

## **О влиянии жесткости системы нагружения на сопротивление деформированию и разрушению образцов сплавов при глубоком охлаждении**

**Е. В. Воробьев**

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Приведены результаты исследования влияния жесткости системы нагружения на параметры низкотемпературной прерывистой текучести и механические характеристики сталей 03X20H16AG6, 12X18H10T и титанового сплава 3М при температуре 4,2 К на различных стадиях развития процесса неустойчивости пластической деформации. Рассмотрены критерии разрушения по механизму адиабатического сдвига. Дан анализ составляющих жесткости испытательной машины с электрогидравлическим приводом. Показана необходимость регламентации стандартных механических испытаний материалов по параметру жесткости.*

**Ключевые слова:** прерывистая текучесть, скачок деформации, жесткость испытательной машины, податливость, скорость деформирования, механические характеристики.

**Введение.** Необходимость учета особенностей деформирования и разрушения конструкционных сплавов, связанных с прерывистой текучестью (ПТ), – одна из важных проблем низкотемпературной прочности. У сталей и сплавов криогенного назначения ПТ имеет место при  $T < 30$  К. Локализуясь при каждом акте ПТ, пластическая деформация образца сопровождается интенсивным нагревом и высокими скоростями с сопутствующими динамическими эффектами [1–3].

Стартовые механизмы низкотемпературной ПТ материалов обусловлены внутрикристаллическими взаимодействиями скоплений дислокаций с барьерами, возникновением локальных тепловых всплесков при близких к нулю значениях теплоемкости [4, 5], однако дальнейшее развитие скачкообразной деформации проявляется уже как свойство системы образец–машина (деталь–конструкция) в зависимости от ряда ее характеристик. При статическом нагружении образца основной характеристикой следует считать жесткость системы нагружения, определяющей количество упругой энергии, необратимо переходящей в работу локализованной скачкообразной деформации. Если при более высоких температурах, когда ПТ уже не реализуется, влияние жесткости может проявляться лишь на ниспадающем участке диаграммы деформирования [6, 7], поскольку условием перехода потенциальной упругой энергии в активную форму является снижение нагрузки  $dP/dt < 0$ , то в условиях периодической потери устойчивости пластической деформации при низкотемпературной ПТ регистрируется от нескольких десятков (стали, титановые сплавы) до нескольких сотен (алюминиевые, медные сплавы) спадов нагрузки, и, как следствие, эффект влияния жесткости системы суммируется и накапливается.

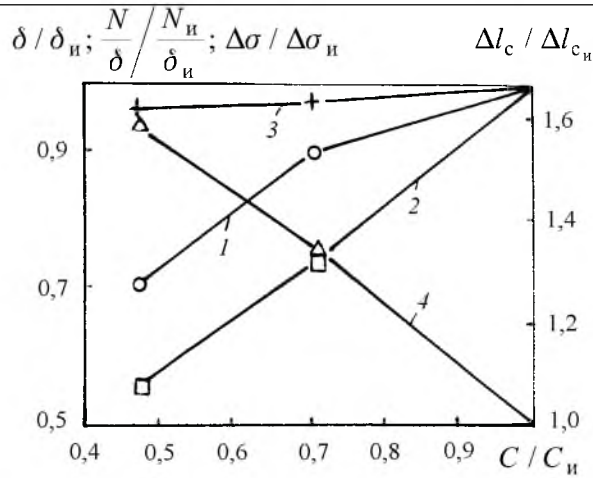
В данной работе представлены новые результаты о влиянии жесткости нагружающего устройства испытательной машины на параметры ПТ, механические характеристики и разрушение образцов металлических материалов на разных стадиях развития низкотемпературной нестабильности пластической деформации и проанализированы составляющие жесткости машины с электрогидравлическим приводом.

**Материалы и методики.** Исследовали аустенитные стали 03X20H16AG6, 12X18H10T, титановый сплав 3М, стандартные пятикратные образцы которых имели диаметр рабочей части 3 мм. Испытания образцов на одноосное растяжение проводили на установке УМН-10 [8] при температуре 4,2 К в среде жидкого гелия с номинальной скоростью деформирования  $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Исходная жесткость системы образец–машина составляла  $C_{и} = 12 \text{ МН/м}$ . В процессе испытаний жесткость изменяли с помощью устройства, упругий элемент которого, включенный в силовую цепь системы образец–машина, представляет собой пакет из определенного количества тарельчатых пружин [9].

