

## Влияние знака нагрузки на неустойчивость деформации и разрушение алюминия и его сплавов при гелиевых температурах

© В.В. Шпейзман, В.И. Николаев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступила в Редакцию 16 июля 1997 г.)

Исследовано влияние содержания примесей, знака нагрузки и его изменения на кривые напряжение–деформация алюминия при гелиевых температурах. Показано, что неустойчивость деформации, которая проявляется в виде скачков на диаграммах, зависит от всех перечисленных факторов. При смене знака нагрузки амплитуда скачков деформации возрастает, что может привести к появлению макротрещин даже при сжатии. Для сплава Д16Т получена температурно-скоростная область существования неустойчивой деформации.

Известно, что примеси существенно влияют на макроскопическую неустойчивость пластической деформации при гелиевых температурах [1]. Например, для чистого алюминия скачки на диаграмме растяжения наблюдаются при температурах, меньших 1.6 К [2], а для содержащего примеси технического алюминия — при 4.2 К и более высоких температурах [1,3]. Обычно это связывают с увеличением в примесных кристаллах напряжений течения и их более сильной температурной зависимостью, что является важным фактором в моделях тепловой неустойчивости деформации [4]. По этой же причине в чистых металлах скачки начинаются иногда в конце диаграммы растяжения, т.е. после значительной пластической деформации, а в примесных металлах и сплавах — практически сразу же за пределом текучести [3]. Еще большее влияние, чем на деформацию, примеси могут оказывать на разрушение. Наиболее характерным примером этого является низкотемпературная хрупкость, называемая в технике хладноломкостью, которая во многих случаях связывается с примесями [5]. Но даже если при гелиевых температурах материал сохраняет пластичность, то, как правило, у примесных кристаллов она ниже, чем у чистых [2].

В настоящей работе наряду с анализом влияния содержания примесей на скачкообразную деформацию и разрушение, проводилось исследование роли знака деформации и его изменения в процессе нагружения (т.е. изучался эффект Баушингера в области деформационной неустойчивости). Предполагалось, что, поскольку пластичный материал при сжатии не разрушается, таким образом можно будет выяснить, во-первых, как развивается неустойчивость при больших деформациях и, во-вторых, как возникает разрушение при растяжении в момент скачка деформации.

### 1. Методика эксперимента

Испытания одноосным растяжением и сжатием проводились на цилиндрических образцах из алюминия АД1 и его сплавов В95 и Д16Т. Диаметр образцов на растяжение был 4 мм, длина рабочей части составляла

30 мм, для сжатия — 3–4 и 7–10 мм соответственно. Из рабочей части некоторых образцов, разрушенных при растяжении, были изготовлены новые образцы, которые испытывались затем на сжатие.

Опыты проводились в гелиевом криостате фирмы Oxford на универсальной испытательной машине Instron 1342. Предварительное охлаждение осуществлялось жидким азотом. Жидкий гелий подавался в криостат с помощью двух насосов, создававших в криостате слабое разрежение.

Температура испытаний варьировалась в интервале 4.2–20 К.

### 2. Результаты опытов и их обсуждение

На рис. 1 приведены диаграммы растяжения и сжатия исходных образцов, а на рис. 2 — диаграммы сжатия предварительно растянутых образцов в координатах: напряжение  $\sigma = P/F_0$  (где  $P$  — нагрузка,  $F_0$  — начальная площадь сечения)–деформация  $\varepsilon = (\Delta l + M)/l_0$  (где  $\Delta l$  — изменение длины образца,  $l_0$  — начальная длина образца, величина  $M$  определяется жесткостью машины, и в нашем случае при максимальных нагрузках ее вклад в деформацию образца не превышал 1.5%). При анализе данных, приведенных на рис. 2, в расчете деформации учитывалась предварительная деформация, причем ее знак в рассмотрении не принимался. Основанием для этого могут служить результаты [6], где было показано, что плотность дислокаций  $\rho$  в монокристаллах LiF растет при каждом новом нагружении независимо от знака деформации, при этом  $\rho$  оказалась пропорциональной алгебраической сумме деформаций при каждом нагружении.

