

О влиянии податливости испытательной машины на сопротивление деформированию металлов при скачкообразном развитии их упругопластической деформации

Л. С. Новогрудский

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Рассмотрено влияние жесткости испытательной машины и режима нагружения на механические характеристики и сопротивление деформированию металлов при немономонном развитии их упругопластической деформации вследствие охлаждения до 4,2 К и (либо) действия импульсов электрического тока. Предложен подход, позволяющий приводить величину скачка нагрузки, обусловленного действием импульса электрического тока, при произвольном режиме нагружения к максимально возможной (при постоянной скорости деформирования и малом запасе упругой энергии нагружающего устройства) величине.

Как известно, амплитуда скачков нагрузки при неравномерном течении материала, вызванном его охлаждением ниже критического уровня либо высокоэнергетическими воздействиями (импульсы электрического тока или магнитного поля), существенно зависит от ряда факторов [1–3].

Особое внимание следует обратить на жесткость испытательного оборудования, которая при скачкообразном развитии пластического течения может оказать решающее влияние как на кинетику пластического течения, так и на величину механических характеристик. Весьма основательно влияние запаса упругой энергии на кинетику деформирования конструкционных сплавов рассмотрено в работе [4], а в условиях неравномерного течения материала – в [5].

В общем случае для неподгружаемой системы кинетика процесса нагружения зависит от соотношения между запасом упругой энергии системы образец–машина и необратимым энергопоглощением материала при его пластической деформации и разрушении [6], а также массовых сил, влияние которых в данной работе не рассматривается. Изменение напряженного состояния, понижение температуры испытаний влияют на способность материала необратимо поглощать энергию вследствие изменения его пластичности либо прочностных свойств. При этом запас упругой энергии в системе может не изменяться или изменяться гораздо меньше, чем способность материала к ее поглощению. Происходит значительный рост скоростей деформации и разрушения. Особенно критичен такой процесс на участках разупрочнения, когда имеет место резкое снижение сопротивления деформированию материала, а деформации и разрушение могут развиваться уже без дополнительных затрат энергии извне. Такая картина имеет место, например, для сплава 19 при постоянной нагрузке и действии импульсов электрического тока (ИЭТ) при температуре 4,2 К [2]. На примере предварительно деформированной при температуре 77 К стали 03X13AG19 можем наблюдать, как при фактически одинаковом запасе упругой энергии системы с понижением способности материала необратимо поглощать энергию изменяются механические характеристики этой стали при скачкообразном развитии деформации в условиях температуры жидкого гелия [7]. В испы-

тательных машинах гидравлического типа возможно увеличение запаса упругой энергии системы при изменении режима нагружения. Так, при использовании машины гидравлического типа ZD-10 при переходе от ручного режима управления скоростью нагружения к режиму автоматического поддержания постоянства скорости нагружения отмечается увеличение запаса упругой энергии, что вызывает не только изменение кинетики деформирования в условиях прерывистого течения либо воздействия ИЭТ, но и механических свойств материалов. Повышение запаса упругой энергии системы при переходе к автоматическому режиму регулирования связано со следующим обстоятельством. Поддержание постоянства скорости нагружения обеспечивается за счет постоянного увеличения давления в рабочем цилиндре, т.е. запаса упругой энергии рабочего тела (масла)*. При этом если в пределах упругого деформирования образца это давление возрастает с постоянной, априори устанавливаемой скоростью, которая может быть равной скорости увеличения давления масла в цилиндре при ручном режиме нагружения, то при переходе в область упругопластических деформаций скорость подачи масла в рабочий цилиндр становится неконтролируемой, возрастая тем в большей мере, чем в большей мере снижается сопротивление деформированию материала образца. Поэтому и кинетика деформирования, и механические характеристики конструкционных сплавов при немономонном развитии упругопластической деформации, наблюдаемые в таких режимах, – различны. Это проиллюстрировано на примере сталей 03X19AG3N10 и 03X20H16AG6 при температурах соответственно 4,2 и 77 К и воздействии ИЭТ (таблица).

