

УДК 539.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СВЯЗИ ЭНЕРГИИ ДЕФОРМАЦИИ С ПАРАМЕТРАМИ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ДЕФОРМИРУЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2011 Д.Г. Громаковский, А.А. Ермошкин, А.Г. Ковшов, М.В. Карпучин

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 10.11.2011

Приведены результаты экспериментальной оценки методами склерометрии и рентгеноструктурного анализа связи удельной энергии деформации поверхностей металлических образцов после различных видов механической обработки с уровнем повреждаемости тонкой структуры материала поверхностных слоев.

Ключевые слова: образец, поверхность, материал, структура, склерометрия, рентгенография, энергия, деформация, дислокация

Введение

Кинетическая термофлуктуационная концепция деформации и разрушения твердых тел [1,2], рассматривает энергию активации деформации $U_{a,def} = U(\sigma, T, \gamma) = U(\sigma, T, q_i)$, как функцию действующего напряжения σ , температуры T и структурного состояния деформированного материала γ , характеризуемого уровнем накопленных повреждений $\sum q_i$. В статье рассмотрена связь удельной энергии деформации поверхностей испытываемых образцов с уровнем повреждаемости тонкой структуры материала приповерхностного слоя.

Методика испытаний

Испытывали торцевые поверхности цилиндрических образцов (диаметром 30 мм, высотой 18 мм) из стали 40Х, титанового сплава ВТ9 и бронзы БрАЖ 9-4 после точения, шлифования и притирки с алмазной пастой. Шероховатость поверхностей измеряли профилографом-профилометром ВИ-201, микротвердость - микротвердомером ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76.

Энергию пластической деформации после механической обработки образцов оценивали методом склерометрии [3] на разработанном склерометре в процессе царапания обработанной поверхности алмазным индентором Виккерса с углом между гранями при вершине 136° .

Удельную энергию деформации рассчитывали по формуле $U_{def} = A_{def}/V_{def}$, Дж/мм³, (1) где $A_{def} = F_t \cdot L$, работа деформации, Дж; F_t - тангенциальное усилие царапания (деформации), Н; L - длина царапины, мм; $V_{def} = S \cdot L$ - объем деформированного материала, мм³; $S = 0,07D^2$ - площадь,

поперечного сечения борозды при царапании, мм²; D - диагональ отпечатка индентора, мм. Для получения достоверных данных с доверительной вероятностью 0,95 проводили порядка 15 измерений.

Состояние тонкой кристаллической структуры поверхностных слоев оценивали методами рентгенографии после соответствующей механической обработки образцов. Оценивали изменения физического уширения рентгеновских интерференционных линий β , размеров блоков мозаик D и микроискажений $\Delta a/a$, параметра решетки a (межатомного расстояния) и рентгенографической плотности дислокаций ρ .

Рентгенографирование деформируемых поверхностей проводили на дифрактометре Thermo Scientific в медном K_α излучении при режиме работы трубки $U=43$ кВ, $I=38$ мА при скорости вращения фиксирующего счетчика (детектора) 2 градуса в минуту. С каждого образца сначала снимали дифрактограмму для выбора интерференционных максимумов hkl после чего проводилось исследование состояния дефектной структуры по глубине поверхностного слоя методом скользящего пучка [4]. Съемки проводили при углах скольжения первичного пучка рентгеновских лучей $\alpha=2;5;10$ градусов.

Разделение вклада отражения от малых областей когерентного рассеяния (блоков) и микроискажений в физическое уширение рентгеновских линий проводили методом гармонического анализа формы линии. Для практического определения коэффициентов разложения в ряд Фурье экспериментальной и эталонной кривых распределения интенсивности использовали специализированную программу для ЭВМ - WinRP 20-6 RC1. С помощью этого же программного обеспечения проводили расчеты размеров блоков мозаик D и величины микроискажений $\Delta a/a$.

