



## Электромеханика и машиностроение

УДК 539.3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СПОСОБНОСТЬ МЕТАЛЛОВ НАКАПЛИВАТЬ ЭНЕРГИЮ ПРИ ИХ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В.Ф.БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ<sup>1</sup>, М.СЧЕРЕК<sup>2</sup>, М.Л.ПЕРВОВ<sup>1</sup>, М.В.ТИМОФЕЕВ<sup>1</sup>, М.А.ПРОКОФЬЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А.Соловьева, Рыбинск, Россия

<sup>2</sup> Институт экологически рациональных технологий Национального научно-исследовательского института, Радом, Польша

Предметом исследования является поверхностный слой высоконагруженных деталей, узлов трения горных машин и оборудования. В статье приведен теоретический анализ факторов, определяющих способность материала поверхностного слоя деталей накапливать энергию в процессе пластической деформации. Высказано предположение об активационном характере накопления металлами энергии.

На основе теории диффузии показано, что подвижность атомов, равно как и накопленная энергия, определяются отношением температуры испытания к температуре плавления.

**Ключевые слова:** детали машин; поверхностный слой; накопленная энергия; температура; степень деформации; предел прочности

**Как цитировать эту статью:** Безъязычный В.Ф. Исследование влияния температуры на способность металлов накапливать энергию при их пластической деформации / В.Ф.Безъязычный, М.Счерек, М.Л.Первов, М.В.Тимофеев, М.А.Прокофьев // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 55-59. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.55

**Введение.** Известно, что поверхностный слой высоконагруженных деталей, узлов трения горных машин и оборудования является ключевым элементом в обеспечении требуемых эксплуатационных свойств. Как правило, именно приповерхностные объемы материала воспринимают наибольшие внешние воздействия в процессе работы машины и являются основным объектом технологических операций механической, электрофизической и целого ряда других методов обработки, оказывающих влияние на структуру, химический состав, свойства материала [3, 5-8].

При решении задач описания, оценки и прогнозирования состояния поверхностного слоя после технологических или эксплуатационных воздействий многие исследователи определяют набор единичных и комплексных показателей, прямо или косвенно отражающих физические процессы, происходящие в материале. К числу таких показателей можно отнести микротвердость, глубину, степень и градиент наклепа, величину и знак остаточных напряжений первого рода, удельную накопленную энергию деформации. Удельная накопленная энергия деформации представляет особый интерес для изучения ввиду тесной взаимосвязи накопленной энергии деформации с режимными параметрами технологических воздействий [9].

**Постановка проблемы.** Теория дислокаций позволяет определить величину удельной энергии образовавшихся при пластической деформации дефектов (дислокаций) по формуле [4]

$$W = QGb^2\Lambda, \quad (1)$$

где  $W$  – удельная накопленная энергия, Дж/м<sup>3</sup>;  $Q$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от соотношения типов дислокаций,  $Q = 0,5-1$ ;  $G$  – модуль сдвига, Па;  $b$  – вектор Бюргера, м;  $\Lambda$  – плотность дислокаций, м<sup>-2</sup>.

Изменение плотности дислокаций в металлах при их деформационном упрочении связано с физико-механическим свойством – приращением условного предела текучести квадратичной зависимостью

$$\sigma = \sigma_{0,2} + \alpha Gb\sqrt{\Lambda}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – напряжение, необходимое для осуществления пластической деформации;  $\sigma_{0,2}$  – напряжение, имеющее смысл предела текучести материала;  $\alpha$  – коэффициент (параметр междислокационного взаимодействия).



Тогда с учетом (1) и (2) получаем выражение [4]

$$W = \frac{Q}{\alpha^2 G} (\sigma - \sigma_{0,2})^2. \quad (3)$$

Формула (3) свидетельствует о влиянии на накопленную энергию деформации механизма деформационного упрочнения. Принимая во внимание термоактивируемый характер процессов в зоне пластической деформации, к другим существенным факторам следует отнести температуру деформации, а также структурно-чувствительные свойства металлов, в том числе физико-механические. Таким образом, в первую очередь представляет интерес теоретический анализ влияния температурных условий на способность металлов и сплавов поглощать энергию при их пластической деформации.