Как следует из данных таблицы, с увеличением запаса упругой энергии системы при немономонном развитии пластической деформации, вызванном либо понижением температуры испытаний до 4,2 К, либо действием ИЭТ, происходит уменьшение величины временного сопротивления, снижение деформационной способности и усиление локализации деформации, что связано с неравномерностью развития деформации по рабочей части образца. Изменение кинетики деформирования в условиях прерывистой текучести проявляется как уменьшение числа и амплитуды скачков нагрузки. При действии ИЭТ амплитуда скачков нагрузки также уменьшается. За время до разрушения удается реализовать значительно меньшее число актов воздействия. В условиях постоянной жесткости испытательной системы величины характеристик прочности и пластичности не зависят от режима приложения нагрузки. Проведенные нами с помощью жесткой ($2,5 \cdot 10^5$ Н/мм) испытательной машины “Инстрон” исследования [3] влияния режима нагружения на кинетику сопротивления деформированию алюминиевого сплава АМг6 позволили установить следующее.

* Объемный модуль материала $K = \frac{E}{3(1-2\mu)}$ – величина, обратная сжимаемости $1/K$. Для

стали $\frac{1}{K} = \frac{3(1-2\mu)}{E} \cong \frac{3(1-2 \cdot 0,27)}{2,1 \cdot 10^6} \cong 0,65 \cdot 10^{-6}$ атм⁻¹. Сжимаемость масла в интервале дав-

лений 1...10 атм равна $63,3 \cdot 10^{-6}$ атм⁻¹ [8]. Таким образом, податливость масла примерно в 10^2 раз больше, чем у стали, и при снижении сопротивления деформированию последней запасенная упругая энергия масла значительно будет влиять на ее кинетику деформирования и даже может привести к преждевременному разрушению образца.

При переходе от режима с контролируемой скоростью деформирования (I) к режиму с контролируемой скоростью нагружения (II) механические характеристики сплава не изменяются. Число скачков нагрузки уменьшается от 96 (I) до 26 (II), а максимальное значение их амплитуды – от 27 до 13 МПа. Сравнивая эти результаты со значениями характеристик сплава АМг6, полученными в режиме автоматического регулирования нагрузки на машине ZD-10, видим, что с увеличением податливости машины их значения существенно изменяются: наблюдается снижение временного сопротивления, относительного удлинения после разрыва и значительная локализация деформации. Существенным является тот факт, что из рассматриваемых характеристик единственной, не зависящей от режима нагружения и жесткости испытательной машины, является условный предел текучести (см. таблицу и [3]). В силу того обстоятельства, что величина временного сопротивления сталей, алюминиевых и титановых сплавов при температуре 4,2 К существенно зависит от кинетики процесса упруго-пластического деформирования, которая, в свою очередь, определяется рядом факторов и практически не поддается достоверному описанию с позиций единого подхода, то при таких температурных условиях наиболее объективной из прочностных характеристик является предел текучести (условный либо физический). Очевидно, что предел текучести и необходимо использовать как опасное напряжение, выбирая допускаемые напряжения при расчетах на прочность конструктивных элементов, работающих при температурах менее 20 К и изготавливаемых из холодопластичных материалов.

Механические характеристики сталей, полученные в режимах автоматического и ручного регулирования на установке УТН-10

Материал	T, К	Режим	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	n*
03X19AG3H10	4,2	Ручной	1844	1065	49,0	46,0	24
		Автоматический	1333	1042	42,0	72,0	14
03X20H16AG6	77	Ручной	1520	975	49,5	53,0	–
		Автоматический	1520	980	42,5	52,0	–
		Ручной + ИЭТ	1510	790	48,5	55,0	(12)
		Автоматический + ИЭТ	1315	790	28,0	63,5	(6)

* В скобках приведено число актов воздействия ИЭТ.

Как показано ранее [9], получаемая экспериментально величина скачка нагрузки ΔP (нагружения $\Delta\sigma$), вызванного действием ИЭТ, является фактически мерой электропластического действия электрического тока. С помощью $\Delta\sigma$ определяется значение опасного при действии ИЭТ напряжения σ^0 . В то же время величина $\Delta\sigma$ существенно зависит от режима нагружения. Поэтому регистрируемые в процессе испытаний величины ΔP необходимо привести к значениям, соответствующим определенному виду нагружения, а именно к такому, при котором эти значения максимальны (т.е. при котором величина скачка нагрузки выявляется полностью). Для этого воспользуемся подходом, аналогичным изложенному в работе [10], и рассмотрим два

крайних случаях: а) приложение постоянной нагрузки (при этом время ее восстановления намного меньше времени действия ИЭТ); б) фиксированное перемещение одного из концов образца при жестком закреплении другого (при этом время действия импульсов электрического тока намного меньше времени, необходимого для перемещения активного захвата на величину удлинения, вызванного ИЭТ).