Рентгенографическую плотность дислокаций ρ рассчитывали по формуле $\rho = 3/D^2$.

Параметр решетки a (межатомное расстояние) находили с использованием программы X Powder.

Глубину проникновения h лучей в образец, или

Громаковский Дмитрий Григорьевич, д.т.н., профессор, директор НТЦ «Надежность». E-mail: pntms3@mail.ru

Ермошкин Андрей Александрович, ассистент кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов, E-mail: mym@samgtu.ru

Ковшов Анатолий Гаврилович, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения, факультет МИАТ, СамГТУ, E-mail: tms@samgtu.ru

Карпучин Михаил Васильевич, аспирант, инженер НТЦ «Надежность»

толщину материала участвующего в отражении рентгеновских лучей, определяли с учетом природы вещества, длины волны излучения, геометрии съемки и шероховатости поверхности.

Результаты испытаний

Дифрактограммы полученные со шлифованной поверхности, например, образца из стали 40X, приведены на рис.1, а расчетные данные физического уширения для каждого максимума hkl - в табл.1.

Таблица 1. Результаты оценки физического уширения β (в градусах) интерференционных максимумов hkl в зависимости от угла скольжения α и глубины h проникновения рентгеновских лучей перед склерометрированием

№ образца	α , град	h, мкм	hkl 001	hkl 011	hkl 111	hkl 002
1	90	10...15	0,428	0,783	0,813	0,914
1	2	1,51	0,724	0,675	1,011	0,968
1	5	2,75	0,598	1,184	1,070	1,201
1	10	4,78	0,533	1,110	0,742	1,346

Результаты оценки изменений удельной энергии деформации по глубине деформированных поверхностных слоев образцов из указанных конструкционных материалов, подвергнутых обработке шлифованием, приведены на рис. 2.

Наибольшая энергия наблюдается у поверхности, что связано с высоким уровнем дефектности слоя $h < 3$ мкм, уменьшение энергии по глубине может быть связано со снижением повреждаемости или, возможно, с ростом объема деформируемого материала.

Рентгеноструктурные исследования изменения параметров тонкой кристаллической структуры по глубине деформированных поверхностных слоев шлифованных образцов (рис. 3.4.5), а также при различных видах механической обработки (рис. 6,

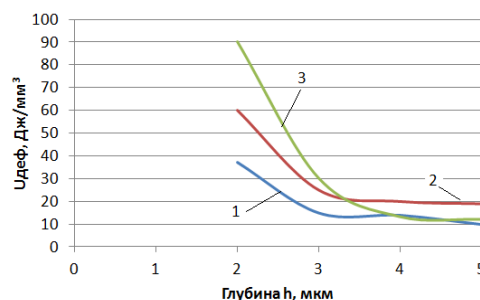


Рис. 2. Зависимость $U_{\text{деф}}$ от глубины внедрения индентора: 1 - сталь 40X, шлифование $Ra=0,223$ мкм, $H_{\mu}=231$; 2 - сплав ВТ 9, шлифование $Ra=0,223$ мкм, $H_{\mu}=285$; 3 - бронза БрАЖ9-4, шлифование $Ra=0,223$ мкм, $H_{\mu}=285$.

7,8) показали их удовлетворительную корреляцию с изменениями удельной энергии деформации.

Как показали испытания, с увеличением глубины склерометрирования от поверхности энергия деформации $U_{\text{деф}}$ снижается по закону изменения плотности дислокаций ρ в материале поверхностного слоя.