Заметим, что если сравнивать кривые растяжения и сжатия, проведенные по вершинам скачков (верхние огибающие), то в истинных координатах, при расчете которых  $F_0$  заменяется на текущую площадь  $F_0/(1 + \varepsilon)$ , а вместо  $\varepsilon$  подставляется  $\ln(1 + \varepsilon)$ , для АД1 и Д16Т кривые сжатия и растяжения практически совпадают, что свидетельствует об отсутствии анизотропии по отношению к знаку нагрузки, а для сплава В95 кривая при

растяжении располагается ниже кривой при сжатии и быстро заканчивается разрывом образца.

Скачкообразная деформация развивается по-разному в исследованных материалах. Как видно из рис. 1, *a*, для алюминия АД1 скачки при растяжении появляются в конце участка равномерной деформации (вблизи максимума диаграммы величина деформации составляет приблизительно 20%) и сразу достаточно большой амплитуды, которая слабо изменяется до момента разрушения образца. На диаграмме сжатия скачки очень малой амплитуды начинаются за пределом текучести при деформации около 8%, затем кривая представляет собой пульсирующую линию с непрерывно возрастающей амплитудой скачков.

Следовательно, первые скачки при сжатии начинаются раньше по деформации и имеют меньшую амплитуду, чем скачки при растяжении, но затем по мере роста деформации их амплитуда растет, и если сравнивать при одинаковой деформации, то при сжатии скачки больше по величине, чем при растяжении. У образца, испытывающегося при сжатии после растяжения, пластическая деформация начинается при напряжениях, меньших, чем были в момент разгрузки (точнее, в точке максимума, усредненной по скачкам диаграммы, т.е. в момент перехода от равномерной деформации к локализованной в шейке.<sup>1</sup> Разница в напряжениях течения (величина эффекта Баушингера) составляет  $\Delta\sigma = 110$  МПа. Скачки начинаются практически сразу после достижения напряжений, при которых закончилась равномерная деформация при растяжении. По сравнению со сжатием исходного образца при повторном нагружении заметны более интенсивное упрочнение и большее увеличение амплитуды скачков по мере роста деформации.

Для сплава Д16Т (рис. 1, *b*) скачки при сжатии и растяжении начинаются сразу за пределом текучести. При растяжении они быстро достигают большой амплитуды ( $\sim 50$  МПа), которая растет с деформацией и к моменту разрыва достигает  $\sim 100$  МПа. Таким образом, поведение сплава Д16Т при растяжении отличается от описанного выше поведения алюминия. При сжатии же диаграммы для АД1 и Д16Т внешне похожи, различие существует лишь в масштабе напряжений.

Как видно из рис. 2, *b*, эффект Баушингера для сплава Д16Т крайне мал, диаграмма сжатия предварительно растянутых образцов подобна сжатию исходных образцов, несмотря на то что предварительная деформация достигала 17%. Одной из причин столь различного поведения алюминия и его сплава может быть то, что величины деформационного упрочнения (т.е. разницы между напряжениями течения при  $\varepsilon = 10-20\%$ ,  $\sigma_\varepsilon$ , и пределом текучести,  $\sigma_s$ ) у них сильно различаются: у сплава значительно выше предел текучести и ниже деформационное упрочнение. Если сравнивать величину