В первом случае предположим, что при воздействии импульса электрического тока определенных параметров при напряжении σ_i за время действия импульса образец получил дополнительную деформацию $\Delta\varepsilon_i$ (рис. 1,а). Тогда приращение энергии при действии постоянной нагрузки соответствует площади четырехугольника $ABCD$ и равно $\sigma_i\Delta\varepsilon_i$. Это приращение механической работы равно удельной энергии ИЭТ, ответственной за увеличение деформации на $\Delta\varepsilon$ [9]:

$$\sigma_i\Delta\varepsilon_i = \frac{\lambda}{2V} I^2 R\tau, \quad (1)$$

где V – объем рабочей части образца; λ – коэффициент, определяющий часть удельной энергии ИЭТ, ответственной за электропластическое действие импульса; R – электросопротивление материала; I, τ – амплитуда и длительность импульса.

Во втором случае примем, что воздействие ИЭТ (параметры те же) при напряжении σ_i в условиях постоянного перемещения (рис. 1,б) вызовет некоторый прирост деформации $\Delta\varepsilon'_i$, т.е. в момент увеличения деформации внешняя сила не производит работу, а наоборот, ее величина уменьшается (действующие напряжения уменьшаются на $\Delta\sigma_i$). Изменение запасенной в образце энергии, вызванное действием ИЭТ, соответствует площади четырехугольника $A'B'C'D'$ и составит $\frac{\Delta\sigma_i}{2E}(2\sigma_i - \Delta\sigma_i)$. Это изменение энергии также равно удельной энергии ИЭТ, ответственной за электропластическую деформацию:

$$\frac{\Delta\sigma_i}{2E}(2\sigma_i - \Delta\sigma_i) = \frac{\lambda}{2V} I^2 R\tau. \quad (2)$$

Приравняв левые части выражений (1) и (2), решим полученное уравнение относительно $\Delta\sigma_i$:

$$\sigma_i\Delta\varepsilon_i = \frac{1}{2E}(2\sigma_i\Delta\sigma_i - \Delta\sigma_i^2)$$

или

$$\Delta\sigma_i^2 - 2\sigma_i\Delta\sigma_i + 2E\sigma_i\Delta\varepsilon_i = 0. \quad (3)$$

Решение этого квадратного уравнения представим в виде

$$\Delta\sigma_{i,2} = \sigma_i \pm \sqrt{\sigma_i^2 - 2E\sigma_i\Delta\varepsilon_i}.$$

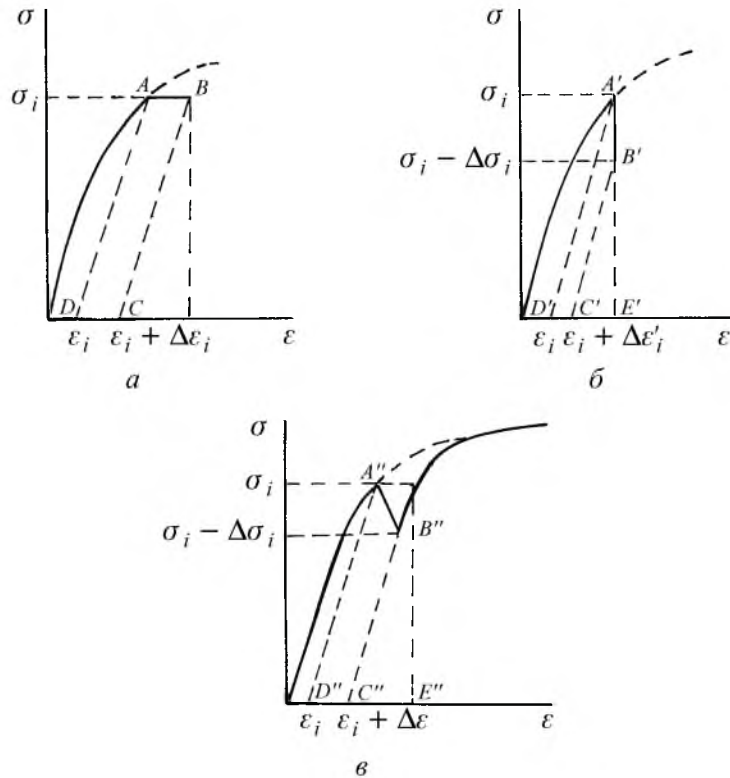


Рис. 1. Диаграммы деформирования металлов при воздействии ИЭТ в условиях постоянной нагрузки (а), постоянного перемещения (б) и смешанного нагружения (в).

