

Деформационное и низкотемпературное упрочнение аустенитных сталей при температурах до 4,2 К

Е. В. Воробьев

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Рассмотрены результаты экспериментального исследования комплексного влияния различных видов предварительной деформации и глубокого охлаждения, а также скорости деформирования на механические характеристики сплавов криогенной техники. Показана возможность значительного увеличения прочностных характеристик некоторых материалов за счет деформационного и низкотемпературного упрочнения при сохранении достаточно высокого уровня пластичности. Изменение механизма деформирования металлов при температуре 4,2 К, связанное с явлением прерывистой текучести, вызывает аномалию эффекта Баушингера.

Ключевые слова: предварительная деформация, упрочнение, механические характеристики, скорость деформирования, скачок деформации, прерывистая текучесть, эффект Баушингера.

Проблема максимального использования прочностных резервов конструкционных материалов особенно актуальна при создании объектов криогенного назначения, поскольку необходимо минимизировать потребление дорогостоящих хладагентов при захолаживании и эксплуатации, повысить электромагнитное использование сверхпроводящих магнитных систем в соответствующих устройствах, уменьшить массу конструкций в авиационной и ракетной технике.

Среди известных механизмов упрочнения металлических материалов следует выделить деформационное и низкотемпературное упрочнение [1–5].

В настоящем сообщении кратко освещены некоторые особенности упрочнения конструкционных сплавов криогенного назначения, подвергнутых различным видам предварительной деформации при охлаждении до 4,2 К.

Материал и методики. Объектом экспериментального исследования служили аустенитные стали 03X20N16AG6, 03X13AG19, 12X18N10T и титановый α -сплав 3М. Для испытаний использовали стандартные пятикратные образцы с диаметром рабочей части 3 мм. На одноосное растяжение образцы испытывали на установке УМН-10 [6] при температуре 293, 77 и 4,2 К соответственно на воздухе, в среде жидкого азота и жидкого гелия. Жесткость системы образец–машина составляла 12 МН/м, а номинальная скорость деформирования – $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Образцы предварительно деформировали при температуре 293 К путем растяжения, кручения, сжатия, а также подвергали поверхностному наклепу. Деформирование образцов сталей растяжением проводили до появления остаточной деформации 5, 10 и 20%, образцов титанового сплава ввиду относительно малой деформативности – до 5 и 10%. Предварительная деформация кручением составляла 90 рад/м, сжатием – 2...3%. В последнем случае во избежание потери устойчивости образцов использовали специальную обойму.

Результаты и их обсуждение. Эксперименты показали, что предварительное деформирование исследуемых материалов в сочетании с охлаждением до температуры 4,2 К позволяет получить весьма значительную величину упрочнения, которая по условному пределу текучести в зависимости от вида обработки и материала достигает 3,4...3,7 (рис. 1,а). На рис. 1 пределы текучести предварительно деформированных образцов стали 03Х20Н16АГ6 при данной температуре (со штрихом) отнормированы по величине предела текучести материала в исходном состоянии при температуре 293 К, а зависимость 4 приведена для предварительной деформации растяжением $\varepsilon_{II} = 0,1$. Остальные исследуемые металлы имеют меньшие показатели упрочнения – максимальные величины отношения $\sigma_{0,2}^T / \sigma_{0,2}^{293}$ при $T = 4,2$ К получены в результате предварительного растяжения (таблица).

