



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.762. (035.5)

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-62-72

## ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПРУГОДИССИПАТИВНОЙ ПОДЛОЖКИ НА УДАРНО-АБРАЗИВНУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ГОРЯЧЕШТАМПОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Сиротин П.В.<sup>1</sup>, Гасанов Б.Г.<sup>1</sup>, Исмаилов М.А.<sup>1</sup>, Дробязко Н.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация. Актуальность исследований.** Обусловлена необходимостью разработки новых износостойких конструкционных материалов, в том числе методами порошковой металлургии, устойчивых к ударно-абразивному изнашиванию и технологии изготовления деталей для буровых насосов. **Используемые методы.** Для аналитического описания реологии механической модели испытания конструкционных материалов на ударно-абразивную износостойкость использовали закон сохранения энергии или баланса работы и принцип суперпозиции на основе оценки суммарной деформации. Ударно-абразивную износостойкость оценивали на специально разработанной установке при непрерывной подаче порошкообразного электрокорунда. Для экспериментального определения напряженно-деформированного состояния упругодиссипативную подложку осаждали при нагрузке 300 Н на стенде, разработанном для статических испытаний многослойных материалов. Для изучения напряженно-деформированного состояния цилиндрических образцов с упругодиссипативной подложкой использовали также программный комплекс ANSYS Mechanical. Микрорентгеноспектральный анализ проводили в ЦКП ЮРГПУ(НПИ) на растровом электронном микроскопе Quanta 200 разрешающей способностью 5 нм, с рентгеновским микроанализатором EDAX GENESIS, оснащенный ЭВМ и соответствующим программным обеспечением. **Результаты и научная значимость.** Установлено, что при ударно-абразивном испытании конструкционной стали П40Х, полученной горячей штамповкой пористых спеченных заготовок, с использованием резиновой УДП величина поглощенной энергии зависит не только от физико-механических свойств УДП, но и от ее геометрических параметров. Экспериментально показано, что при одинаковой высоте резиновой УДП с отверстием работа диссипации, соответственно, ударно-абразивная износостойкость испытуемого материала в 1,5–2 раза больше, чем при использовании УДП без отверстия. **Практическая значимость.** Предложен метод определения напряженно-деформированного состояния резиновой упругодиссипативной подложки при испытании конструкционных материалов на ударно-абразивную износостойкость и показано влияние интенсивности напряжений и деформаций на работу диссипации при этом. Выявлен механизм разрушения поверхности порошковых образцов при ударно-абразивном износе и показано влияние химического состава абразивных частиц на механизм разрушения поверхности порошковых сталей на начальной стадии испытания и в режиме установившегося износа.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, диссипативная подложка, ударно-абразивная износостойкость, горячештампованная порошковая сталь.

© Сиротин П.В., Гасанов Б.Г., Исмаилов М.А., Дробязко Н.А., 2022

### Для цитирования

Влияние напряженно-деформированного состояния упругодиссипативной подложки на ударно-абразивную износостойкость горячештампованных порошковых конструкционных сталей / Сиротин П.В., Гасанов Б.Г., Исмаилов М.А., Дробязко Н.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 62–72. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-62-72>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# INFLUENCE OF THE STRESS-STRAIN STATE OF AN ELASTIC-DISSIPATIVE SUBSTRATE ON IMPACT-ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF HOT-STAMPED POWDER STRUCTURAL STEELS