**Методология.** Известно, что температура оказывает влияние на подвижность атомов кристаллической решетки, чем ближе текущая температура к точке плавления, тем больше подвижность атомов. Температурная зависимость коэффициента диффузии описывается уравнением Аррениуса:

$$D = D_0 e^{-\frac{H}{RT}}, \quad (4)$$

где  $D_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $H$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура.

С учетом известной корреляционной связи между энергией активации самодиффузии  $H$  и температурой плавления металлов  $T_{пл}$  [2], выражение (4) может быть представлено в следующем виде:

$$D = D_0 e^{-\frac{K_N T_{пл}}{RT}}, \quad (5)$$

где  $K_N$  – практически постоянная величина.

На рис.1 показана зависимость накопленной энергии деформации (при  $T = 293$  К и степени деформации  $\varepsilon = 20\%$ ) от гомологической температуры. С ростом гомологической температуры накопленная энергия деформации при переходе от более тугоплавкого металла к менее тугоплавкому уменьшается при одинаковой накопленной деформации и температуре (на рис.1 они соответствуют  $20\%$  и  $293$  К) [4].

**Обсуждение.** В результате статистической обработки данных накопленной энергии деформации для различных степеней пластической деформации установлена ее зависимость от гомологической температуры и степени пластической деформации:

$$W = 5,7 \varepsilon e^{-\frac{2T_{пл}}{RT}}, \quad (6)$$

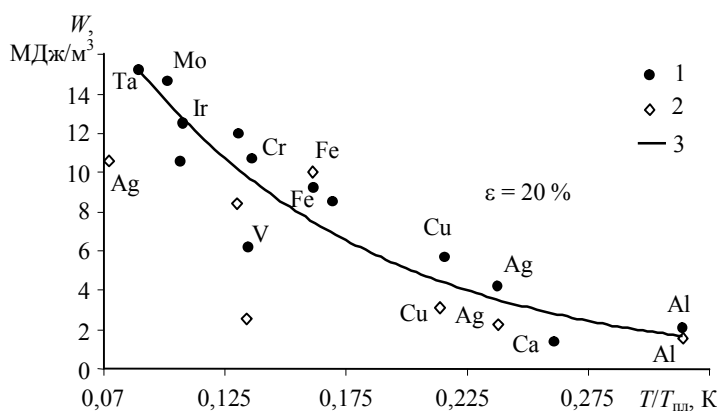


Рис.1. Изменение накопленной энергии деформации от гомологической температуры при  $\varepsilon = 20\%$

1 – рассчитанные значения  $W$ ; 2 – экспериментальные значения  $W$ ;  
3 – линия регрессии,  $R^2 = 0,84$

где  $W$  – накопленная энергия деформации,  $\text{МДж}/\text{м}^3$ ;  $\varepsilon$  – степень деформации;  $T_{пл}$  – температура плавления,  $\text{К}$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{К}\cdot\text{моль})$ ;  $T$  – абсолютная температура,  $\text{К}$ .

Полученная зависимость справедливая для второй стадии деформационного упрочнения материалов, раскрывает линейную связь накопленной энергии, степени деформации и плотности дислокаций. Таким образом, в первом приближении для исследованных металлов можно принять линейный характер изменения накопленной энергии с ростом степени деформации.



Особый интерес представляет анализ влияния предела прочности на накопленную энергию деформации при одинаковой гомологической температуре. Корреляционная зависимость, показанная на рис.2 при степени деформации  $\varepsilon = 10\%$ , свидетельствует о том, что чем прочнее материал, тем больше он накапливает энергии при прочих равных условиях.

