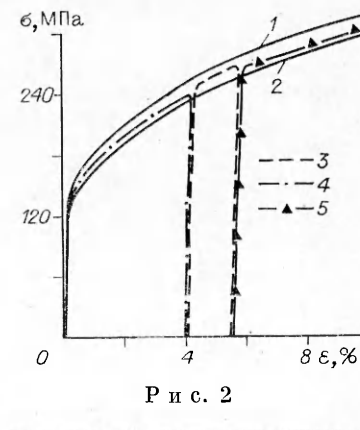
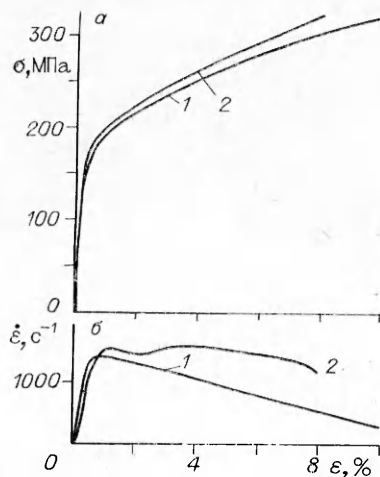
Большое количество исследованных к настоящему времени металлов и их сплавов обнаруживают возрастание механических характеристик с увеличением скорости деформации [1, 2]. Однако имеются материалы, обладающие нулевой и даже отрицательной чувствительностью к скорости деформации. К числу подобных материалов относится магниевый-алюминиевый сплав АМг6, широко применяемый в различных конструкциях новой техники. Результаты экспериментов, выполненных с этим сплавом в диапазоне скоростей деформаций  $10^{-4} - 10^1 \text{ с}^{-1}$ , свидетельствуют об уменьшении прочностных характеристик с ростом скорости [3]. Имеется ограниченное число данных о поведении этого сплава при скоростях деформации более  $10^2 \text{ с}^{-1}$  [4-6].

С использованием метода Кольского авторами [4] проведены испытания сплава АМг6 при скоростях деформаций  $10^3 \text{ с}^{-1}$ . Были испытаны образцы этого сплава на сжатие в состоянии поставки и на растяжение в отожженном состоянии. В качестве результатов авторы представили диаграммы деформирования и значения предела текучести при различных скоростях деформации.

Оказалось, что диаграммы деформирования сплава АМг6 в отожженном состоянии для скоростей деформаций  $2 \cdot 10^{-3}$  и  $1,7 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  совпадают друг с другом, а диаграмма деформирования для скорости деформации  $8 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$  располагается ниже этих диаграмм. В то же время представленные в этой работе табличные значения предела текучести при разных скоростях деформации противоречат этим результатам. Так, значение предела текучести при  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  составляет 180 МПа, при  $\dot{\epsilon} = 8 \cdot 10^2 - 190 \text{ МПа}$ , а при  $\dot{\epsilon} = 1,7 \cdot 10^3 - 205 \text{ МПа}$ . Такое несоответствие представленных результатов испытаний может быть следствием того, что скорость деформации в процессе проведения опытов не остается постоянной, а резко меняется.

О том, как влияет характер изменения скорости деформации на кривую деформирования, говорят примеры испытания сплава АМг6М, полученные нами на установке с разрезным стержнем Гопкинсона и представленные на рис. 1 (б — кривые изменения скорости деформации для режимов нагружения 1 и 2, а — отвечающие им диаграммы деформирования). Видно, что ход диаграмм деформирования сильно зависит от изменения скорости деформации в процессе проведения динамических испытаний. Кроме того, при некоторых режимах нагружения в системе разрезного стержня Гопкинсона могут формироваться импульсы деформаций, модулированные высокочастотными колебаниями, которые при дальнейшей обработке тем или иным способом сглаживаются [7]. Это может также маскировать истинное поведение материала при высокоскоростном деформировании.

