

УДК 539.375

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ

А. М. Брагов, А. В. Кузнецов*, Г. Г. Савенков*,**,
Т. И. Сычева**, Е. В. Щукина**

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

* Машиностроительный завод "Армалит", 198097 Санкт-Петербург, Россия

** Концерн "МПО-Гидроприбор", 194044 Санкт-Петербург, Россия

E-mails: bragov@mech.unn.ru, avkuznecov77@mail.ru, sav-georgij@yandex.ru, sycheva.gidropribor@yandex.ru, l7516@yandex.ru

С использованием метода Кольского (метода разрезного стержня Гопкинсона) исследованы динамические свойства малоуглеродистой стали. Определено изменение свойств стали после 50 лет хранения, проведены металлографические исследования разрушенных образцов. Определена фрактальная размерность контуров излома. Показано, что в результате длительного хранения стали существенного изменения ее свойств не происходит.

Ключевые слова: малоуглеродистая сталь, длительное хранение, динамические испытания, разрезной стержень Гопкинсона, фрактальная размерность.

DOI: 10.15372/PMTF20210113

Введение. Известно, что в соответствии с различными отраслевыми стандартами (например, ОСТ1 90257-77) детали из углеродистых и малолегированных сталей с окончательно обработанными поверхностями должны подвергаться временной защите (консервации) от коррозии, вызывающей медленное разрушение металла. Консервация заключается в нанесении на поверхность изделий тех или иных средств защиты (масла, смазки, лака и т. п.). Очевидно, что наиболее опасным с точки зрения возможных изменений свойств металла является сверхдлительное (более 10 лет) хранение изделий. Если металл хранится в течение более 50 лет, то опасность его хрупкого разрушения возрастает. Прежде всего это обусловлено отсутствием возможности хранения металла в течение длительного времени в одних и тех же условиях, без колебаний температуры и влажности.

Если при эксплуатации после сверхдлительного хранения изделие испытывает динамические нагрузки, это может привести к переходу металла из вязкого состояния в хрупкое. Поэтому исследование динамических свойств металлов и сплавов после сверхдлительного хранения (более 50 лет) является важной задачей как материаловедения, так и механики разрушения.

Данная работа посвящена определению динамических характеристик (при скоростях деформации $\dot{\epsilon} \approx 10^3 \text{ с}^{-1}$) малоуглеродистой стали марки АК-25, хранившейся в течение 50 лет в условиях неоттапливаемого склада.



Рис. 1. Образец для испытаний на РСГ

Материал, образец и методики испытаний. Исследовалась малоуглеродистая сталь марки АК-25 с феррито-бейнитной структурой после хранения в течение 50 лет. Стандартные механические характеристики на растяжение (после хранения) данной стали имели следующие значения: временное сопротивление $\sigma_B = 660$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 595$ МПа, относительное удлинение рабочей части образца $\delta_5 = 18,5$ %, относительное сужение $\psi = 52,0$ %.

В настоящее время при изучении деформационных свойств и прочностных характеристик в диапазоне скоростей деформаций $\dot{\varepsilon} = 10^2 \div 10^4$ с⁻¹ обычно используются метод Кольского и его модификации, в частности метод разрезного стержня Гопкинсона.

В экспериментах применялась экспериментальная установка [1–3], которая включает пневматическое нагружающее устройство (пневматическую пушку калибром 20 мм) с системой управления, комплекс измерительно-регистрающей аппаратуры и сменные комплекты разрезных стержней Гопкинсона диаметром 20 мм. Испытываемый образец имел форму, представленную на рис. 1. Диаметр рабочей части образца равен 5 мм, длина — 10 мм, полная длина образца — 40 мм. При каждом выбранном значении скорости нагружения испытывалось по три образца, при этом скорость деформации задавалась с точностью до ± 5 %.

Для проведения металлографических исследований использовалось следующее оборудование: микротвердомер AFFRI DM8 (AFFRI, Италия) с нагрузкой при измерении микротвердости 0,5 Н, световой стереомикроскоп “Stereo Discovery.V12” (Carl Zeiss, Германия) и растровый электронный микроскоп “SEM-535” (Philips, Нидерланды).

Результаты экспериментов. Ниже приведены результаты экспериментов и выполнен их анализ.