Многие исследователи при изучении накопления металлами энергии при пластической деформации ограничивались рассмотрением только чистых металлов, которые характеризуются однородной кристаллической структурой. Следует отметить, что стали и сплавы на основе железа отличаются от чистого железа характеристиками структуры (количеством углерода, легирующих элементов, примесями и др.). Следовательно, при переходе от чистого железа к сталям следует ожидать изменения структурно-чувствительных свойств, наиболее важными из которых являются механические свойства. В связи с этим представляется важным помимо рассмотрения влияния гомологической температуры изучить влияние структуры материала на накопленную энергию деформирования.

**Влияние структуры материала.** В качестве объекта исследований были выбраны три группы материалов, относящихся к углеродистым, легированным сталям и жаропрочным сплавам на никелевой основе. Исходные данные для расчета представлены в таблице. Величина коэффициента  $\alpha$  была рассчитана на основе гипотезы, базирующейся на выявленных В.М.Грешновым закономерностях накопленной энергии деформирования [1]

$$\alpha = 0,159e^{\frac{100}{T}}, \quad (7)$$

где  $T$  – температура, К.

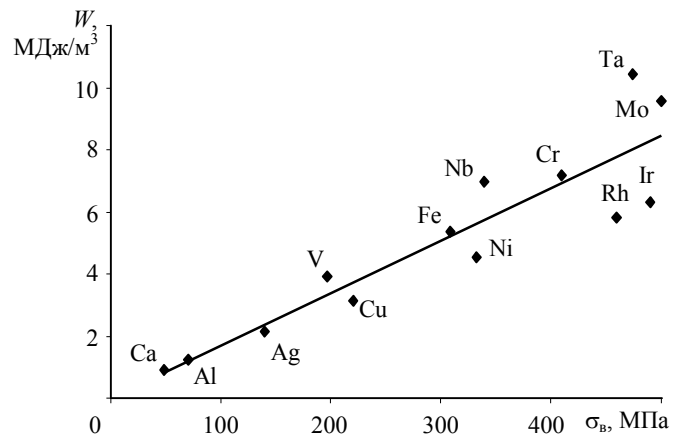


Рис.2. Величина накопленной энергии в зависимости от предела прочности исследуемых металлов при  $\varepsilon = 10\%$  (достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,75$ )

**Физико-механические свойства материалов и рассчитанный для них коэффициент  $\alpha$**

Материал	Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_T$ , МПа	Модуль сдвига, $G$ , ГПа	Вектор Бюргерса, $b \cdot 10^{-10}$ , м	Коэффициент $\alpha$		
Углеродистые стали							
08	330	200	80	2,87	0,20		
10, 10кп	340	210			0,20		
15	380	225			0,22		
20, 20кп	410	250			0,22		
25	530	275			0,26		
30	540	320			0,26		
35	520	310			0,26		
40	570	320			0,26		
45	600	340			0,28		
50	630	350			0,28		
55	640	360			0,28		
Легированные стали и сплавы							
30Г	550	290			80	2,87	0,28
50Г	650	370					0,28
60Г	700	380	0,30				
35Г2	630	370	0,28				
30Х	900	700	0,21				
50Х	1100	900	0,20				
20ХГ	800	600	0,23				
15Х	750	560	0,23				



Окончание таблицы

Материал	Предел прочности, $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_T$ , МПа	Модуль сдвига, $G$ , ГПа	Вектор Бюргерса, $b \cdot 10^{-10}$ , м	Коэффициент $\alpha$
40Х	1000	800			0,22
50ХФА	1250	1080			0,20
X18H9T	600	280			0,30
H23H18	920	630			0,28
12X18H9T	620	320			0,30
Жаропрочные сплавы на никелевой основе					
XH77TЮР	1020	660			0,34
XH70BMТЮ	1140	750			0,34
XH73MBТЮ	1200	800	80	3,5	0,34
XH50BMKTЮР	1220	785			0,35
XH70MBФ	800	370			0,39
XH62BMKЮ	950	500			0,39

