

УДК 620.178.6

ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРОЧНОСТИ С ПОЗИЦИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДИССИПАЦИИ

*Глинер Р.Е.¹, д.т.н., профессор кафедры материаловедения, технологий материалов
и термической обработки металлов (gleen1@yandex.ru)*

*Дубинский В.Н.¹, к.т.н., доцент кафедры материаловедения, технологий материалов
и термической обработки металлов*

*Катюхин Е.Б.¹, аспирант кафедры материаловедения, технологий материалов
и термической обработки металлов*

Пряничников В.А.², к.т.н., заместитель директора

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(603930, Россия, Нижний Новгород, Минина, 24)

² ООО «ВолгоСтальПроект»,
(603035, Россия, Нижний Новгород, Чаадаева, 1)

Аннотация. Проанализировано распределение сталей различного класса прочности по сопротивлению деформации. При этом принимается во внимание, что в термодинамическом аспекте процесс деформации представляется диссипативным эффектом: имеет место переход части кинетической энергии внешнего механического воздействия во внутреннюю энергию деформируемого металла с формированием определенной дислокационной структуры. В связи с этим предложены энергетические критерии деформируемости металла, определяемые в стандартном испытании на растяжение. Основу этих критериев составляет работа деформирования, определяемая площадью диаграммы растяжения. При этом поглощенная энергия определяет удельную работу деформации, а темп поглощения энергии – сопротивление металла деформированию (податливость пластической деформации). Проведена количественная оценка проявления эффекта диссипации с сопоставлением значений удельных работ и критериев податливости. Исследование выполняли с использованием стандартных испытаний на растяжение образцов, изготовленных из сталей с различной прочностью, достигаемой за счет как химического состава (легирование), так и термической обработки, и применяемых для изготовления изделий различного конструкционного назначения. При этом в выбранной совокупности сталей диапазон предела текучести составлял 210 – 1660 МПа, временного сопротивления 840 – 1940 МПа. В результате установлено, что удельная работа сосредоточенной деформации на порядок превышает удельную работу равномерной деформации. Критерии податливости сосредоточенной деформации заметно ниже критериев податливости равномерной деформации, притом, что между ними наблюдается заметная корреляция. Последнее можно рассматривать как проявление структурной эволюции металла на обеих стадиях его деформирования, при которой в процессе самоорганизации диссипативной системы, каким является деформируемый металл, плотность дислокаций служит внутренним параметром, управляющим эволюционным превращением. Установлена корреляционная связь критериев податливости с показателями предельных напряжений при равномерном деформировании и разрушении. Таким образом, проведено ранжирование различных по прочности сталей по энергии, поглощаемой при деформации. В прикладном аспекте численные значения удельной работы и критерия податливости полезно использовать для прогнозирования поведения при механическом воздействии в эксплуатации и механической обработке сталей различного класса прочности.

Ключевые слова: деформация, энергия деформации, сопротивление деформации, диссипация энергии, испытание на растяжение, работа деформации, критерии сопротивления деформации.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-9-739-744

Макроскопический результат деформации металла (изменение формы и размеров) в термодинамическом представлении является диссипативным эффектом. Фактически имеет место переход части кинетической энергии внешнего механического воздействия во внутреннюю энергию деформируемого металла, реализуемую в формировании определенной дислокационной структуры [1–13]. При этом количество энергии, поглощенной при деформации, определяется работой деформации, а темп поглощения определяет сопротивление металла деформированию.

При испытании растяжением работа деформации ($A_{\text{деф}}$) численно равна площади, заключенной между первичной диаграммой и осью абсцисс (рис. 1).

Фактически $A_{\text{деф}}$ является суммой работ упругого удлинения ($A_{\text{упр}}$), равномерного удлинения ($A_{\text{равн}}$) и сосредоточенного удлинения ($A_{\text{соср}}$). Для использования $A_{\text{деф}}$ в ранжировании сталей по пластической деформируемости необходимо каждую из составляющих этой суммы относить к деформируемому объему испытываемого образца на стадиях упругой, равномерной и сосредоточенной деформации. Тем самым определяем удельные работы $a_{\text{упр}}$, $a_{\text{равн}}$ и $a_{\text{соср}}$.