Динамическое нагружение. На рис. 2,а приведены диаграммы нагружения образца в исходном состоянии, на рис. 2,б — после хранения. Средняя скорость деформации при испытаниях была практически одинаковой: $\dot{\varepsilon} = 930, 945$ с⁻¹. Из представленных на рис. 2

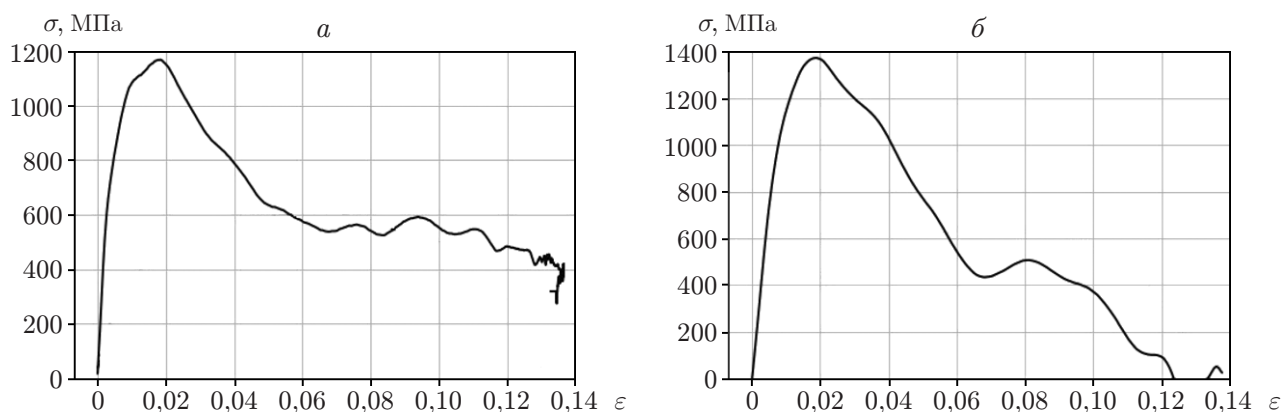


Рис. 2. Диаграммы нагружения образцов:

а — исходный образец ($\dot{\varepsilon} = 930$ с⁻¹), б — образец после хранения ($\dot{\varepsilon} = 945$ с⁻¹)

Динамические характеристики стали марки АК-25 до и после хранения

Состояние материала	$\dot{\varepsilon}$, с ⁻¹	σ_{sd} , МПа	σ_{bd} , МПа	δ_d , %	ψ_d , %
Исходное	415	1145 ± 30	1145 ± 30	8,0 ± 1,9	89,0 ± 9,6
	790	1150 ± 45	1150 ± 45	9,8 ± 0,6	77,8 ± 3,4
	930	1195 ± 50	1195 ± 50	11,6 ± 1,9	70,8 ± 10,2
	1015	1195 ± 45	1195 ± 45	13,7 ± 0,75	71,2 ± 8,6
	1130	1175 ± 10	1175 ± 10	12,8 ± 1,8	70,9 ± 10,6
После хранения	765	1105 ± 50	1105 ± 50	8,8 ± 0,4	51,3 ± 8,4
	945	1225 ± 195	1225 ± 195	8,2 ± 1,7	55,6 ± 5,9
	1040	1070 ± 80	1070 ± 80	9,2 ± 0,4	59,9 ± 0,5
	1165	1120 ± 30	1120 ± 30	7,9 ± 0,3	57,2 ± 2,8

диаграмм нагружения следует, что в процессе испытаний максимальное напряжение материала в образцах (предел прочности) достигалось при деформации $\varepsilon = (1,80 \pm 0,05)$ %.

Анализ результатов динамических испытаний. Прежде всего, отметим, что для испытанной стали динамический предел текучести совпадает с динамическим пределом прочности (см. таблицу). В таблице σ_{sd} , σ_{bd} — динамические пределы текучести и прочности соответственно, δ_d — относительное удлинение, ψ_d — относительное сужение.