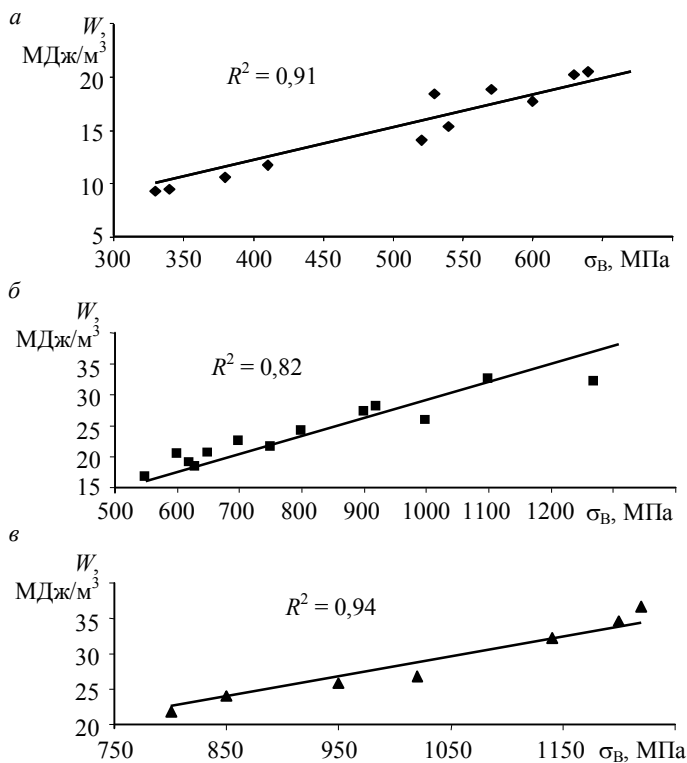


Рис.3. Зависимость накопленной энергии от предела прочности углеродистых сталей (а), легированных сталей (б) и жаропрочных сплавов (в) при  $\varepsilon = 20\%$

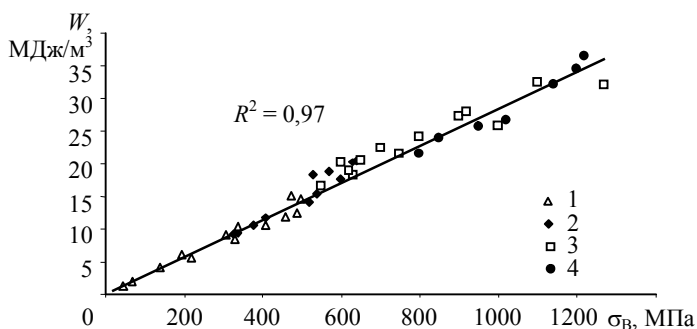


Рис.4. Зависимость накопленной энергии от предела прочности чистых металлов, углеродистых, легированных сталей и жаропрочных сплавов при  $\varepsilon = 20\%$

1 – чистые металлы; 2 – углеродистые стали; 3 – легированные стали; 4 – жаропрочные сплавы

Рассмотрим влияние предела прочности на способность исследуемых сталей и сплавов поглощать энергию деформации при пластической деформации. На рис.3 показана зависимость накопленной энергии от предела прочности при степени деформации  $\varepsilon = 20\%$  для углеродистых сталей (рис.3, а), легированных сталей (рис.3, б), жаропрочных сплавов (рис.3, в).

Объединение рассматриваемых графиков (рис.3), а также зависимости для чистых металлов (см. рис.2) представлено на рис.4 [4]. Между рассматриваемыми величинами наблюдается тесная корреляция, справедливая для всех рассматриваемых групп металлов.

Авторами получено линейное регрессионное уравнение следующего вида

$$W = 0,12\varepsilon\sigma_B, \quad (8)$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности материала, МПа.