В соответствии с дислокационной теорией прочности, развиваемой Коттрелом, Бейли, Хиршем и др., удельная энергия разрушения (деформации) определяется [5] при достижении в деформированном поверхностном слое критической плотности дислокаций $\rho_{\text{кр}}=10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$, как

$$A_p \approx U_{\text{деф}} \approx \rho \cdot \Delta Q, \tag{2}$$

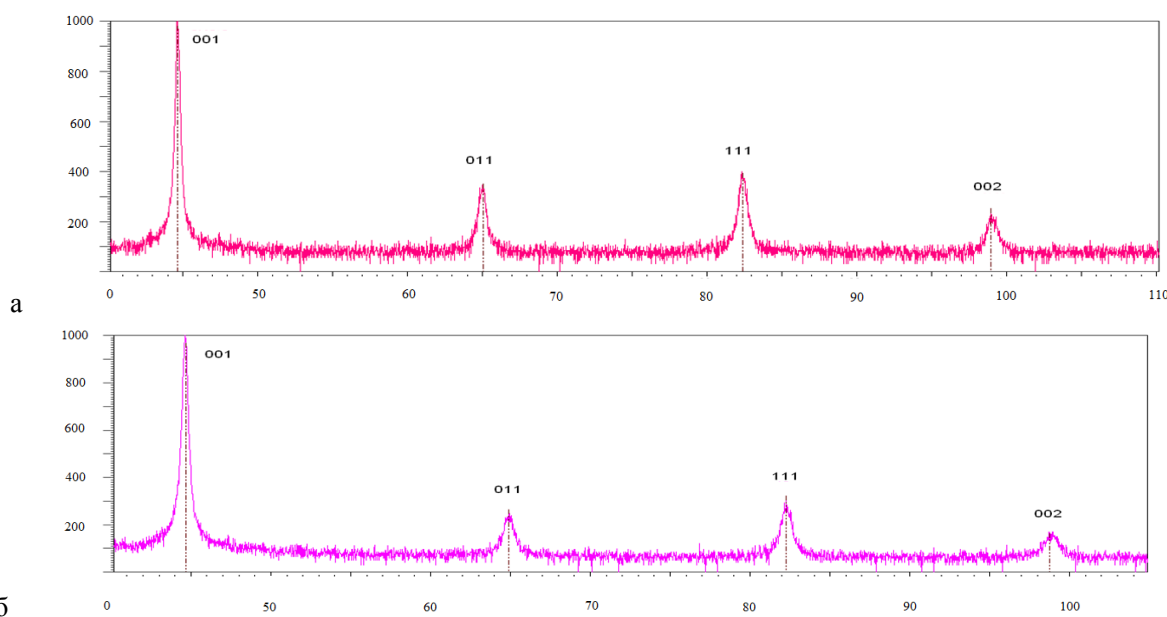
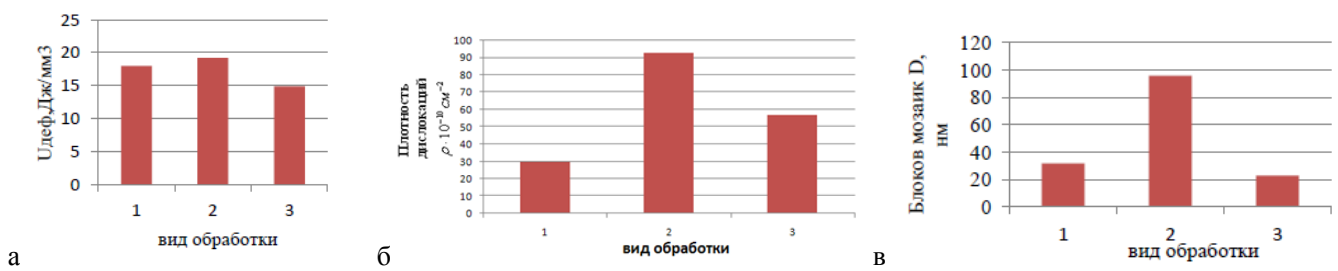
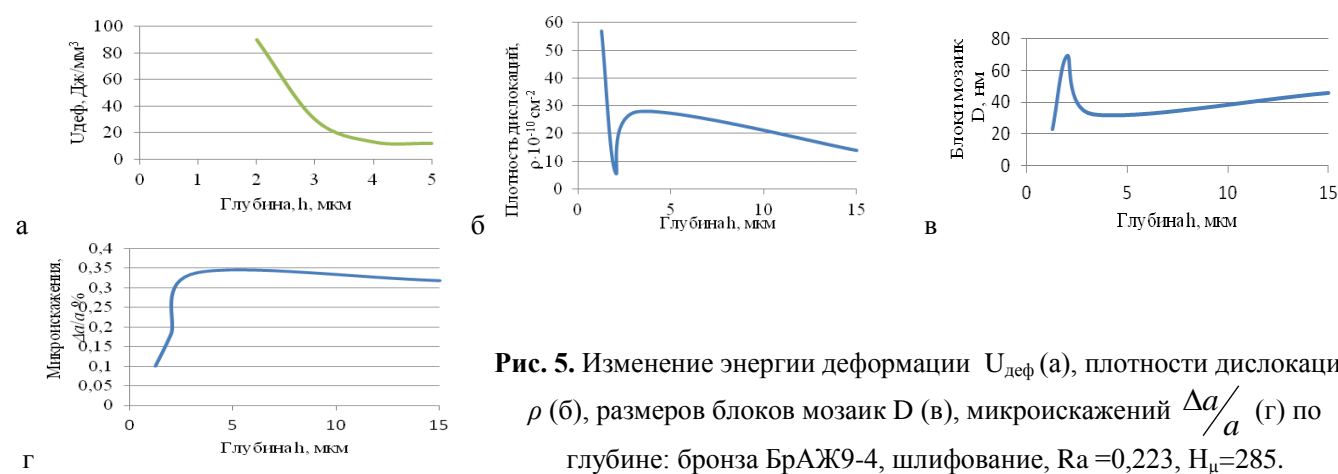
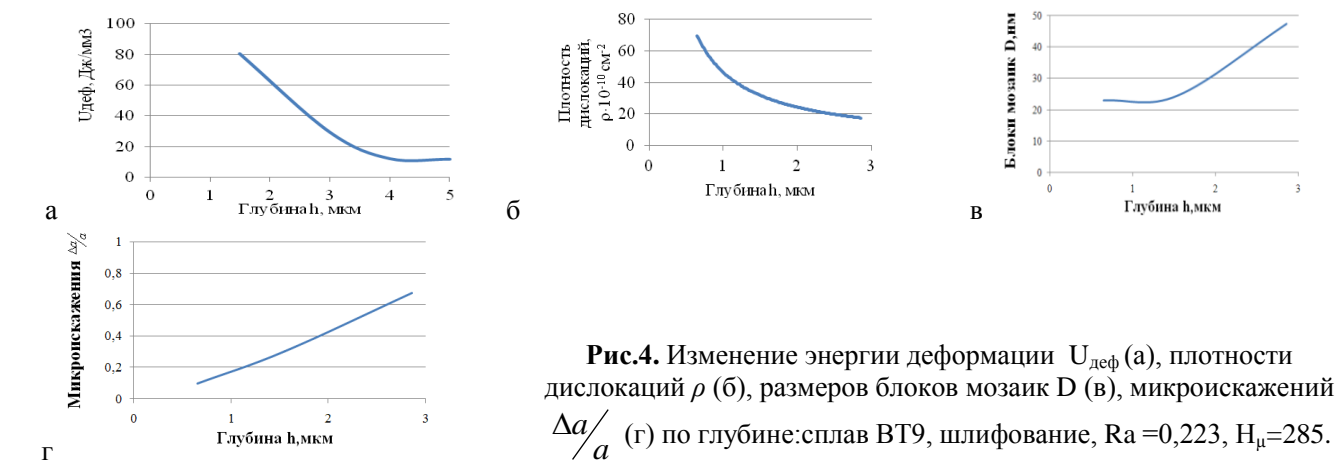
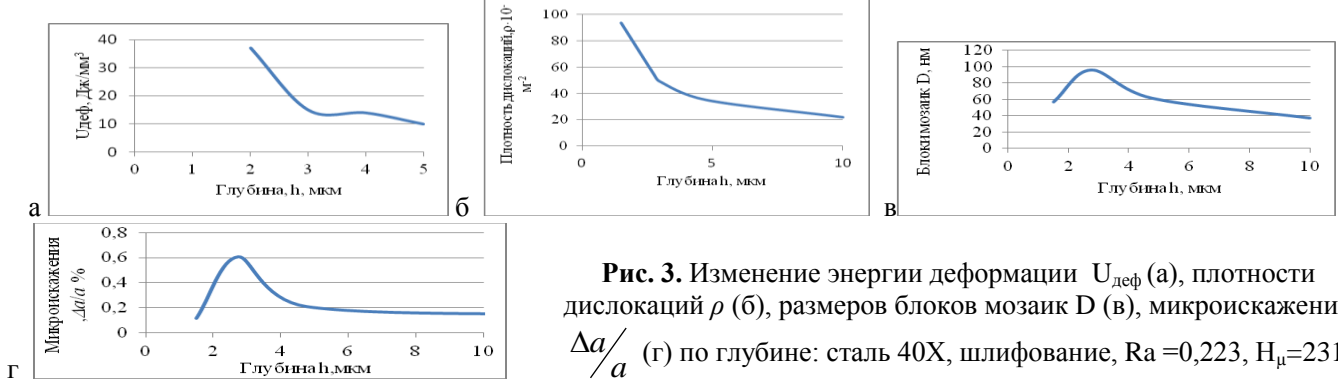