Проведем сравнение полученных динамических характеристик стали в исходном состоянии с ее статическими характеристиками. Из результатов, приведенных в таблице, следует, что и характеристики прочности (предел текучести, предел прочности), и характеристика пластичности (относительное сужение) существенно увеличились. Вследствие существенного различия геометрии образцов для статических и динамических испытаний сравнение с характеристикой пластичности (относительным удлинением) является некорректным, поэтому результаты не анализируются. Следует отметить, что значительное увеличение характеристики пластичности ψ (с 50 до 80 %) не типично для металлических материалов. Так, ранее считалось, что увеличение скорости деформации приводит к охрупчиванию материала [4]. Однако полученный в данной работе результат является частным случаем и не может распространяться на другие стали. Кроме того, в работе [5] сделан вывод, что для некоторых металлических материалов (стали марки 35ХСЗМА, титанового сплава ВТ23) увеличение скорости деформации и уменьшение температуры испытаний приводит к увеличению характеристик пластичности материала.

Сравнение динамических характеристик стали в исходном состоянии и после длительного хранения показывает, что образцы, изготовленные из материала, подвергнутого длительному складскому хранению, являются более хрупкими, поскольку оба показателя пластичности: δ_d (в меньшей степени) и ψ_d (в большей степени) — этих образцов меньше. Максимальное напряжение для таких образцов также оказалось меньше по сравнению с образцами из материала в исходном состоянии. Однако в обоих случаях пластичность сталей остается высокой и превышает показатель пластичности ψ при статических испытаниях.

Следует отметить, что увеличение скорости деформации практически не оказывает влияния на все измеренные характеристики образцов материала после длительного хранения. Для образцов из исходного материала скорость деформации (в исследованном диапазоне) не влияет только на прочностные характеристики (σ_{sd} , σ_{bd}). Наконец, заметим, что отношение относительного сужения к относительному удлинению (для образцов из материала обоих типов) достаточно большое: $\psi_d/\delta_d = 7 \div 10$. Данный факт свидетельствует о локализации процесса пластической деформации в структуре металла.

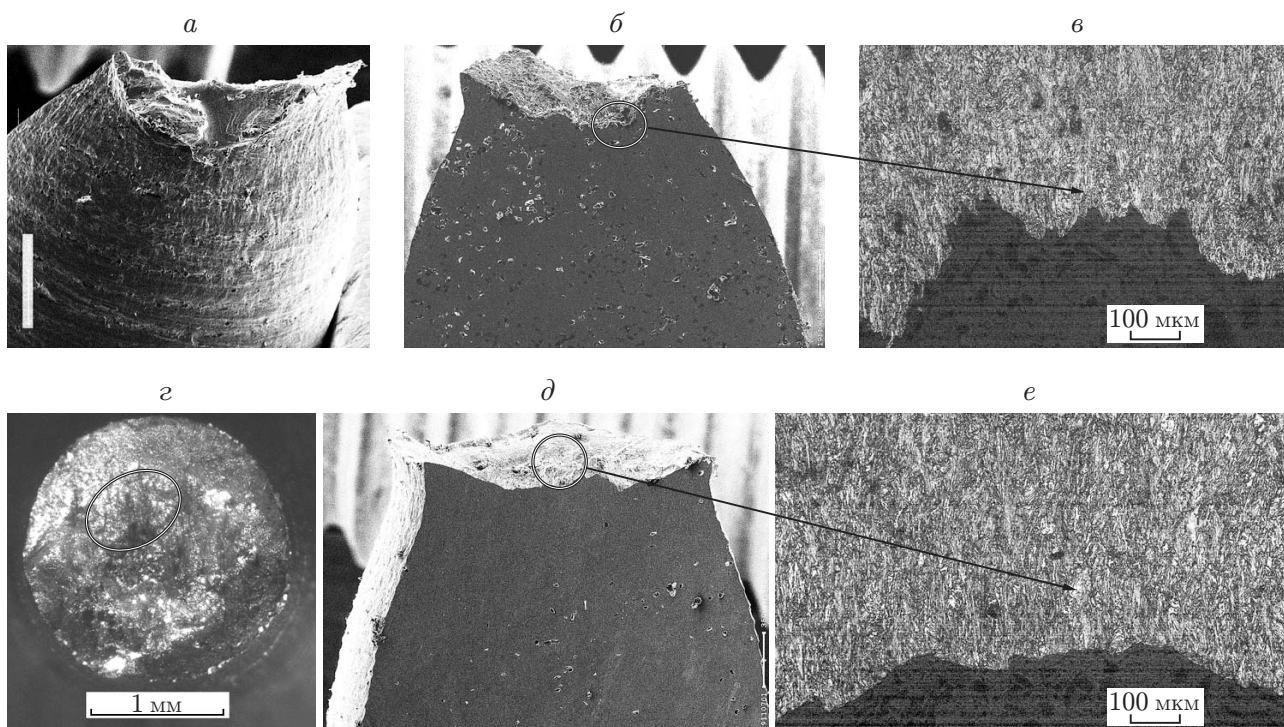


Рис. 3. Изломы и микрорельеф образцов:

a–в — исходное состояние материала, *г–е* — состояние материала после длительного хранения; выделенные области — зоны расположения очагов повреждения