В случаях равномерного пластического удлинения $a_{\text{равн}} = A_{\text{равн}} / V_{\text{деф}}$, где деформируемый объем $V_{\text{деф}} = F_0 l_{\text{раб}}$ (F_0 и $l_{\text{раб}}$ – начальные значения площади и рабочей длины испытываемого образца), а

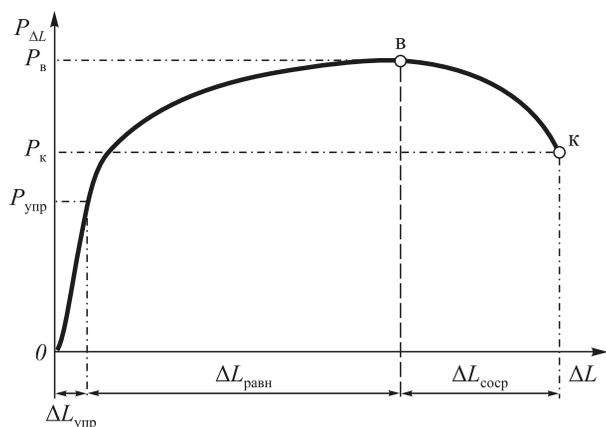


Рис. 1. Диаграмма растяжения (схема)

Fig. 1. Diagram of the tensile (scheme)

$$A_{равн} = \int_0^{\Delta L_B} P_{\Delta L} d(\Delta L). \quad (1)$$

В случае сосредоточенного удлинения, когда не представляется возможным зафиксировать деформируемый объем, удельную работу принято [1, 14, 15] определять через предельные напряжения

$$a_{соср} = \frac{\varepsilon_{соср}(S_K - S_B)}{2}. \quad (2)$$

В этом выражении S_K и S_B – истинные напряжения в точках «к» и «в», $\varepsilon_{соср}$ – разность между истинными (логарифмическими) сужениями в точках «к» и «в» (см. рис. 1), т. е.

$$\varepsilon_{соср} = \varepsilon_K - \varepsilon_B = \ln\left(\frac{F_0}{F_K}\right) - \ln\left(\frac{F_0}{F_B}\right), \quad (3)$$

где F_0 – исходная площадь поперечного сечения образца; F_B и F_K – площади в точках «в» и «к».

Удельные работы отражают [16] деформируемость в виде предельных для данного металла работ, необратимых для формоизменений на отдельных этапах, и в этом качестве они фактически количественно отражают диссипацию энергии.

Другим отражением деформируемости является податливость. Термин предложен Г.А. Смирновым-Аляевым [17] как сопротивление деформации при ее возрастании от внешнего воздействия. Это качество металла естественно определять отнесением удельной работы к соответствующей ей деформации.

Таким образом, приходим к критериям податливости на различных стадиях пластического удлинения, выражаемых в виде отношений, которые фактически характеризуют темп диссипации энергии

$$K_{равн} = \frac{a_{равн}}{\varepsilon_B}, \quad K_{соср} = \frac{a_{соср}}{\varepsilon_K}. \quad (4)$$

В прикладном аспекте численные значения величин $a_{равн}$, $a_{соср}$, $K_{равн}$, $K_{соср}$ естественно использовать при ранжировании сталей различной прочности по поведению в эксплуатации и механической обработке (давлением и резание). Естественно, что стали, деформация которых сопровождается повышенными удельными работами, являются более работоспособными в эксплуатации и более технологичными в обработке давлением, но менее технологичными в обработке резанием. При этом стали, характеризующиеся высокими значениями критериев податливости, также являются более работоспособными в эксплуатации, но менее технологичными как в обработке давлением, так и в обработке резанием. Причем прогнозируемые условия в обработке давлением должны обеспечивать механическое воздействие на металл, не приводящее к локализации деформации, тогда как для резания требуется разрушение (с предварительной локализацией). Поэтому в случае обработки давлением в роли характеристики технологичности выступает $K_{равн}$, в случае резания – $K_{соср}$.

Таким образом, приходим к целесообразности, наряду с традиционным ранжированием по прочности и пластичности, ранжирования сталей по энергии, поглощаемой при деформации, как проявления диссипации.