Поскольку величина скачка напряжения не может превышать значения текущего напряжения, то решение уравнения (3) может быть единственным:

$$\Delta\sigma_i = \sigma_i - \sqrt{\sigma_i^2 - 2E\sigma_i\Delta\epsilon_i}. \quad (4)$$

Рассмотрим промежуточный случай нагружения (рис. 1, в), наиболее часто реализуемый в практике исследований влияния ИЭТ на сопротивление деформированию металлов, что связано как со сложностью выполнения крайних случаев а) и б), так и с условиями проведения испытаний на машинах с гидравлическим приводом.

Рассуждая аналогичным образом, получаем, что энергия ИЭТ эквивалентна механической работе, определяемой площадью четырехугольника $A''B''C''D''$ и равной

$$\sigma_i\Delta\epsilon - \frac{\Delta\sigma\Delta\epsilon}{2} = \frac{\lambda}{2V} I^2 R\tau, \quad (5)$$

где $\Delta\sigma$ и $\Delta\epsilon$ – амплитуды скачков напряжения и деформации при воздействии ИЭТ и промежуточном режиме нагружения. Приравняем левые части выражений (2) и (5) и решим полученное уравнение относительно $\Delta\sigma_i$:

$$\sigma_i \Delta \varepsilon - \frac{\Delta \sigma \Delta \varepsilon}{2} = \frac{2 \Delta \sigma_i \sigma_i}{2E} - \frac{\Delta \sigma_i^2}{2E};$$

$$\Delta \sigma_i^2 - 2 \Delta \sigma_i \sigma_i + (2E \Delta \varepsilon \sigma_i - E \Delta \sigma \Delta \varepsilon) = 0;$$

$$\Delta \sigma_{i,2} = \sigma_i \pm \sqrt{\sigma_i^2 - E \Delta \varepsilon (2 \sigma_i - \Delta \sigma)};$$

$$\Delta \sigma_i = \sigma_i - \sqrt{\sigma_i^2 - E \Delta \varepsilon (2 \sigma_i - \Delta \sigma)}. \quad (6)$$

Предложенный, можно сказать, геометрический подход позволяет учесть не только влияние режима нагружения, но и вклад в величину скачка нагрузки “жесткости” испытательного устройства, ибо при этом не имеет значения причина, вызывающая изменение скачка.

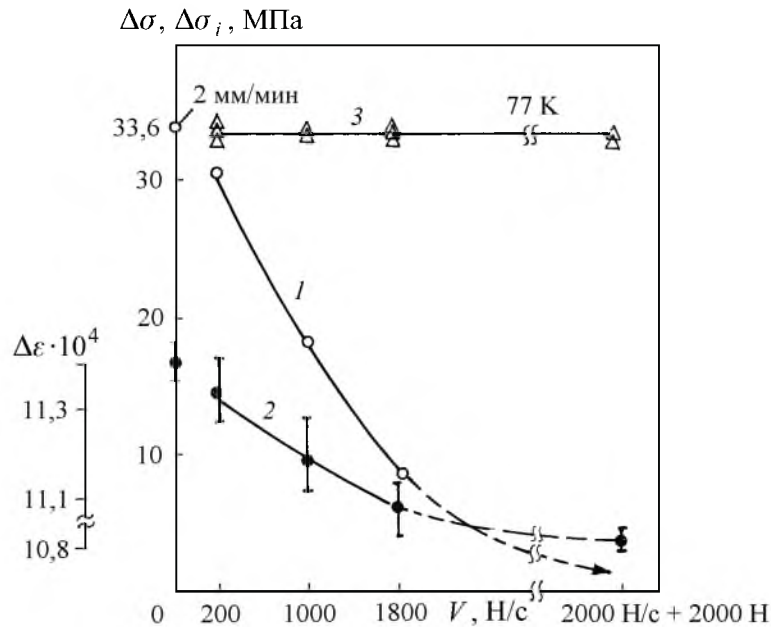


Рис. 2. Влияние режима нагружения на изменение сопротивления деформированию стали 03X13AG19 при воздействии ИЭТ: 1 – $\Delta \sigma$; 2 – $\Delta \varepsilon$; 3 – $\Delta \sigma_i$.