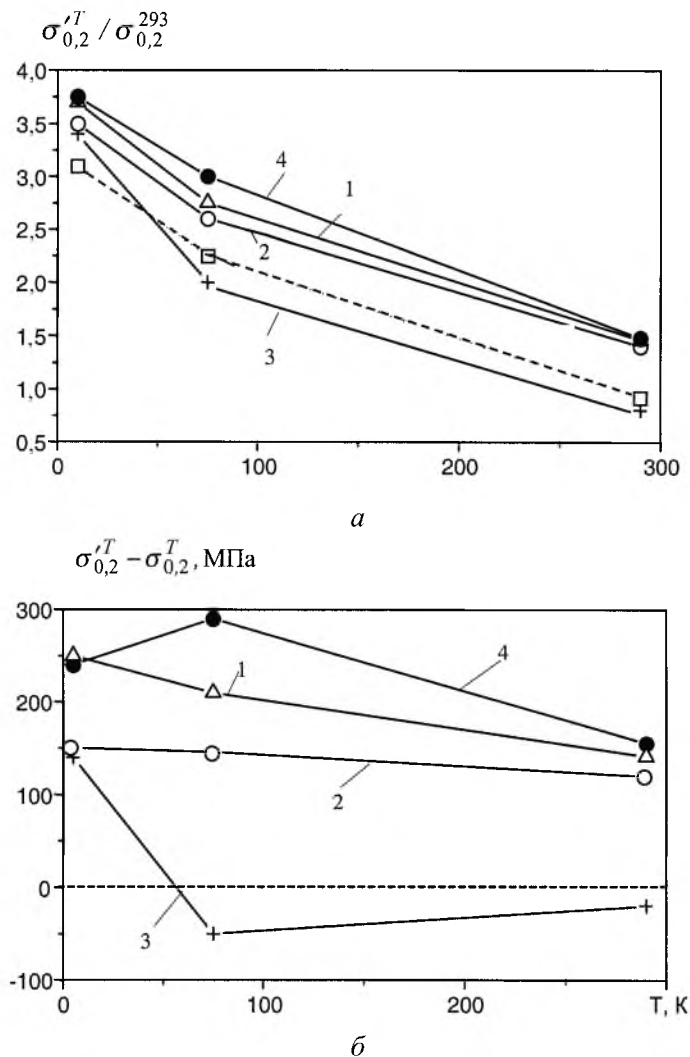


Рис. 1. Температурная зависимость изменения пределов текучести исходных (штриховые линии) образцов стали 03Х20Н16АГ6, подвергнутых кручению (1), поверхностному наклепу (2), предварительной деформации путем сжатия (3) и растяжения (4) в относительном (а) и абсолютном (б) выражении.

Относительное увеличение условных пределов текучести ($\sigma'_{0,2}{}^{4,2} / \sigma_{0,2}{}^{293}$) материалов в результате предварительной деформации и охлаждения до 4,2 К

Наличие и вид предварительной деформации	Сталь 03X13AG19			Сталь 12X18H10T			Сплав 3М		
	при T, К								
	293	77	4,2	293	77	4,2	293	77	4,2
Кручение	1,56	2,62	3,08	1,05	1,24	1,56	1,03	1,56	1,82
Поверхностный наклеп	1,28	2,26	2,70	1,00	1,15	1,44	1,01	1,51	1,80
Сжатие	0,77	1,40	2,41	0,87	0,92	1,16	0,95	1,27	1,75
Растяжение	1,64	2,50	3,21	1,21	1,49	1,60	1,18	1,73	2,04
Исходное состояние	1,00	1,89	2,20	1,00	1,15	1,29	1,00	1,51	1,68

При охлаждении до 4,2 К деформационное упрочнение материалов в оценке ($\sigma'_{0,2}{}^T - \sigma_{0,2}{}^T$) увеличивается, и только для стали 03X20H16AG6 после предварительного деформирования растяжением отмечается некоторое снижение упрочнения по сравнению с данными, полученными при $T = 77$ К (рис. 1,б). Максимальная величина упрочнения в соответствии с этой оценкой получена для образцов стали 03X13AG19, подвергнутых предварительному деформированию растяжением – для $\epsilon_{п} = 0,1$ она составляет 420 МПа. Как показывает сравнительная зависимость упрочнения материалов при температуре 4,2 К от степени предварительного растяжения (рис. 2), именно эта сталь при остаточной деформации до 0,1 упрочняется наиболее интенсивно. В отличие от других материалов интенсивность упрочнения стали 12X18H10T возрастает с увеличением степени наклепа, что, очевидно, связано с повышением объемной доли мартенсита деформации. Наибольшая температурно-зависимая часть упрочнения в оценке $\sigma'_{0,2}{}^{4,2} / \sigma_{0,2}{}^{293}$ (численные значения могут быть получены из таблицы и рис. 1,а) достигается после предварительной деформации сжатием для всех материалов, кроме стали 12X18H10T.