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы с поверхностями: Образец №1, Сталь 40X, шлифование, $Ra=0,233$ мкм: а) Дифрактограмма полученная методом скользящего пучка на глубину 1,51 мкм

(угол $\alpha=2$ градуса); б) Дифрактограмма полученная сканированием на глубину 10...15 мкм.



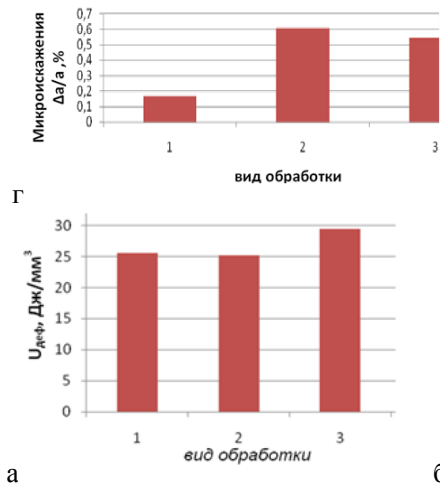


Рис.6. Зависимость энергии деформации $U_{\text{деф}}$ (а), плотности дислокаций ρ (б), размеров блоков мозаик D (в), микроискажений $\Delta a/a$ (г), от видов обработки стали 40X: 1 - притирка, 2 - шлифование, 3 – точение, глубина склерометрирования $h \approx 3$ мкм.

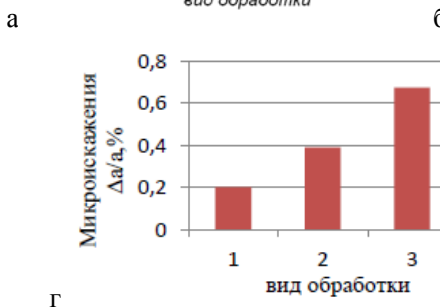
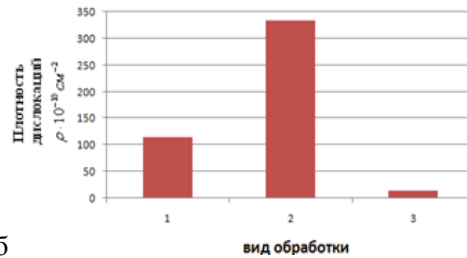
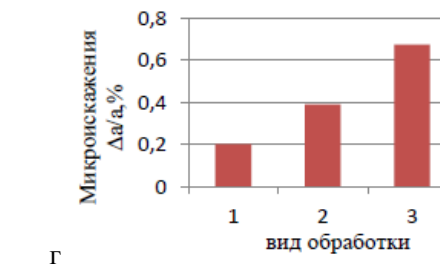