В [5, 6] также представлены результаты испытаний сплава АМг6, выполненные с использованием модифицированного копрового метода. В этих работах проводилось исследование влияния на механические свойства как скорости деформации [5], так и истории ее изменения [6]. В [5] получено снижение прочностных характеристик вплоть до скоростей деформаций  $5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ . Результаты [6] позволили установить влияние на поведение сплава истории изменения скорости деформации. Так, предварительное статическое нагружение образцов приводит к тому, что диаграммы деформирования их при более высоких скоростях располагаются выше статической. В [6] для сплава



Р и с. 1

Р и с. 2

АМгб даны значения «верхнего» и «нижнего» пределов текучести: Обычно появление этих пределов при высокоскоростном нагружении связано с наличием площадки текучести у материала при статических испытаниях. Можно предположить, что появление «нижнего» и «верхнего» пределов текучести у сплава АМгб с монотонной статической диаграммой деформирования при скоростях деформации  $5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$  связано либо с высокочастотными колебаниями, которые накладываются на запись усилий, либо с резким изменением скорости деформаций, приходящимся на начальный участок диаграммы деформирования при переходе материала образца из упругого состояния в пластическое, где, как показывает опыт, наиболее сильно сказывается изменение скорости деформации на ход диаграммы деформирования. К сожалению, более определенного вывода на основании представленных данных сделать не удастся, так как в перечисленных работах характер изменения усилий и скорости деформаций во времени не показан. Появление этих колебаний при некоторых режимах деформирования связано с нагружающей системой и свойственно копровым испытаниям [8].

Таким образом, из анализа [4—6] видно, что поведение сплава АМгб при высокоскоростном деформировании носит сложный характер. Поэтому необходимы дальнейшие исследования поведения этого сплава при различных историях нагружения для скоростей деформации  $10^3 \text{ с}^{-1}$ .

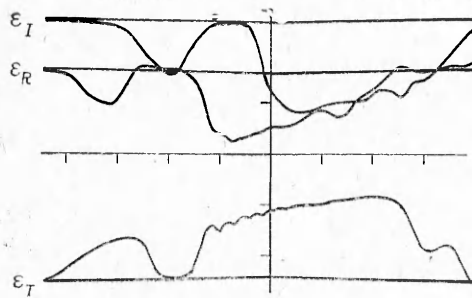
В настоящей работе представлены результаты испытаний сплава АМгбМ при комнатной температуре в двух областях скоростей деформаций: квазистатической и динамической. Испытания образцов при квазистатических режимах нагружения осуществлялись на испытательной машине УМЭ-10Т, динамические испытания проводились по методу Кольского на установке с использованием составного стержня Гопкинсона [9]. Подробное описание установки дано в [10].

Образцы диаметром 9 мм и высотой 4,5 мм изготавливались из раскатного кольца и отжигались при температуре 593 К в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе. Размеры образцов выбирались исходя из условий минимизации влияния инерционных сил на получаемые диаграммы деформирования [11].

Результаты испытаний сплава АМгбМ на растяжение для квазистатических режимов нагружения приведены на рис. 2. В экспериментах наряду с испытаниями при постоянных скоростях деформации были поставлены опыты, в которых скорость деформации изменялась непосредственно в ходе деформирования образца. В этом случае образец вначале нагружался со скоростью  $1,4 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  до деформации 4,5 %, после чего он разгружался и нагружался вновь со скоростью  $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  до деформации 6 %. Затем образец разгружался и нагружался со скоростью  $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Различные режимы по скорости деформации определялись скоростью движения активного захвата и задавались с помощью редуктора испытательной машины УМЭ-10Т. На рис. 2 линии 1 и 2 — диаграммы деформирования, полученные при непрерывных режимах нагружения со скоростями  $1,4 \cdot 10^{-4}$  и  $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , а 3—5 — диаграммы деформирования, полученные при циклическом нагружении со скоростями  $1,4 \cdot 10^{-4}$ ,  $1,4 \cdot 10^{-3}$ ,  $3,0 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