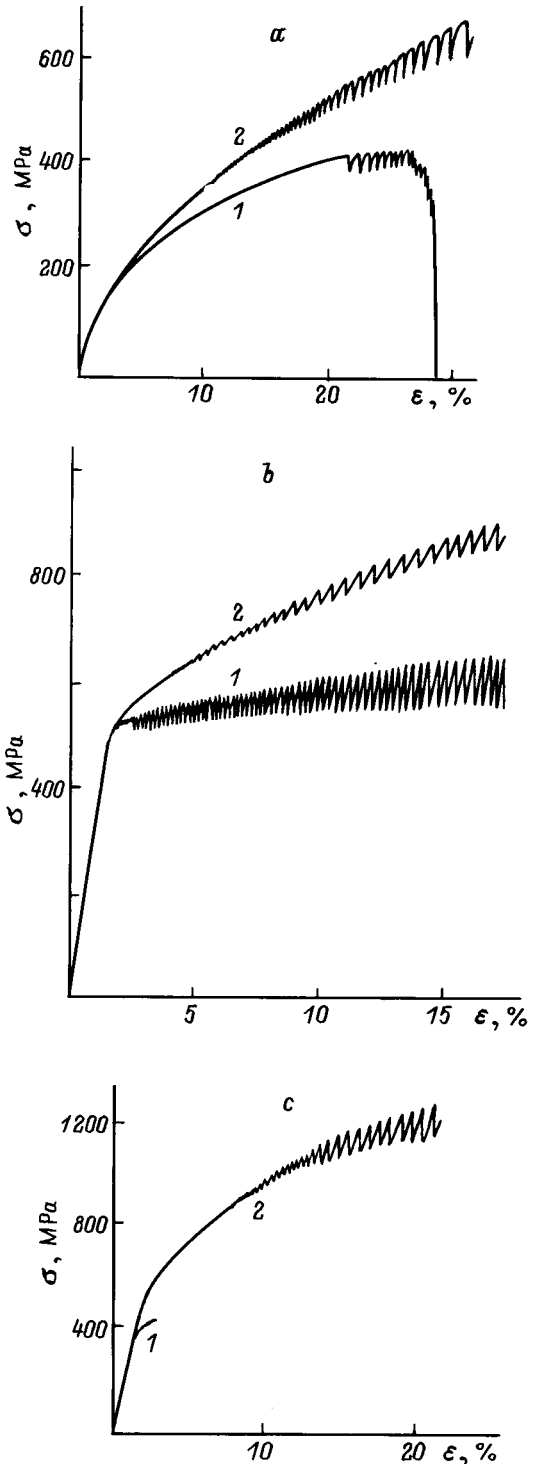
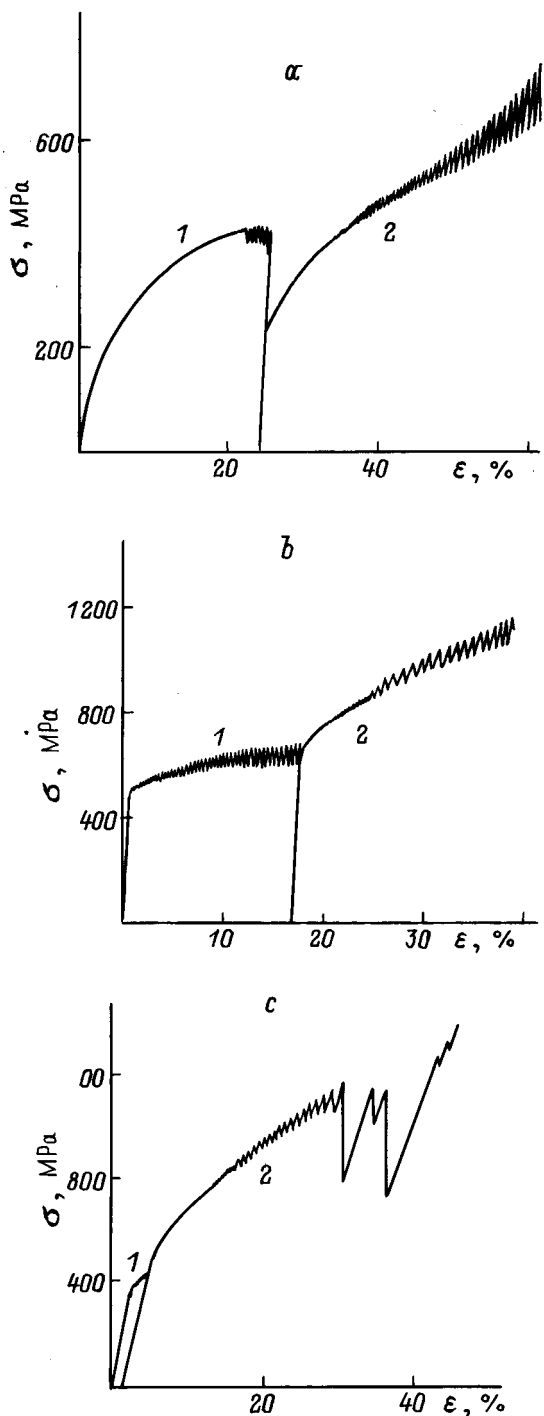