Рис.7. Зависимость энергии деформации $U_{\text{деф}}$ (а), плотности дислокаций ρ (б), размеров блоков мозаик D (в), микроискажений $\Delta a/a$ (г), от видов обработки сплава Вт9: 1 – притирка по шлифованию, 2-притирка по точению, 3 – шлифование, глубина склерометрирования $h \approx 3$ мкм.

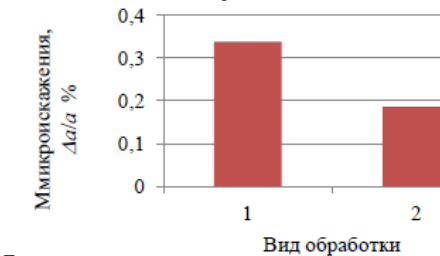
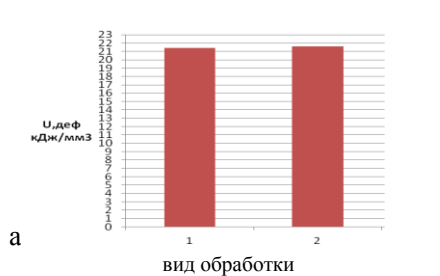


Рис.8. Зависимость энергии деформации $U_{\text{деф}}$ (а), плотности дислокаций ρ (б), размеров блоков мозаик D (в), микроискажений $\Delta a/a$ (г), от видов обработки бронзы БрАЖ9-4: 1 – притирка; 2 – шлифование тонкое, глубина склерометрирования $h \approx 3$ мкм.

где A_p – удельная энергия разрушения (деформации); ΔQ – средняя энергия дислокаций на единицу длины, определяемая как

$$\Delta Q = \rho \cdot G \cdot b^2 / (3(1-\mu)), \quad (3)$$

где b - вектор Бюргера; μ - коэффициент Пуассона.

На основе выражений (2) и (3) получим расчетную формулу (4) накопленной энергии деформации $U_{\text{деф}}$ в зависимости от плотности дислокаций ρ деформированной структуры

$$U_{\text{деф}} = \rho \cdot G \cdot b^2 / (3(1-\mu)). \quad (4)$$

Результаты оценки связи экспериментальных значений удельной энергии деформации с расчетными по формуле (4), полученными при различных значениях рентгенографической плотности дислокаций ρ по глубине поверхностного слоя сплава ВТ9 дефор-

мированного при различных видах механической обработки, приведены в табл. 2, при следующих исходных параметрах сплава [6]: модуль упругости $E = 1,1 \cdot 10^5$ Н/мм²; модуль сдвига $G = 0,38 \cdot E = 0,418 \cdot 10^5$ Н/мм²; коэффициент Пуассона $\mu = 0,34$; вектор Бюргера $b = 2,92 \cdot 10^{-7}$ мм $\Delta Q = 0,418 \cdot 10^5 (2,92 \cdot 10^{-7})^2 / (3(1-0,34)) = 1,8 \cdot 10^{-9}$ Дж/мм.

Анализ данных таблицы показывает, что экспериментальные значения $U_{\text{деф}}$ адекватно отражают уровень накопленных повреждений в материале. Экспериментальные значения изменяются в пределах от 16,6 до 59,5 Дж/мм³, расчётные от - 2,16 до 60,12 Дж/мм³.