Таким образом, в диапазоне низких скоростей деформаций увеличение скорости деформации приводит к уменьшению прочностных характеристик материала, т. е. диаграмма деформирования при большей скорости деформации располагается ниже диаграммы при меньшей скорости. Особенность циклического нагружения заключается в том, что отрезки диаграммы деформирования при переходе с одной скорости деформации на другую не совпадают с диаграммами, полученными при тех же, но постоянных скоростях деформации. Результаты опытов (см. рис. 2) свидетельствуют о влиянии истории изменения скорости деформации на механические свойства сплава АМгбМ, что согласуется с данными [6].

Были проведены также две серии динамических экспериментов. В первой серии скорость деформации поддерживалась практически постоянной в течение всего опыта. Это обеспечивалось нагружением мерных стержней однородными ударниками длиной 50—400 мм, разогнанными в стволе баллистической установки [12]. Во второй серии опыты проводились при скачкообразном изменении скорости деформации. В этом случае импульсы сжатия сложной формы возбуждались ударом специальных ударников, составленных из материалов с различными акустиче-



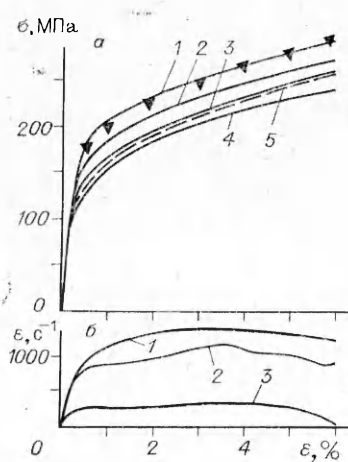
Р и с. 3

Типичная осциллограмма импульсов деформаций, полученная при нагружении составного стержня Гопкинсона таким ударником, показана на рис. 3. Динамические испытания образцов проводились как при растяжении, так и при сжатии. Обработку данных в соответствии с формулами Кольского [9], построение диаграмм деформирования проводили с помощью пакета программ на ЭВМ СМ-4. Погрешность определения напряжений и деформаций не превышала 5 % при доверительной вероятности 0,95.

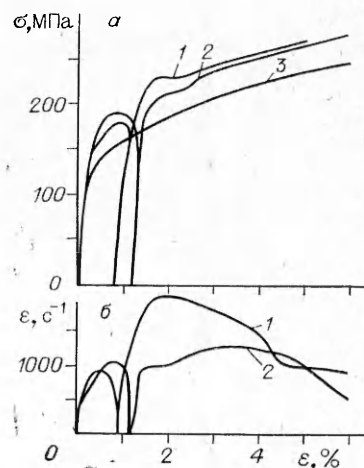
Результаты обработки данных высокоскоростных испытаний представлены на рис. 4, где каждая из диаграмм осреднена по результатам трех опытов, разброс результатов повторных опытов не превышал 3 %. На рис. 4, а и б показаны соответственно диаграммы деформирования при растяжении алюминиевого сплава АМг6М и законы изменения скорости деформации, полученные в первой серии опытов (кривые 1—3). Здесь же треугольниками нанесены данные по динамическому сжатию, найденные при скоростях деформации  $1,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Кривая 4 на рис. 4, а (статическая диаграмма деформирования при сжатии с  $\dot{\epsilon} \sim 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ) была предоставлена нам в качестве исходной в рамках межотраслевого базового эксперимента «Динамика» [15]. Диаграмма деформирования 5 (штриховая линия) получена нами при статическом нагружении при растяжении.

Из приведенных результатов следует, что диаграмма деформирования при скорости деформации  $2 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$  (кривая 3) совпадает в пределах погрешности опытов со статической диаграммой 5. Динамические кривые деформирования 1 и 2 для скоростей деформации  $10^3$  и  $1,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  располагаются выше статической.