Уравнение (8) наглядно демонстрирует линейную зависимость накопленной энергии от степени пластической деформации материала и его предела прочности.

## Заключение

1. Установлена зависимость накопленной энергии от степени деформации металла и плотности дислокаций. На второй стадии деформационного упрочнения зависимость приобретает линейный характер.



2. Показано влияние структуры материала как фактора, определяющего способность материалов накапливать энергию при пластической деформации.
3. Установлена линейная связь накопленной энергии деформации металлов с пределом прочности материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Грешнов В.М.* Прогнозирование разрушения металлов в процессах холодной пластической деформации. Сообщение 1. Приближенная модель пластической деформации и разрушения металлов / В.М.Грешнов, Ю.А.Лавриненко, А.В.Напалков // Проблемы прочности. 1999. № 1. С. 76-85.
2. *Драпкин Б.М.* О некоторых закономерностях диффузии в металлах // Физика металлов и металловедение. 1992. № 7. С. 58-63.
3. *Максаров В.В.* Повышение точности и качества изготовления деталей из титана и титановых сплавов на основе предварительного локального пластического деформирования / В.В.Максаров, Е.В.Кошелева // Качество и жизнь. 2016. № 3. С. 61-65.
4. *Прокофьев М.А.* Технологическое обеспечение параметров наклепа поверхностного слоя деталей при шлифовании на основе определения скрытой энергии деформации: Автореф. дис...канд. техн. наук / Рыбинская государственная авиационная технологическая академия. Рыбинск, 2006. 16 с.
5. *Knudsen T.A.* An experimental study of plastic deformation of materials: PhD thesis / Technical University of Denmark. 2008.
6. *Maksarov V.V.* Increase of wear and fretting resistance of mining machinery parts with regular roughness patterns / V.V.Maksarov, V.A.Krasnyy, J.J.Olt // Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium. 2016. Vol. 27(1). P. 151-156.
7. *Maksarov V.V.* The formation of surface roughness of piston rings for the purpose of improving the adhesion of wear-resistant coatings / V.V.Maksarov, V.A.Krasnyy // Key Engineering Materials. 2017. № 736. P. 73-78.
8. *Mohammad S.M.* A study of stored energy in ultra-fined grained aluminum machined by electrical discharge machining / S.M.Mohammad, A.M.Ramezan // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2016. Vol. 231, Iss. 23. P. 4470-4478.
9. *Taheri M.* A method of measuring stored energy macroscopically using statistically stored dislocations in commercial purity aluminum / M.Taheri, H.Weiland, A.Rollett // Metallurgical and Materials Transactions. 2006. Vol. 37. P. 19-25. DOI: 0.1007/s11661-006-0148-1.

**Авторы:** **В.Ф.Безъязычный**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, [tehnology@rsatu.ru](mailto:tehnology@rsatu.ru) (Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А.Соловьева, Рыбинск, Россия), **М.Счерек**, д-р техн. наук, заместитель директора по науке и исследованиям, [marian.szczerek@gmail.com](mailto:marian.szczerek@gmail.com) (Институт экологически рациональных технологий Национального научно-исследовательского института, Радом, Польша), **М.Л.Первов**, д-р техн. наук, профессор, [otd@rsatu.ru](mailto:otd@rsatu.ru) (Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А.Соловьева, Рыбинск, Россия), **М.В.Тимофеев**, канд. техн. наук, доцент, [mv-timofeev@yandex.ru](mailto:mv-timofeev@yandex.ru) (Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А.Соловьева, Рыбинск, Россия), **М.А.Прокофьев**, канд. техн. наук, доцент, [rgata2004@mail.ru](mailto:rgata2004@mail.ru) (Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А.Соловьева, Рыбинск, Россия).

Статья поступила в редакцию 02.04.2018.

Статья принята к публикации 21.06.2018.