Цель настоящей работы – опробование на практике количественной оценки проявления диссипации при деформации конструкционных сталей, характеризующихся различной прочностью.

Исследование проводили с использованием стандартных испытаний на растяжение образцов, изготовленных из сталей с различной прочностью, достигаемой за счет как химического состава (легирование), так и термической обработки, применяемых для изготовления деталей различного конструкционного назначения (табл. 1).

Растяжение со скоростью 10 мм/мин выполняли в соответствии с ГОСТ 1497 на испытательной машине модели Р-5-50, оборудованной программно-техническим комплексом, обеспечивающим определение и распечатку механических характеристик и кривой растяжения. Полученные кривые подвергали компьютерной обработке с аппроксимацией графиков в виде многочленов

$$P_i = k_0 + k_1 \Delta L_i + k_2 \Delta L_i^2 + k_3 \Delta L_i^3 + k_4 \Delta L_i^4, \quad (5)$$

используя для этого не менее 15 точек.

Выбранная аппроксимация, в максимальной степени упрощая интегрирование (1), позволяет [9] наиболее точно отразить детали всех участков диаграммы, что максимизирует точность определения $A_{равн}$ и $A_{соср}$, также P_B , P_K , ΔL_B , ΔL_K (см. рис. 1), и, соответственно, S_B и S_K , а также предела текучести ($\sigma_{0,2}$).

Полученный многочлен использовали как подынтегральную функцию при вычислении интеграла (1) в интервале пластических удлинений от 0 до ΔL_B .

Марки и состояние сталей, рассматриваемых в работе

Table 1. Brands and state of the steels considered in the work

Порядковый номер	Марка	Термическая обработка	Примечание
1	10	Нормализация*	Стали перлитного класса
2	20		
3	22К		
4	30ХГСА	Отжиг*	
5		Закалка (без отпуска)**	
6 – 8	30ХГСА	Закалка с последующим отпуском***	
9	15Х1М1Ф		
10 – 12	38ХН3МФА		
13	20Х13		Сталь мартенситного класса
14	08Х18Н10Т	Аустенизация*	Стали аустенитного класса
15	08Х18Н10		
16	12Х18Н10		
17	03Х21Н32М3Б		Ni – Cr-сплав
18	02Х18К9М5Т	Закалка на мартенсит*	Мартенситно-стареющая сталь
19		Старение***	
20	ХН58МБЮ	Закалка на аустенит*	Сплав на никелевой основе
21		Старение***	

* Структурное состояние, характерное как для металла, подготавливаемого к технологическому холодному деформированию, так и применяемого в готовых изделиях.

** Вариант для сравнения.

*** Структурное состояние металла в готовых изделиях.

Численные значения ε_b , необходимые для расчетов по уравнению (4), определяли, используя аппроксимации (5), принимая $\varepsilon_b = \ln \left(\frac{L_b}{l_{\text{раб}}} \right)$ и $L_b = \Delta L_b + l_{\text{раб}}$.

Значения ε_b и ε_k в формуле (4) принимали за 100 % и, таким образом, критерии $k_{\text{равн}}$ и $k_{\text{сопр}}$ приобретают смысл удельных работ, необходимых для увеличения численных значений ε на 1 %.

В табл. 2 представлены результаты испытаний на растяжения образцов от всех рассматриваемых металлов (для удобства анализа приводимые данные располагаются в порядке возрастания прочности при сохранении порядковых номеров, представленных в табл. 1).

Как видно из приведенных данных, несмотря на то, что удельная работа (w) сосредоточенной деформации на порядок превышает удельную работу (при) равномерной деформации, критерии податливости на обеих стадиях деформации в достаточной степени соизмеримы ($k_{\text{равн}} \cong 0,5 k_{\text{сопр}}$). Это можно рассматривать как проявление эволюции дислокационной структуры металла на разных стадиях его пластического деформирования, но при некоторых различиях, находящихся объяснение в рассматриваемых моделях деформационной диссипации [18, 19].