**Результаты и их обсуждение.** Независимо от параметров и режимов нагружения скачкообразная деформация реализуется при выполнении адиабатического критерия  $c/c_k \leq 1$  [10], где  $c$  и  $c_k$  – соответственно удельная теплоемкость материала и ее критическое значение. Кроме того, необходимо, чтобы напряжение течения  $\sigma_f$  и модуль упрочнения  $\Theta$  были соответственно выше и ниже своих критических величин [11].

На стадии однородной пластической деформации (докритическая стадия), для которой характерно интенсивное деформационное упрочнение, система образец–машина, как и в случае упругого нагружения, находится в равновесном состоянии, и жесткость системы не влияет на процесс деформирования материала [7]. Ее влияние становится весьма существенным на закритической стадии – при развитии скачка деформации за счет трансформации в работу деформирования части потенциальной упругой энергии системы, обратно пропорциональной жесткости [2, 3].

Уменьшение жесткости системы приводит к увеличению удлинения образца  $\Delta l_c$  при скачке деформации  $\varepsilon_c$ . Это следует из выражения  $\varepsilon_c = \Delta T k_T / (\Theta + K)$  [2, 3, 9]. Здесь  $\Delta T$  – прирост температуры в зоне течения;  $k_T$  – коэффициент термического разупрочнения;  $K = Cl/F$  – эффективный модуль системы, где  $C$  – жесткость системы;  $l$  – длина зоны течения;  $F$  – площадь поперечного сечения образца. Кроме того, как показали расчеты прироста температуры в зоне течения [2], с уменьшением жесткости системы увеличивается локальный разогрев. В свою очередь, в результате достижения больших деформаций при каждом отдельном акте ПТ происходит снижение числа скачков  $N$ , так как деформация при каждом последующем скачке локализуется на новых участках рабочей части образца. Эти предположения подтверждаются результатами экспериментов, представленными на рисунке, где значения механических характеристик отнормированы по соответствующим исходным величинам. При снижении жесткости системы значительно возрастает максимальное удлинение  $\Delta l_c$ , уменьшаются относительное удлинение  $\delta$  и удельное число скачков  $N/\delta$ .



Зависимости относительного удлинения (1), относительного числа скачков (2), спада напряжения (3) и скачкообразного удлинения (4) образцов стали 03X20N16AG6 от жесткости системы образец-машина.

Характеристики  $\delta$  и  $N$  связаны соотношением  $\delta = \sum_{i=1}^N \Delta l_{c_i} / L$ , где  $L$  –

начальная длина рабочей части образца. Эффект увеличения удлинений перекрывается более значительным уменьшением числа скачков, вследствие чего уменьшается относительное удлинение  $\delta$ . При этом практически не изменяются максимальные спады напряжения  $\Delta\sigma_c$ , что отмечалось ранее [12]. Для стали 03X20N16AG6 с понижением жесткости системы образец-машина в диапазоне 12...5,7 МН/м отмечается изменение и других механических характеристик. Так, относительное сужение после разрыва  $\psi$  увеличивается от 43 до 49%, на 4% снижается предел прочности  $\sigma_B$ . Для титанового сплава 3М и стали 12X18N10Т изменения параметров ПТ и механических характеристик в зависимости от жесткости системы аналогичны. При этом для стали отмечено снижение предела прочности на 5%. Относительное удлинение сплава 3М уменьшается в 1,7 раза. Заметим, что у всех материалов условные пределы текучести практически не изменяются.

При достаточно больших значениях жесткости системы нагружения разрушение образцов сталей и сплавов происходит на очередном участке упругого нагружения, когда материал полностью исчерпал ресурс пластичности. Для стали 03X20N16AG6 такое разрушение наблюдалось при жесткостях 12 и 8,5 МН/м. Линейно-упругое поведение материала при нагружении вплоть до разрушения позволяет характеризовать последнее как квазихрупкое. С понижением жесткости до 5,7 МН/м разрушение стали 03X20N16AG6 происходит путем адиабатического сдвига, т.е. в процессе скачка локализованной деформации. Это также служит причиной снижения относительного удлинения, так как появление следующих скачков с большим удлинением образца не реализуется. Возможность такого разрушения возникает, когда деформационное упрочнение существенно снижено и в системе имеется достаточно большой запас упругой энергии, которому

соответствует критическое значение жесткости при данном уровне критического напряжения  $\sigma_k = \sigma_0$  – напряжения начала скачка. Условие разрушения сформулировано в виде [11]

$$\sigma_0 = \Theta + K - \Delta T k_T / e_p,$$

где  $e_p$  – истинная деформация, соответствующая пределу прочности.