Экспериментальную проверку такого подхода проводили на образцах из стали 03X13AG19, нагружаемых с различной скоростью при температуре жидкого азота, воздействуя одним импульсом тока на уровне условного предела текучести. При этом регистрировали изменения нагрузки и перемещения. Результаты этих измерений, пересчитанные в величины напряжений и деформаций, представлены на рис. 2. Крайнее правое значение $\Delta \sigma \rightarrow 0$ получено при совместном действии нагружающей системы машины и подвешенного к образцу груза весом 2000 Н. Пересчет величины $\Delta \sigma_i$ при этом был выполнен по формуле (4). По оси ординат отложены значения

напряжения и деформации, полученные при испытании образцов на механической машине со скоростью деформирования 2 мм/мин. Эти значения фактически должны соответствовать условиям нагружения для второго случая, а величина $\Delta\sigma$ – максимально возможной при данных параметрах ИЭТ. В связи с тем, что приращение удлинения в таких условиях было весьма незначительным и практически равнялось чувствительности измерительной скобы, измеряемые значения удлинения имели большой разброс. С использованием полученных экспериментальных данных $\Delta\sigma$ и $\Delta\varepsilon$ для трех значений скорости нагружения (200, 1000 и 1800 Н/с) по выражению (6) для крайних значений интервалов $\Delta\varepsilon$ установили, что максимальное отклонение от экспериментально определенной величины $\Delta\sigma_i = 33,6$ МПа имело место при $V = 1800$ Н/с для верхнего значения $\Delta\varepsilon = 11,2 \cdot 10^{-5}$ и составляло 0,8 МПа или 2,5%. В случае совместного действия нагрузки и груза величина $\Delta\sigma_i$ составляла 32,2...33,0 МПа.

Изложенное выше свидетельствует о существенном влиянии условий нагружения и жесткости испытательной машины на значения механических характеристик технических сплавов, а также на характер и величину изменения сопротивления деформированию металлов при их немонотонном течении, вызванном как охлаждением до температуры ниже критической, так и действием ИЭТ. В то же время предлагаемый подход позволяет приводить полученные при различных условиях нагружения величины скачков нагрузки (напряжения) к значению, характерному для деформирования с постоянной (весьма малой) скоростью.

Резюме

Розглянуто вплив жорсткості дослідницької машини і режиму навантажування на механічні характеристики й опір деформуванню металів при немонотонному розвитку їх пружнопластичної деформації внаслідок охолодження до 4,2 К і (або) дії імпульсів електричного струму. Запропоновано підхід, який дозволяє привести величину стрибка навантаження, зумовленого дією імпульсу електричного струму, при довільному режимі навантажування до максимально можливої (при постійній швидкості деформування і малому запасі пружної енергії навантажуючого пристрою) величини.

1. Старцев В. И., Ильичев В. Я., Пустовалов В. В. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. – М.: Металлургия, 1975. – 328 с.
2. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. Прочность материалов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. – Киев: Наук. думка, 1990. – 156 с.
3. Стрижало В. А., Филин Н. В., Куранов Б. А. и др. Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах. – Киев: Наук. думка, 1988. – 342 с.

4. Фридман Я. Б., Зилова Т. К., Дроздовский Б. А. Кинетика деформирования и разрушения. – М.: ВНИИАМ, 1960. – 103 с.
5. Стрижало В. А., Воробьев Е. В. Моделирование низкотемпературной прерывистой текучести методом импульсного нагружения // Пробл. прочности. – 1997. – № 3. – С. 83 – 89.
6. Лебедев А. А., Ламашевский В. П., Алфимов П. Т. Исследование влияния жесткости испытательных машин на закономерности деформирования и разрушения структурно неоднородных материалов // Там же. – 1982. – № 7. – С. 64 – 67.
7. Новогрудский Л. С. Прочность предварительно деформированных сталей при воздействии импульсов электрического тока в условиях криогенных температур // Прочность материалов и конструкций при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1990. – С. 167 – 172.
8. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по физике. – М.: Наука, 1974. – 256 с.
9. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С. Определение энергии электропластической деформации // Пробл. прочности. – 1997. – № 4. – С. 38 – 43.
10. Екобори Т. Научные основы прочности и разрушения материалов. – Киев: Наук. думка, 1978. – 352 с.

Поступила 31. 12. 99