В частности, принято считать, что в процессе самоорганизации диссипативной системы, каким является деформируемое поликристаллическое тело, плотность дислокаций служит внутренним параметром, управляющим эволюционным превращением субструктур. Рост сопротивления деформациям в диапазоне нагружения от $S_{0,2}$ до S_b является результатом деформационного упрочнения, обусловленного накоплением и диссипацией энергии при скольжении, размножении (увеличении плотности дислокаций ρ) и перестройке дислокаций на начальных этапах пластической деформации. Последнее связывается с переходом от клубковой дислокационной структуры к ячеистой ($\rho \approx 10^{10} \text{ см}^{-2}$) и далее к полосовой ($\rho \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$), фрагментированной в границах субструктуры ($\rho \approx 10^{14} \text{ см}^{-2}$). При превышении деформацией ε определенных значений, механизм пластической деформации за счет квазиоднородного скольжения и размножения дислокаций практически исчерпывается. Новыми модами деформации становятся крупномасштабные сдвиги и повороты, формирующие дислокационно-дисклинационные мезоструктуры диссипативного типа (полосовые, фрагментированные). При этом темп диссипации замедляется.

Результаты испытаний на растяжение

Table 2. Results of the tension test

Порядковый номер (см. табл. 1)	$S_{0,2}$	S_B	S_K	ϵ_B	ϵ_K	$a_{равн}$	$a_{соср}$	$K_{равн}$	$K_{соср}$
	МПа					мДж/мм ³			
14	210	838	1558	0,34	0,97	177	1164	5,2	12
1	228	317	896	0,18	1,3	50	858	2,8	6,6
17	233	841	1689	0,38	1,02	205	1285	5,4	12,6
15	282	928	1808	0,36	1,08	205	1480	5,7	13,7
2	299	472	957	0,14	0,88	55	660	3,9	7,5
3	371	615	1106	0,15	0,92	68	791	4,5	8,6
20	422	883	1992	0,39	0,99	410	1426	10,5	14,4
4	447	737	1099	0,10	0,48	69	442	6,9	9,2
9	497	749	1064	0,12	0,60	67	546	5,6	9,1
21	640	1109	1718	0,25	0,50	223	705	8,9	14,1
13	660	870	1272	0,10	0,56	67	599	6,7	10,7
10	830	1047	1571	0,08	0,75	60	983	7,5	13,1
8	895	987	1757	0,06	0,97	49	1329	8,1	13,7
18	898	1131	1690	0,03	1,25	21	1763	6,9	14,1
11	899	1065	1744	0,10	0,96	78	1363	7,8	14,2
16	945	1149	1768	0,11	0,76	87	1110	7,9	14,6
5	1240	1926	2323	0,05	0,31	64	657	12,8	21,2
7	1359	1577	2148	0,04	0,74	43	1376	10,7	18,6
6	1397	1832	2619	0,05	0,66	61	1472	12,1	22,3
12	1399	1464	2821	0,07	1,14	69	2816	9,8	24,7
19	1662	1939	2550	0,05	0,78	63	1747	12,5	22,4
Минимальные значения				0,03	0,31	21	442	2,8	6,6
Максимальные значения				0,39	1,3	410	2816	12,8	24,7
Средние значения				0,15	0,84	104	1170	7,7	14,2

* Количество, мДж/мм³, требуемое для увеличения истинных деформаций ϵ на 1 %.

Учитывая широкий диапазон прочности, характеризующей анализируемые стали, а также использование в анализе различных его видов, зависимость на рис. 2 можно считать достаточно универсальной в отношении черных металлов.

Характерно, что имеет место корреляционная связь между критериями податливости и предельными напряжениями на соответствующих стадиях растяжения (рис. 2).

Учитывая широкий диапазон прочности, характеризующей анализируемый объект исследования, зависимость на рис. 2 можно считать достаточно универсальной в отношении черных металлов. Последнее позволяет приближенно оценивать $K_{равн}$, $K_{соср}$ по известным значениям S_B и S_K .

Выводы. Предложены энергетические критерии $a_{равн}$, $a_{соср}$, $K_{равн}$, $K_{соср}$ сопротивления сталей пластической деформации в процессе технологического и экс-

плуатационного нагружения, устанавливаемые при испытаниях на растяжение.

Выполнено ранжирование по предложенным критериям сталей различного класса.

Проявление предложенных механических характеристик рассмотрено с позиций диссипации энергии применительно к пластическому деформированию сталей разных классов и прочности.