Оценка показывает, что для образцов стали 03Х20Н16АГ6 критическое значение жесткости составляет  $\sim 7,5$  МН/м. Разрушение образцов стали 12Х18Н10Т и титанового сплава 3М адиабатическим сдвигом наблюдается уже при  $C = 12$  МН/м.

Возможность разрушения после завершения скачка в результате продолжения локализации деформации лишь за счет запаса упругой энергии (неподгружаемая система, статическое нагружение) рассмотрена ранее [13]. Установлено, что условие такого разрушения  $\sigma_c \geq \Theta + K$ , где  $\sigma_c$  – напряжение, соответствующее окончанию скачка, не достигается, так как при достаточно низком уровне жесткости разрушение всегда наступает еще в процессе скачка деформации.

Таким образом, влияние пониженной жесткости системы нагружения, реализуемое непосредственно в процессе скачка, накапливается с каждым последующим актом ПТ и выражается как в изменении стандартных механических характеристик, так и в возможности более раннего разрушения адиабатическим сдвигом.

Отметим, что жесткость различных машин для механических испытаний образцов материалов на растяжение (как и жесткость реальных конструкций) может отличаться на порядок и более, поскольку используются машины различной мощности\*.

Для испытаний материалов при криогенных температурах создаются специальные машины или переоборудуются стандартные [15]. Низкая величина скрытой теплоты парообразования жидкого гелия, используемого для испытаний при температурах до 4,2 К и ниже, сильно затрудняет процесс охлаждения массивных деталей и образцов. Поэтому, как правило, используются микромашины, машины с реверсивным типом нагружения, оборудованные многопозиционными захватами, кассетными и иными устройствами для перезарядки образцов внутри криостатов. Эти конструктивные особенности существенно влияют на жесткость нагружающих устройств. При этом регламентация по параметру жесткости нагружающего устройства в действующем стандарте на метод испытания металлов на растяжение при криогенных температурах [16] отсутствует, что является одной из причин необходимости его усовершенствования [17].

Проанализируем жесткостные характеристики установки УМН-10, выполненной на базе машины типа ZD-10 с электрогидравлическим приводом и предельной нагрузкой 100 кН. Жесткость системы силонагружения разрывной испытательной машины определяется такими составляющими, как жесткость силовой рамы  $C_p$ , жесткость тяговых частей  $C_T$ , жесткость со-

\* Диапазон наибольших предельных нагрузок разрывных машин составляет 0,5...1000 кН [14].

единительных элементов (захваты, резьбы, винтовые пары)  $C_3$ , а машин с электрогидравлическим приводом – также жесткостью так называемой гидравлической пружины, или продольной жесткостью рабочей жидкости  $C_r$ . В минеральном масле, которое служит рабочей жидкостью, содержится от 3 до 5% нерастворенного воздуха, что существенно снижает ее объемный модуль упругости  $K_c$ . Для масляно-воздушной смеси при давлении порядка 1 МПа он составляет примерно  $0,6K_m$ , где  $K_m = 1,5 \cdot 10^3$  МПа – объемный модуль упругости масла [18]. Жесткость гидравлической пружины представим в виде

$$C_r = pF_{\Pi} / \Delta l_{\Pi},$$

где  $p$  – давление;  $F_{\Pi}$  – площадь поршня гидроцилиндра;  $\Delta l_{\Pi} = pV / K_c F_{\Pi}$  – перемещение штока поршня вследствие сжатия жидкости в объеме  $V$  гидроцилиндра. Из этих соотношений следует, что  $C_r$  не зависит от давления, а при максимальном ходе поршня, когда величина  $V$  наибольшая,  $C_r = 98$  МН/м.

Расчеты показали, что величины жесткостей  $C_p, C_r, C_0$ , где  $C_0$  – жесткость образца, составляют соответственно 140, 52, 49 МН/м. Жесткость нагружающего устройства установки, рассчитанная по формуле  $C_m^{-1} = C_p^{-1} + C_r^{-1} + C_t^{-1}$ , равна 27 МН/м, а ее снижение за счет податливости рабочей жидкости  $C_r^{-1}$  достигает 28%. Столь значительное снижение типично для подобных машин. Так, для рассмотренных в работе [6] машин с одинаковой предельной нагрузкой 200 кН, одна из которых имеет электро-механический, а две другие – электрогидравлический привод, жесткости составляют соответственно 91, 57 и 48 МН/м. В некоторых случаях в таких машинах используются специальные компенсаторы жесткости.