Таблица 2. Расчётные и экспериментальные значения удельной энергии деформации $U_{\text{деф}}$ сплава ВТ по глубине при различных видах механической обработки

Вид обработки поверхности	Глубина от поверхности h , мкм	Плотность дислокаций ρ , мм^{-2}	Значения $U_{\text{деф}}$, Дж/мм ³	
			расчётные	экспериментальные при $h=3$ мкм
Шлифование	0,65	$5,685 \cdot 10^9$	10,23	29
	1,55	$4,989 \cdot 10^9$	8,98	
	2,86	$1,316 \cdot 10^9$	2,37	
Притирка после шлифования	0,65	$2,170 \cdot 10^9$	3,906	59,5 ($h=2$ мкм)
	1,55	$1,881 \cdot 10^9$	3,384	25,2
	2,86	$1,144 \cdot 10^{10}$	20,592	16,6 ($h=5$ мкм)
Притирка по точению	0,65	$7,166 \cdot 10^9$	12,899	25
	1,55	$1,204 \cdot 10^9$	2,16	
	2,86	$3,334 \cdot 10^{10}$	60,12	

Некоторое превышение экспериментальных значений над расчетными связано, очевидно, с дополнительным ростом плотности дефектов структуры перед алмазным индентором в процессе склерометрирования, а также с тем, что $U_{\text{деф}} \approx A_p$ зависит не только от величины (скаляра) плотности дислокаций ρ , но и от энергии их взаимодействия друг с

другом и с другими многочисленными дефектами деформированной структуры.

Выводы

Полученные методом склерометрии экспериментальные значения удельной энергии деформации поверхностных слоев образцов из разнородных конструкционных материалов после различных видов механической обработки адекватно отражают уровень и энергию накопленных повреждений тонкой структуры материала деформируемых поверхностей. Предложенное методическое решение оценки энергии активации пластической деформации пополнит арсенал методов испытаний рабочих поверхностей деталей машин и материалов в машиностроении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности. // Физика твердого тела. 1980. - Т. 22, - вып. 11, - С. 3344-3349.
2. Регель В.Р., Слуцкер А.Б., Томашевский В.Д. Кинетическая теория прочности твердых тел. - М.: Наука, 1974. - 302 с.
3. Патент №216645 РФ. / Способ оценки энергии активации разрушения материала поверхностного слоя деформированного трением / Громаковский Д.Г., Беленьких Е.В., Ибатуллин И.Д., Ковшов А.Г. и др.; опубл. 10.05.2001.
4. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металлов. - М.: Машиностроение, 1982. - 212 с.
5. Иванова В.С. Разрушение металлов. М.: Металлургия, 1979. - 168 с.
6. Колачев Б.А. Физическое материаловедение титана. - М.: Металлургия, 1976. - 184 с.

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF COMMUNICATION OF ENERGY OF DEFORMATION WITH PARAMETERS STRUCTURAL CONDITION OF THE MATERIAL OF DEFORMABLE SURFACES

© 2011 D.G. Gromakovsky, A.A. Ermoshkin, A.G. Kovshov, M.V. Karpuhin

Samara state technical university

Results of an experimental estimation by a methods of sclerometry and the x-ray structural analysis of communication of specific energy of deformation of surfaces of metal samples after various kinds of machining with a level of damageability of thin structure of a material of superficial layers are resulted.

Key words: the sample, a surface, a material, a structure, sclerometry, roentgenography, energy, deformation, a dislocation

Gromakovsky Dmitry Grigorevich, Dr.Sci.Tech., the professor, the director of scientific and technological center "Reliability".
E-mail: prms3@mail.ru

Ermoshkin Andrey Aleksandrovich, the assistant to chair of metallurgical science, powder metallurgy. E-mail: mvm@samgtu.ru

Kovshov Anatoly Gavrilovich, Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair of technology of mechanical engineering,
faculty MiAt, SamGTU. E-mail: tms@samgtu.ru

Karpuhin Michael Vasilevich, the post-graduate student, the engineer of scientific and technological center «Reliability»