Установлены корреляционные связи данных критериев с показателями предельных напряжений при равномерном деформировании и разрушении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванова В.С. Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. – М.: Наука, 1992. – 155 с.
2. Плехов О.А., Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. Накопление и диссипация энергии в металлах как результат структурно-скейлинговых переходов в ансамблях дефектов // Физическая мезомеханика. 2007. № 4. С. 5 – 13.

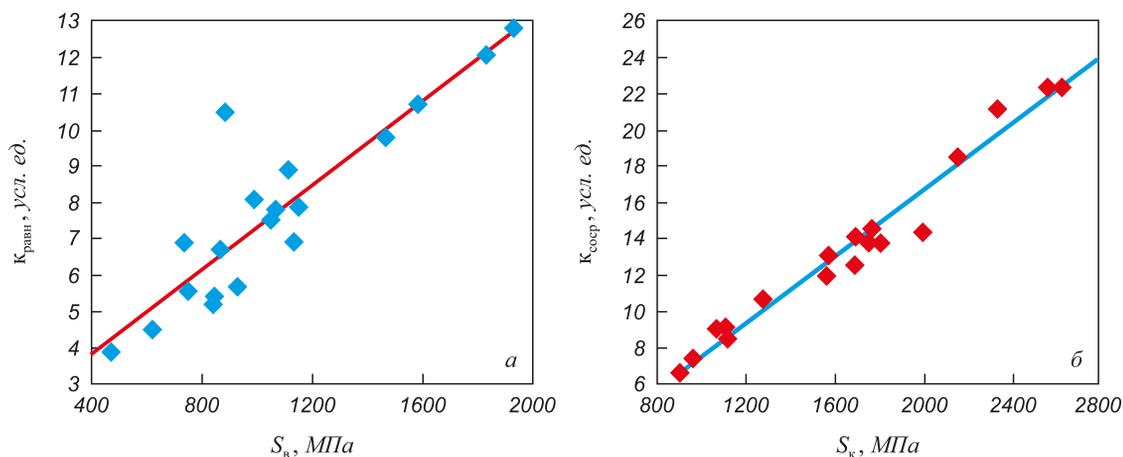


Рис. 2. Корреляционная связь между $K_{\text{ср}}$, $K_{\text{равн}}$ и показателями прочности:
 $y = 0,005x + 1,47$, $R^2 = 0,85$ (а); $y = 0,009x - 1,54$, $R^2 = 0,98$ (б)

Fig. 2. Correlation between K_{conc} , K_{unif} and strength index:
 $y = 0,005x + 1,47$, $R^2 = 0,85$ (a); $y = 0,009x - 1,54$, $R^2 = 0,98$ (б)