Проведенный анализ показывает, что основной вклад в уменьшение общей жесткости системы образец–машина вносят собственно образец, тяговые элементы (длинные и относительно тонкие ввиду необходимости обеспечения реверсивной схемы нагружения, возможности перезарядки образцов и снижения теплопритоков в гелиевый криостат [8]), гидросистема, а также захваты, резьбовые соединения и винтовые пары, податливость которых не учитывалась.

**Заключение.** Установлено, что снижение жесткости системы нагружения до критического значения приводит к разрушению образца в процессе скачка деформации по механизму адиабатического сдвига.

Отсутствие регламентации по параметру жесткости испытательных машин требует усовершенствования существующей нормативной базы испытаний материалов в условиях глубокого охлаждения.

## Резюме

Наведено результати дослідження впливу жорсткості системи навантажування на параметри низькотемпературної переривчастої течії та механічні характеристики сталей 03X20H16AG6, 12X18H10T і титанового сплаву 3М

за температуры 4,2 К на різних стадіях розвитку процесу нестабільності пластичної деформації. Розглянуто критерії руйнування за механізмом адіабатичного зсуву. Проаналізовано складові жорсткості випробувальної машини з електрогідравлічним приводом. Показана необхідність регламентування стандартних механічних випробувань матеріалів за параметром жорсткості.

1. *Wigley D. A.* Mechanical Properties of Materials at Low Temperatures. – New York – London: Plenum Press, 1971. – 340 p.
2. *Стрижало В. А., Воробьев Е. В.* Низкотемпературная прерывистая текучесть конструкционных сплавов // Пробл. прочности. – 1993. – № 8. – С. 37 – 46.
3. *Воробьев Е. В., Стрижало В. А.* Развитие низкотемпературной скачкообразной деформации металлов и возможности ее устранения // Там же. – 1999. – № 1. – С. 41 – 53.
4. *Клявин О. В.* Физика пластичности кристаллов при гелиевых температурах. – М.: Наука, 1987. – 255 с.
5. *Старцев В. И., Ильичев В. Я., Пустовалов В. В.* Пластичность и прочность металлов при низких температурах. – М.: Металлургия, 1975. – 328 с.
6. *Зилова Т. К., Новосильцева Н. И., Фридман Я. Б.* Методы испытания с переменным запасом упругой энергии и его влияние на механические свойства // Завод. лаб. – 1969. – № 10. – С. 1229 – 1236.
7. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г.* Установка для испытания материалов с построением полностью равновесных диаграмм деформирования // Пробл. прочности. – 1981. – № 12. – С. 104 – 106.
8. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. – Киев: Наук. думка, 1990. – 180 с.
9. *Стрижало В. А., Воробьев Е. В.* Моделирование низкотемпературной прерывистой текучести методом импульсного подгружения // Пробл. прочности. – 1977. – № 3. – С. 83 – 89.
10. *Basinski Z. S.* The instability of plastic flow of metals at very low temperatures // Proc. Roy. Soc. – 1957. – A240. – P. 229 – 242.
11. *Стрижало В. А., Воробьев Е. В.* Низкотемпературная прерывистая текучесть упрочняющихся материалов // Пробл. прочности. – 1994. – № 10. – С. 3 – 8.
12. *Воробьев Е. В., Стрижало В. А.* О нормировании прочности металлов в условиях низкотемпературной нестабильности пластической деформации и воздействии сильных магнитных полей // Там же. – 1999. – № 5. – С. 42 – 52.
13. *Стрижало В. А., Воробьев Е. В., Новогрудский Л. С.* Влияние предварительного деформирования на прерывистую текучесть материалов при температуре 4,2 К // Там же. – 1995. – № 8. – С. 12 – 20.

14. *ГОСТ 28840-90*. Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования. – Введ. 01. 01. 93.
15. *Новиков Н. В., Лебедев А. А., Ковальчук Б. И.* Механические испытания конструкционных материалов при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1974. – 192 с.
16. *ГОСТ 22706-77*. Металлы. Метод испытания на растяжение при температурах от минус 100 до минус 269°С. – Введ. 01. 09. 88.
17. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* О разработке межгосударственного стандарта “Металлы. Метод испытания на растяжение при температурах от 293 до 4,2 К” // IV науч.-техн. семинар “Актуальные проблемы механики, прочности и теплопроводности при низких температурах”: Тез. докл. – СПб.: Международная академия холода, 1998. – С. 10 – 11.
18. *Гамынин Н. С.* Гидравлический привод систем управления. – М.: Машиностроение, 1972. – 376 с.

Поступила 10. 02. 2000