Анализ диаграмм нагружения позволяет сделать следующие выводы:

1) при достижении предела прочности (текучести) в образце появляется достаточно протяженная область неравномерной деформации, соответствующей образованию шейки; зона равномерной деформации очень мала;

2) область неравномерной деформации состоит из двух зон: зоны, в которой образуется шейка, и зоны, в которой происходит структурная релаксация материала (уменьшение напряжений вследствие изменения структуры материала);

3) в образце из исходного материала при структурной релаксации наблюдается несколько локальных максимумов напряжения течения, а в образце из материала после длительного хранения — один максимум, что свидетельствует о различии релаксационных свойств стали. Можно предположить, что уменьшение релаксационной подвижности носителей деформации (дислокаций и т. п.) в образцах обусловлено старением материала в результате его длительного хранения.

Результаты металлографического исследования разрушенных образцов. Визуальные наблюдения показали, что после испытания образовались изломы образцов типа конус — чашка. Изломы такого типа соответствуют вязкому разрушению металлов, сопровождающемуся локальным утонением в форме шейки (рис. 3, *a, б, г, д*). По морфологическим признакам изломы образцов соответствуют вязкому разрушению, в результате которого образуется квазихрупкий микрорельеф (рис. 3, *в, е*). Однако на фотографиях протравленных поверхностей образцов видно, что в случае исходного материала степень изрезанности микрорельефа существенно больше.

Для определения размерности зон повреждения металла области, в которых находятся очаги разрушения, были изучены при увеличении в 1000 раз (рис. 4).

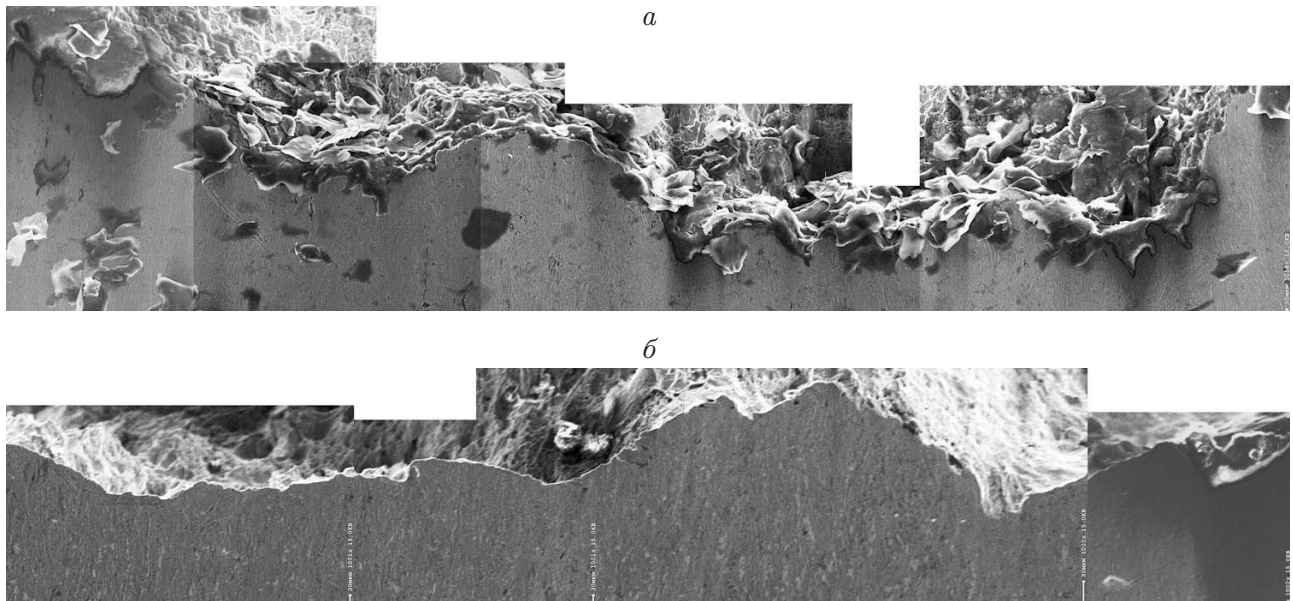


Рис. 4. Области, в которых расположены очаги разрушения. $\times 1000$:
a — исходный материал, *б* — материал после длительного хранения