Экспериментальные данные, найденные при скачкообразном изменении скорости деформации при испытаниях на сжатие, показаны на рис. 5 (кривая 3 соответствует кривой 4 на рис. 4). В подобных экспериментах



Р и с. 4



Р и с. 5

с резким изменением скорости деформации вариации напряжений, если таковые наблюдаются, являются непосредственной мерой влияния скорости деформации на механические свойства материалов. Из рис. 5 видно, что разгрузка материала образца после первого этапа нагружения со скоростью  $10^3 \text{ с}^{-1}$  упругая с модулем упругости, равным исходному модулю Юнга. Последующая догрузка при номинальной скорости  $2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  упругая с тем же модулем. Переход материала образца в пластическое состояние на втором этапе происходит при более высоком напряжении, чем достигнутое к началу разгрузки.

Таким образом, проведенные эксперименты и следующие из них количественные данные свидетельствуют о том, что при скоростях деформации более  $10^3 \text{ с}^{-1}$  упругопластические характеристики сплава АМг6М увеличиваются с ростом скорости деформации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. — Киев: Наук. думка, 1979.
2. Васин Р. А., Ленский В. С., Ленский Э. В. Динамические зависимости между напряжениями и деформациями // Проблемы динамики упругопластических сред. — М.: Мир, 1975.
3. Миклиев П. Г., Дуденков В. М. Сопротивление деформации и пластичность алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия, 1979.
4. Большаков А. П., Новиков С. А., Синицын В. А. Исследование динамических диаграмм одноосного растяжения и сжатия меди и сплава АМг6 // Пробл. прочности. — 1979. — № 10.
5. Попов Н. Н., Иванов А. Г., Стрёмкин В. П. и др. Получение полных диаграмм растяжения сплава АМг6 и МА18 при скоростях деформации  $10^{-3} \div 10^3 \text{ с}^{-1}$  // Пробл. прочности. — 1981. — № 12.
6. Попов Н. Н. Влияние истории деформирования на механические свойства сплавов АМг6 и МА18 // Технология легких сплавов. — М.: ВИЛС, 1985. — № 5.
7. Фоллэнсби, Франц. Распространение волн в составном стержне Гопкинсона // Теор. основы инж. расчетов. — 1983. — № 1.
8. Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х. Ф. и др. Динамика удара. — М.: Мир, 1985.
9. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // Механика. — 1950. — № 4.
10. Брагов А. М., Ломунов А. К., Русин Е. Е. Методика исследования динамических свойств материалов с использованием составного стержня Гопкинсона // Прикладные проблемы прочности и пластичности. — Горький: Горьк. ун-т, 1980. — Вып. 16.
11. Брагов А. М., Ломунов А. К. Особенности построения диаграмм деформирования методом Кольского // Прикладные проблемы прочности и пластичности. — Горький: Горьк. ун-т, 1984. — Вып. 28.
12. Брагов А. М., Леонтьев Е. А., Олонов Л. К. и др. Газовая пушка для исследования высокоскоростного деформирования твердых тел // Прикладные проблемы прочности и пластичности. — Горький: Горьк. ун-т, 1983. — Вып. 24.
13. Брагов А. М., Ломунов А. К. Способ возбуждения в твердом теле импульса сжатия сложной формы // Прикладные проблемы прочности и пластичности. — Горький: Горьк. ун-т, 1985. — Вып. 30.
14. А. С. 1293545 СССР, кл. G 01 N 3/30, G 01 M 7/00. Ударник/Брагов А. М., Ломунов А. К. // Открытия. Изобретения. — 1987. — № 8.
15. Кращенко В. П., Рудницкий Н. П., Двоглазов Г. А. и др. Механические характеристики сплава АМг6 в широких диапазонах температур и скоростей деформирования // Пробл. прочности. — 1985. — № 6.

Поступила 6/V 1987 г.