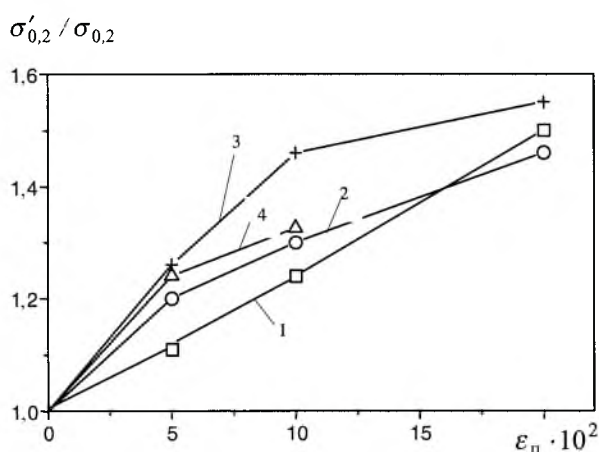


Рис. 2. Зависимость упрочнения по пределу текучести от величины предварительной деформации растяжения образцов сталей 12X18H10T (1), 03X20H16AG6 (2), 03X13AG19 (3) и титанового сплава 3М (4).

По сравнению с другими видами механической обработки характер упрочнения предварительно сжатых образцов исследованных материалов несколько отличается (рис. 1,б) в связи с проявлением эффекта Баушингера. Наибольшее снижение пределов текучести отмечается при температуре 77 К: например, для стали 12Х18Н10Т оно превышает 300 МПа; немонотонность зависимости σ на рис. 1,б характерна для всех материалов. Однако при этом у всех материалов, кроме стали 12Х18Н10Т, разность $(\sigma'_{0,2}^T - \sigma_{0,2}^T)$ при $T = 4,2$ К становится положительной, т.е. при этой температуре эффект Баушингера не реализуется (является аномальным). Наблюдаемое увеличение сопротивления начальному пластическому деформированию можно объяснить изменением механизма накопления деформации – от гомогенного скольжения к дискретному (скачкообразному) – в результате проявления эффекта низкотемпературной прерывистой текучести.

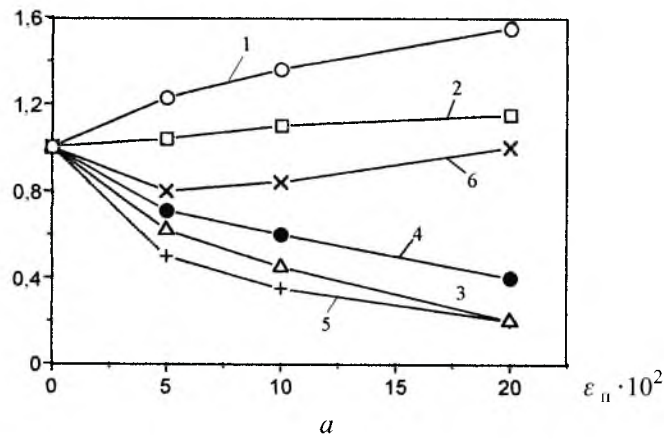
Кроме пределов текучести при предварительной обработке образцов изменяются также другие стандартные механические характеристики. Изменение пределов прочности σ_B вызывает лишь предварительное растяжение. Зависимости механических характеристик и параметров прерывистой текучести при $T = 4,2$ К от степени предварительной деформации растяжением образцов стали 03Х13АГ19 представлены на рис. 3,а. Для других материалов подобные зависимости приведены ранее [7, 8]. Так, при $\varepsilon_{II} = 0,1$ предел прочности σ_B стали 03Х20Н16АГ6 увеличивается на 14%, стали 03Х13АГ19 – на 17% (после предварительного деформирования кручением σ_B последней также возрастает на 20%). У стали 12Х18Н10Т повышение предела прочности σ_B начинается при $\varepsilon_{II} > 0,1$, у сплава 3М изменения данной характеристики незначительны.

Наибольшее снижение пластичности металлов среди рассмотренных видов деформирующей обработки вызывает предварительное растяжение. Так, при $T = 4,2$ К относительное удлинение δ образцов титанового сплава, сталей 03Х13АГ19, 03Х20Н16АГ6 и 12Х18Н10Т при $\varepsilon_{II} = 0,1$ снижается в 1,80; 1,44; 1,20 и 1,06 раза соответственно. В связи с требованием к конструкционным материалам сохранения при эксплуатационной температуре достаточно высокого уровня пластичности следует отметить незначительное снижение деформационной способности сталей 03Х20Н16АГ6 и 12Х18Н10Т. У последней снижение δ начинается только при $\varepsilon_{II} \geq 0,1$. Известно, что при криогенных температурах аустенитная структура этой стали метастабильная, а мартенситное превращение способствует повышению низкотемпературной пластичности за счет подключения новых систем скольжения [2]. Снижение характеристики δ сопровождается уменьшением числа скачков деформации N у всех материалов, а их относительное количество N/δ может как увеличиваться (стали 03Х20Н16АГ6 и 12Х18Н10Т), так и незначительно уменьшаться (сталь 03Х13АГ19 и титановый сплав 3М) [8] – рис. 3,а.