- Плехов О.А., Наймарк О.Б. Теоретическое и экспериментальное исследование диссипации энергии в процессе локализации деформации в железе // Прикладная механика и техническая физика. 2009. № 1. С. 153 – 164.
- Иванов А.М., Лукин Е.С. Особенности диссипации энергии конструкционных сталей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. № 11. С. 46 – 49.
- Иванов А.М., Лукин Е.С. Прочность и диссипация энергии при пластической деформации образцов из трубной стали // Матер. Междунар. конф. «Живучесть и конструкционное материаловедение» – М.: ИМАШ РАН, 2012. С. 24 – 25.
- Костина А.А., Баяндин Ю.В., Плехов О.А. Моделирование процесса накопления и диссипации энергии при пластическом деформировании металлов // Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. С. 44 – 48.
- Пашинская Е.Г., Ткаченко В.М., Завдоев А.В. Диссипация энергии при растяжении стали Ст3, полученной интенсивной пластической деформацией путем прокатки со сдвигом // Физика и техника высоких давлений. 2016. № 1. С. 20 – 26.
- Lukin E.S., Ivanov A.M., Vainer B.G. Thermal imaging investigations in experimental mechanics // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2003. Vol. 39. No. 6. P. 472 – 477.
- Oliferuk W., Maj M. Stress – strain curve and stored energy during uniaxial deformation of polycrystals // Turoop. J. Mech. A. Solids. 2009. No. 28. P. 266 – 272.
- Benzerger A., Brechet Y., Needleman A., Van der Giessen E. The stored energy of cold work: Prediction from discrete dislocation plasticity // Acta Mater. 2005. No. 53. P. 4765 – 4779.
- Iziumova A., Vshivkov A., Prokhorov A. etc. The study of energy balance in metals under deformation and failure process // Quantitative InfraRed Thermography Journal. 2016. Vol. 13. P. 242 – 256.
- Vivier G., Trumel H., Hild F. On the stored and dissipated energies in heterogeneous rate – independent systems // Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2009. Vol. 20. P. 411 – 427.
- Hodowany G., Ravichandran G., Rosakis A., Rosakis P. Partition of plastic work into heat and stored energy in metals // Experimental Mechanics. 2000. Vol. 20. No. 2. P. 113 – 120.
- Бугров Ю.В. Определение удельной работы пластической деформации при растяжении металлов // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. 2012. № 3. С. 66 – 68.
- Гребеньков С. К. Деформационное упрочнение и структура термообработанных низкоуглеродистых марганцевых сталей: Дис...канд. техн. наук. – Пермь: ПНИПУ, 2014. – 167 с.
- Глинер Р.Е., Катюхин Е.Б. Ранжирование металла по сопротивлению деформированию в механической обработке // Технология металлов. 2014. № 11. С. 9 – 16.
- Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. – Л.: Машиностроение, 1978. – 54 с.
- Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
- Дранкин Б.М., Кононенко В.К., Безъязычный В.Ф. Свойства сплавов в экстремальном состоянии. – М.: Машиностроение, 2004. – 256 с.

Поступила 26 ноября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 9, PP. 739–744.

ESTIMATION OF MECHANICAL DEFORMABILITY OF METALS BASED ON ENERGY DISSIPATION

R.E. Gliner¹, V.N. Dubinskii¹, E.B. Katyukhin¹,
V.A. Pryanichnikov²

¹ Nizhny Novgorod State Technical University named after R. Alexeev, Nizhny Novgorod, Russia

² JSC “VolgoStal’Proekt”, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Steels of various strength classes were distributed and analyzed according to deformation resistance parameter. It is considered that

the deformation process in the thermodynamic aspect appears to be a dissipative effect: a part of kinetic energy of the external mechanical action transfers to the internal energy of the deformable metal with the formation of a certain dislocation structure. Because of it the energy criteria were proposed for the deformability of metal, determined in the standard tensile test. The basis of these criteria is the deformation work, which was determined by the area of the tension diagram. In this case, the absorbed energy determines the unit rupture work, and the rate of energy absorption determines the metal deformation resistance

(compliance of plastic deformation). Quantitative assessment of dissipation effect demonstration with matching of the unit rupture work values and the compliance criteria was evaluated. The study was carried out using standard tensile tests of samples, made of steels with various strengths, achieved due to chemical composition (alloying) and heat treatment, used to manufacture products of various structural purposes. Herewith in the selected complex of steels, the yield strength range was 210 – 1660 MPa, the ultimate strength was 840 – 1940 MPa. Consequently, it was established that unit rupture work of the concentrated deformation much exceeds the unit rupture work of the uniform deformation. The criteria of the concentrated deformation compliance are much lower than the criteria of uniform deformation compliance, moreover, there is a noticeable correlation between it. The correlation can be considered as a demonstration of the structural evolution of metal in both stages of its deformation, in which, in the process of self-organization of dissipative system, such as deformable metal, the dislocation density serves as an internal parameter controlling the evolutionary transformation. The correlation between the compliance criteria and the ultimate stresses under uniform deformation and fracture was established. Thereby, the ranking of steels with different strengths per energy, absorbed during deformation, was conducted. In the applied aspect, the numerical values of the unit rupture work and the compliance criterion can be used for predicting the behavior of steels of various strength classes under mechanical treatment and mechanical action during operation.