Рис. 1. Диаграммы растяжения (1) и сжатия (2) алюминия АД1 (*a*), алюминиевых сплавов Д16Т (*b*) и В95 (*c*) при 4.2 К.

эффекта Баушингера с относительной величиной деформационного упрочнения, то и для алюминия, и для сплава Д16Т скачок напряжений при смене знака нагрузки составит примерно половину разницы между  $\sigma_\varepsilon$  и  $\sigma_s$ . Тогда становится понятной и зависимость амплитуды скачков при повторном нагружении с изменением знака

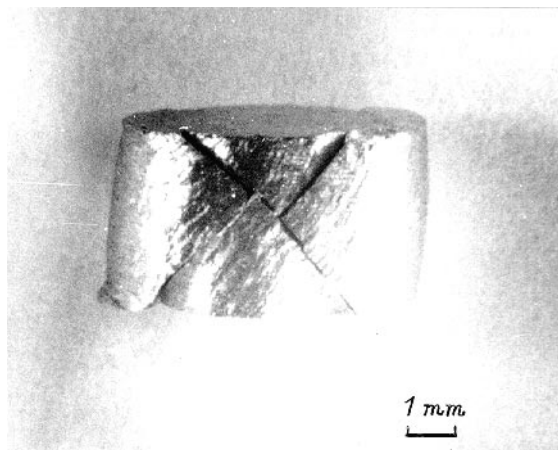
<sup>1</sup> Заметим, что в данном случае противопоставление равномерной и локализованной деформации является не вполне корректным, так как деформация и до максимума усредненной диаграммы была локализованной.



**Рис. 2.** Диаграммы сжатия (2) после предварительного растяжения (1) образцов алюминия АД1 (а), сплавов Д16Т (b) и В95 (c) при 4.2 К.

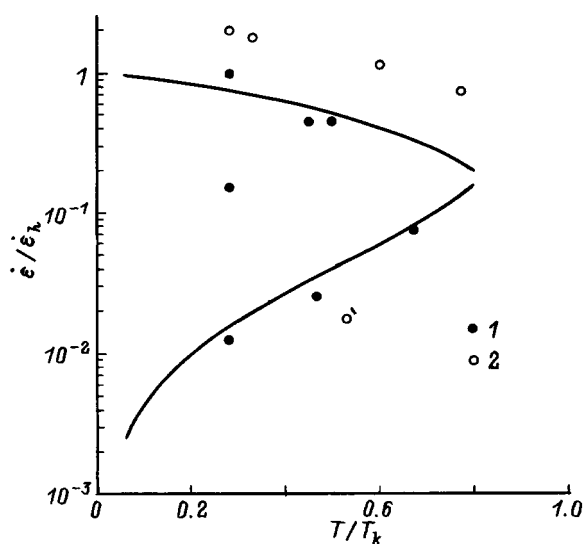
нагрузки от деформации: она определяется в любом случае только деформацией при последнем нагружении, т. е. скачки "не запоминают" предыдущую деформацию другого знака. Вместе с тем следует заметить, что "память" деформации одного знака, безусловно, существует: при прерывании сжатия или растяжения после разгрузки и

нового нагружения диаграмма возвращается практически в точку разгрузки, и скачки возобновляются с прежней амплитудой.