В качестве параметра размерности была выбрана фрактальная размерность контура очага разрушения D_f [6]. Как известно, величина фрактальной размерности является количественной характеристикой поверхности разрушения и в общем случае может быть дробной [7]. Однако следует отметить, что конструкционные металлы и сплавы являются поликристаллами, поэтому их характеристики являются осредненными по множеству отдельных зерен (кристаллов), вследствие чего поверхности их разрушения, образующиеся при испытаниях, в общем случае являются не фрактальными, а самоаффинными [8].

При увеличении в 100–1000 раз определены фрактальные размерности очагов разрушения по результатам измерений методом вертикальных сечений [9]. Для исходного материала значение фрактальной размерности равно $D_f = 1,12$, для материала после длительного хранения $D_f = 1,04$. Значение $D_f = 1,04$ характерно для материалов с малой степенью пластичности [10]. Однако различие значений фрактальной размерности является несущественным (приблизительно 8 %), что, возможно, обусловлено сходством структуры сталей как в исходном состоянии, так и после длительного хранения [11]. Таким образом, можно утверждать, что за последние 50 лет технология изготовления сталей не изменилась.

Закключение. На основе полученных результатов динамических испытаний малоуглеродистой стали марки АК-25 (в исходном состоянии и после длительного хранения) с использованием разрезного стержня Гопкинсона можно сделать вывод об отсутствии существенных изменений свойств стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Savenkov G. G.** Mechanical properties of copper under dynamic load // Copper alloys: Preparation, properties and applications. N. Y.: Nova Sci. Publ., Inc, 2011. P. 107–126.
2. **Weinong Ch., Bo S.** Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and application. N. Y.; Dordrecht; Heidelberg; L.: Springer, 2010. (Mechanical Engineering Series).
3. **Bragov A. M., Igumnov L. A., Konstantinov A. Yu., Lomunov A. K.** A combined approach to dynamic testing of structural materials // Hopkinson centenary conf., Cambridge (UK), Sept. 9–11, 2014. Freiburg: Fraunhofer Inst. for High-Speed Dynamics, 2014. P. 51–68.

4. **Давиденков Н. Н.** Динамические испытания металла. М.; Л.: Госиздат, 1929.
5. **Дроздовский Б. А., Проходцева Л. В., Жегина И. А., Герчикова Н. С.** Влияние скорости деформирования и понижения температуры на трещиностойкость металлических материалов // Физ.-хим. механика материалов. 1985. № 6. С. 26–31.
6. **Мандельброт Б. Б.** Фракталы и хаос. Множество Мандельброта и другие чудеса. М.; Ижевск: Науч.-издат. центр “Регулярная механика и хаотическая динамика”, 2009.
7. **Иванова В. С.** Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. М.: Наука, 1992.
8. **Савенков Г. Г., Барахтин Б. К., Рудометкин К. А., Лебедева Н. В.** Динамическая трещиностойкость металлических материалов в условиях быстрого распространения самоподобной трещины // Журн. техн. физики. 2014. Т. 84, вып. 7. С. 52–57.
9. **Иванова В. С.** Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев. М.: Наука, 1994.
10. **Milman V. Y., Stelmashenko N. A., Blumenfeld R.** Fracture surfaces: a critical review of fractal studies and a novel morphological analysis of scanning microscopy measurements // Progr. Material Sci. 1994. V. 38. P. 425–474.
11. **Кудря А. В., Бочарова А. В., Лаговская Г. Ю.** Информативность мезогеометрии вязких изломов для ранжирования стали по вязкости // Тр. 35-го семинара “Актуальные проблемы прочности”, Псков, 15–18 сент. 1999 г. Псков: Псков. гос. ун-т, 1999. Ч. 2. С. 523–528.

*Поступила в редакцию 5/III 2020 г.,
после доработки — 18/V 2020 г.
Принята к публикации 25/V 2020 г.*