Представляет интерес совместное влияние на прочность и деформативность сплавов предварительной деформации и условий нагружения, в частности скорости деформирования. При квазистатических скоростях деформирования такое влияние становится существенным лишь в условиях глубокого охлаждения при превышении критической величины скорости,

что приводит к качественному изменению характера деформирования – от скачкообразного к однородному вследствие нагрева образца на несколько десятков градусов [8].

$$\frac{\sigma'_{0,2}}{\sigma_{0,2}}, \frac{\sigma'_B}{\sigma_B}, \frac{\delta'}{\delta}, \frac{\psi'}{\psi}, \frac{N'}{N}, \frac{N'/N}{\delta'/\delta}$$



$$\frac{\sigma''_{0,2}}{\sigma'_{0,2}}, \frac{\sigma''_B}{\sigma'_B}$$

$$\frac{\delta''}{\delta'}, \frac{\psi''}{\psi'}, \frac{\delta''_{\Sigma}}{\delta'_{\Sigma}}$$

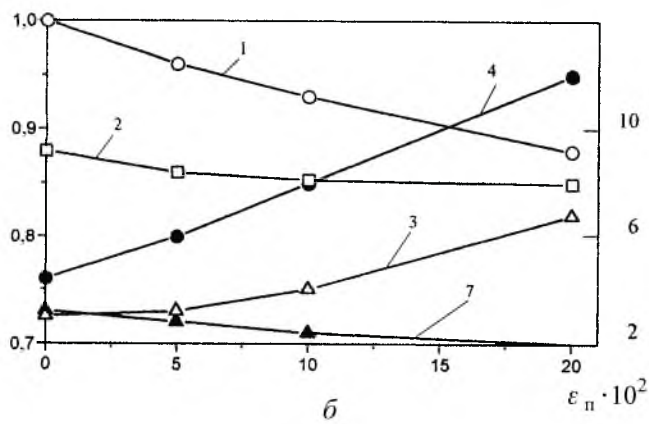


Рис. 3. Зависимость предела текучести (1), предела прочности (2), относительного удлинения (3), относительного сужения (4), числа скачков (5), удельного числа скачков (6) и суммарного относительного удлинения (7) от величины предварительной деформации образцов стали 03X13AG19 при температуре 4,2 К и скоростях деформирования $1,6 \cdot 10^{-3}$ (а) и $3 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ (б).

На рис. 3,б приведены результаты испытаний образцов стали 03X13AG19, продеформированных до появления различной остаточной деформации растяжения при сверхкритической скорости деформирования $\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, которой соответствуют обозначения характеристик с двумя штрихами. Условный предел текучести указанной стали, как и других материалов [7, 8], при переходе к повышенной скорости деформирования не изменя-

ется, предел прочности σ_B уменьшается, в то время как характеристики пластичности резко увеличиваются. По мере роста предварительной деформации предел прочности σ_B и суммарная деформация $\delta_\Sigma = \delta + \varepsilon_{II}$ незначительно снижаются, также уменьшается $\sigma_{0,2}$, что характерно для всех исследованных материалов, а δ и ψ увеличиваются в несколько раз.

Картина изменения пластичности трех других материалов существенно иная. Деформирование с вышеуказанной закритической скоростью при $\varepsilon_{II} = 0$ либо не оказывает влияния на относительное удлинение (сталь 12Х18Н10Т), либо приводит к его снижению в 1,6 (сталь 03Х20Н16АГ6) и 1,9 раза (сплав 3М). С увеличением предварительной деформации указанная характеристика также снижается по сравнению с таковой, полученной при $\dot{\varepsilon} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, в 1,1; 1,8 и 2,4 раза при $\varepsilon_{II} = 0,1$ соответственно для сталей 12Х18Н10Т, 03Х20Н16АГ6 и сплава 3М, причем для двух последних материалов происходит ускоренное разрушение образцов – как результат дальнейшей локализации деформации после ее скачкообразного прироста по окончании стадии упругого нагружения [7, 8]. Поскольку такой скачок деформации для стали 03Х13АГ19, отличающейся высокими значениями модуля упрочнения, отсутствует, деформационно-силовой критерий реализации прерывистой текучести не выполняется [9]. Повышение деформационной способности данной метастабильной стали при увеличении скорости деформирования можно объяснить более интенсивным мартенситным превращением с выделением ферромагнитной α -фазы в отсутствие прерывистой текучести, что подтверждается значительным увеличением магнитной восприимчивости разрушенных образцов.