**Рис. 3.** Образование трещин вдоль наклонных полос сброса при сжатии предварительно растянутого образца из сплава В95.  $T = 4.2$  К.

Поскольку при растяжении образец из сплава В95 разрушался при очень малой деформации (около 3%), диаграммы сжатия исходного образца и вырезанного из испытывавшегося на растяжение практически совпадают (как видно из рис. 2, c). Однако это справедливо только до деформации  $\sim 25\%$ , при последующем сжатии предварительно растянутого образца на диаграмме видны два глубоких спада нагрузки (на  $\sim 30\%$ ). Такая значительная локализация деформации приводит к образованию наклонных полос сброса и макротрещин вдоль них (рис. 3), что характерно для сжатия малоупругих материалов



**Рис. 4.** Расчетные кривые границ области неустойчивой деформации [8]. Экспериментальные точки для сплава Д16Т соответствуют кривым растяжения со скачками деформации (1) и плавным кривым деформации (2).

(например, мрамора [7]) и совершенно не типично для алюминия и его сплавов. По-видимому, сплав В95 в отличие от других исследованных в настоящей работе материалов при температуре жидкого гелия склонен к сильной локализации деформации и разрушению вследствие этого, о чем свидетельствует также и малая величина предельной деформации при низкотемпературном растяжении этого сплава.<sup>2</sup>

Как уже отмечалось выше, скачкообразная деформация алюминия исследовалась во многих работах. В [8] сделана попытка теоретически определить температурно-скоростные границы области неустойчивой деформации. Для алюминия технической чистоты (99.5%) нормировочные параметры, определяющие эти границы, оказались следующими:  $T_k = 6.6 \text{ К}$ ,  $\dot{\epsilon}_h = 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ . В настоящей работе определена область температур и скоростей деформаций при растяжении алюминия D16T, в которой наблюдаются скачки деформации (рис. 4). Один ее параметр  $\dot{\epsilon}_h = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ , другой  $T_k = 15 \text{ К}$ . Сравнение областей неустойчивой деформации для алюминия и его сплава показывает, что в последнем эта область сдвинута в сторону больших температур и меньших скоростей деформации.

Таким образом, в настоящей работе показано, что неустойчивость деформации в области гелиевых температур не позволяет достичь больших макродеформаций. Усиление ее локализации приводит к образованию макротрещин, что еще раз подтверждает важную роль локализации деформации в разрушении.

Авторы выражают благодарность Г.А. Малыгину и Б.И. Смирнову за обсуждение результатов работы.

## Список литературы

- [1] В.И. Старцев, В.Я. Ильичев, В.В. Пустовалов. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. Металлургия, М. (1975). 328 с.
- [2] О.В. Клявин, А.В. Степанов. ФММ **8**, 2, 274 (1959); ФТТ **1**, 3, 956 (1959).
- [3] В.И. Николаев, В.В. Шпейзман. ФТТ **39**, 4, 647 (1997).
- [4] Г.А. Малыгин. ФММ **81**, 3, 5 (1996).
- [5] D.A. Wigley. Mechanical Properties of Materials at Low Temperatures. Plenum Press, N.Y.–London (1977). 373 p.
- [6] Т.С. Орлова, Б.И. Смирнов, В.В. Шпейзман. ФТТ **23**, 7, 1981 (1981).
- [7] A. Nadai. Theory of Flow and Fracture of Solids. McGraw–Hill, N.Y.–T.–L. (1950). V. 1. 647 p.
- [8] Г.А. Малыгин. ФНТ **12**, 8, 849 (1986).

---

<sup>2</sup> Не исключено, что разрушения можно достичь и без смены знака нагрузки при сжатии, если довести образец до больших степеней деформации.