Keywords: deformation, strain energy, strain resistance, energy dissipation, tension test, deformation work, strain resistance criteria.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-9-739-744

REFERENCES

- Ivanova V.S. *Sinergetika: Prochnost' i razrushenie metallicheskih materialov* [Synergetics: strength and destruction of metal materials]. Moscow: Nauka, 1992, 155 p. (In Russ.).
- Plekhov O.A., Pantelev I.A., Naimark O.B. Energy accumulation and dissipation in metals as a result of structural-scaling transitions in a mesodefekt ensemble. *Physical Mesomechanics*. 2007, vol. 10, no. 5-6, pp. 296–301.
- Plekhov O.A., Naimark O.B. Theoretical and experimental study of energy dissipation in the course of strain localization in iron. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2009, vol. 50, no. 1, pp. 127–136.
- Ivanov A.M., Lukin E.S. Peculiar features of energy dissipation of structural steels. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2009, no. 11, pp. 46–49. (In Russ.).
- Ivanov A.M., Lukin E.S. Strength and energy dissipation during plastic deformation of samples from tube steel. In: *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii "Zhivuchest' i konstruktsionnoe materialovedenie", 2012 g.* [Materials of the International Conference "Vitality and Structural Material Science", 2012]. Moscow: IMASH RAN, pp. 24–25. (In Russ.).
- Kostina A.A., Bayandin Yu., Plekhov O.A. Modeling the process of energy accumulation and dissipation during plastic deformation of metals. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2014, vol. 17, pp. 44–48. (In Russ.).
- Pashinskaya E.G., Tkachenko V.M., Zhdovetov A.V. Dissipation of energy upon tension of steel st3, obtained by intense plastic deformation by rolling with shear. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii*. 2016, no. 1, pp. 20–26. (In Russ.).
- Lukin E.S., Ivanov A.M., Vainer B.G. Thermal imaging investigations in experimental mechanics. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2003, vol. 39, no. 6, pp. 472–477.
- Oliferuk W., Maj M. Stress – strain curve and stored energy during uniaxial deformation of polycrystals. *Turp. J. Mech. A. Solids*. 2009, no. 28, pp. 266–272.
- Benzerger A., Brechet Y., Needleman A., Van der Giessen E. The stored energy of cold work: Prediction from discrete dislocation plasticity. *Acta Mater*. 2005, no. 53, pp. 4765–4779.
- Iziumova A., Vshivkov A., Prokhorov A., Kostina A., Plekhov O. The study of energy balance in metals under deformation and failure process. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2016, vol. 13, pp. 242–256.
- Vivier G., Trumel H., Hild F. On the stored and dissipated energies in heterogeneous rate - independent systems. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2009, vol. 20, pp. 411–427.
- Hodowany G., Ravichandran G., Rosakis A., Rosakis P. Partition of Plastic Work into Heat and Stored Energy in Metals. *Experimental Mechanics*. 2000, vol. 20, no. 2, pp. 113–120.
- Bugrov Yu.V. Determination of specific work of plastic deformation while metal stretching. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika metallov*. 2012, no. 3, pp. 66–68. (In Russ.).
- Greben'kov S.K. *Deformatsionnoe uprochnenie i struktura termootbrabotannykh nizkouglerodistykh martensitnykh stalei: Dis...kand. tekhn. nauk* [Strain hardening and structure of heat-treated low-carbon martensite steels: Cand. Tech. Sci. Diss.]. Perm: PNIPU, 2014, 167 p. (In Russ.).
- Gliner R.E., Katyukhin E.B. Ranking of metals by deformation resistance while mechanical treatment. *Tekhnologiya metallov*. 2014, no. 11, pp. 9–16. (In Russ.).
- Smirnov-Alyayev G.A. *Soprotivlenie materialov plasticheskomu deformirovaniyu* [Resistance of materials to plastic deformation]. Leningrad: Mashinostroenie, 1978, p. 54. (In Russ.).
- Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Oksogoev A.A. *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii* [Synergetics and fractals in materials science]. Moscow: Nauka, 1994, 383 p. (In Russ.).
- Drankin B.M., Kononenko V.K., Bez'yazychnyi V.F. *Svoistva splavov v ekstremal'nom sostoyanii* [Properties of alloys in the extreme state]. Moscow: Mashinostroenie, 2004, 256 p. (In Russ.).

Information about the authors:

R.E. Gliner, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals" (gleen1@yandex.ru)

V.N. Dubinskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals"

E.B. Katyukhin, Postgraduate of the Chair "Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals"

V.A. Pryanichnikov, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director

Received November 26, 2015