Выводы

1. В условиях статического нагружения элементов конструкций криогенного назначения, подвергающихся максимальным эксплуатационным нагрузкам при фиксированной низкой температуре, деформационное упрочнение (с учетом его “направленности”) в сочетании с низкотемпературным может эффективно использоваться для повышения допускаемых напряжений для металлов с высокой деформационной способностью при сохранении нормативного запаса прочности. Из числа исследованных конструкционных материалов, обладающим большим ресурсом пластичности как в исходном состоянии, так и после различных видов предварительного деформирования, относятся стали 03Х20Н16АГ6 и 12Х18Н10Т.

2. При температуре ниже 20 К в условиях квазистатического нагружения с повышенными скоростями наличие предварительной деформации в ряде случаев приводит к резкому снижению сопротивления деформированию металлических материалов. Устойчивость к ускоренному разрушению в этом случае, независимо от степени наклепа, сохраняют метастабильные стали 03Х13АГ19 и 12Х18Н10Т.

3. Изменение механизма деформирования сплавов, связанное с низкотемпературной прерывистой текучестью, вызывает аномалию эффекта Баушингера, что проявляется в увеличении сопротивления начальным пластическим деформациям при приложении нагрузки противоположного знака.

Резюме

Розглянуто результати експериментального дослідження комплексного впливу різних видів попередньої деформації, а також швидкості деформування на механічні характеристики сплавів криогенної техніки. Показано можливість значного підвищення характеристик міцності деяких матеріалів за рахунок деформаційного та низькотемпературного зміцнення зі збереженням достатньо високого рівня пластичності. Зміна механізму деформування металів за температури 4,2 К, що пов'язана з явищем переривчастої текучості, приводить до аномалії ефекту Баушингера.

1. *Sipos K., Remy L., and Pineau A.* Influence of austenite predeformation of mechanical properties and strain-induced martensitic transformations of a high manganese steel // *Met. Trans.* – 1976. – А7. – P. 857 – 864.
2. *Лебедев А. А., Руденко В. Н., Ковальчук Б. И.* Влияние предварительной пластической деформации на механические свойства аустенитной стали при низких температурах // *Пробл. прочности.* – 1983. – № 8. – С. 34 – 37.
3. *Стрижало В. А., Медведь И. И.* Влияние предварительного пластического деформирования на малоцикловую усталость хромомарганцевой стали 03X13AG19 при температуре 4,2 К // Там же. – 1986. – № 5. – С. 62 – 67.
4. *Писаренко Г. С., Стрижало В. А.* О некоторых проблемах низкотемпературного упрочнения металлов и его учета в технике низких температур // *Прочность материалов и конструкций при низких температурах.* – Киев: Наук. думка, 1984. – С. 3 – 12.
5. *Воробьев Е. В.* Низкотемпературное упрочнение конструкционных сплавов в условиях воздействия сильных магнитных полей // *Пробл. прочности.* – 1990. – № 6. – С. 48 – 52.
6. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. – Киев: Наук. думка, 1990. – 180 с.
7. *Стрижало В. А., Воробьев Е. В., Новогрудский Л. С.* Влияние предварительного деформирования на прерывистую текучесть материалов при температуре 4,2 К // *Пробл. прочности.* – 1995. – № 8. – С. 12 – 20.
8. *Воробьев Е. В.* Влияние скорости деформирования на прочность и деформативность сплавов при температуре 4,2 // Там же. – 2000. – № 6. – С. 84 – 92.
9. *Стрижало В. А., Воробьев Е. В.* Низкотемпературная прерывистая текучесть упрочняющихся материалов // Там же. – 1994. – № 10. – С. 3 – 8.

Поступила 27. 11. 2000