Sirotnin P.V.<sup>1</sup>, Gasanov B.G.<sup>1</sup>, Ismailov M.A.<sup>1</sup>, Drobyazko N.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** Due to the need to develop new wear-resistant structural materials, including by methods of powder metallurgy, resistant to impact and abrasive wear, and manufacturing technology for parts of drilling pumps. **Methods Applied.** To prepare an analytical description of rheology of the mechanical model of testing structural materials for impact and abrasive wear resistance, the authors used the law of conservation of energy or work balance and the principle of superposition based on the assessment of total deformation. Impact and abrasive wear resistance was evaluated on a specially designed installation with continuous supply of powdered electrocorundum. To determine the experimental stress-strain state, an elastic-dissipative substrate was deposited at a load of 300 N on a stand designed for static testing of multilayer materials. The ANSYS Mechanical software suite was also used to study the stress-strain state of the cylindrical samples with the elastic-dissipative substrate. An X-ray microanalysis was carried out in the Resource Sharing Center of South-Russian State Polytechnic University (NPI), applying a Quanta 200 scanning electron microscope with a resolution of 5 nm with an EDAX GENESIS X-ray microanalyzer equipped with a computer and appropriate software. **Results and scientific importance.** It is established that during impact-abrasive testing of structural steel P40Kh produced by hot stamping of porous sintered blanks, using a rubber elastic-dissipative substrate, the amount of absorbed energy depends not only on the physical and mechanical properties of the elastic-dissipative substrate, but also on its geometric parameters. It has been experimentally shown that at the same height of the rubber elastic-dissipative substrate with a hole, the dissipation behaviour, and, respectively, impact-abrasive wear resistance of the tested material is 1.5–2 times greater than when using the elastic-dissipative substrate without a hole. **Practical Relevance.** The paper proposes a method for determining the stress-strain state of the rubber elastic-dissipative substrate, when testing structural materials for impact and abrasive wear resistance, and shows the effect of intensity of stresses and deformations on dissipation. The mechanism of destruction of the powder sample surface during impact-abrasive wear is revealed. The paper shows the influence of a chemical composition of abrasive particles on the destruction mechanism of the surface of powder steels at the initial stage of testing and in the steady-state wear mode.

**Keywords:** stress-strain state, dissipative substrate, impact-abrasive wear resistance, hot-stamped powder steel.

## For citation

Sirotnin P.V., Gasanov B.G., Ismailov M.A., Drobyazko N.A. Influence of the Stress-Strain State of an Elastic-Dissipative Substrate on Impact-Abrasive Wear Resistance of Hot-Stamped Powder Structural Steels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 62–72. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-62-72>

## Введение

Одно из важных направлений повышения эксплуатационной надежности оборудования нефтегазовой промышленности является разработка новых материалов и технологии получения из них деталей различной конфигурации [1]. Это особо относится к деталям и агрегатам буровых насосов. Выявлено, что в процессе эксплуатации буровых насосов наименее надежны детали гидравлического блока, которые подвержены ударно-абразивному изнашиванию [2]. Поэтому при выборе материалов для их изготовления необходимо учитывать условия работы и

конструктивные особенности узлов насоса [3, 4].

Известно, что интенсивность ударно-абразивного изнашивания связана с химическим составом, структурой испытуемых материалов и энергетическими и кинематическими параметрами ударного воздействия [2, 5–7]. Экспериментально обосновано, что применение упругодиссипативных подложек (УДП) в конструкциях многих изделий позволяет увеличить стойкость компактных и порошковых сталей к ударно-абразивному изнашиванию за счет поглощения и рассеивания части энергии удара. Величина поглощенной энергии при этом зависит не только от физико-механических свойств материала УДП, но и от ее геометриче-

ских параметров. В частности, экспериментально показано, что при наличии отверстий в подложке ударно-абразивный износ испытуемого материала существенно снижается [7].

Целью данной работы является повышение износостойкости порошковых конструкционных сталей для клапанов буровых насосов на основе оценки влияния напряженно-деформированного состояния УДП на диссипацию энергии удара и механизм их ударно-абразивного изнашивания.

**Теория, материалы и методы исследования**

Для аналитического описания реологии механической модели испытания конструкционных материалов на ударно-абразивную износостойкость, показанной на рис. 1, можно использовать закон сохранения энергии или баланса работы и принцип суперпозиции на основе оценки суммарной деформации. Суммарная работа  $A_{уд}$ , совершаемая бойком 1, затрачивается на пластическую деформацию порошкового материала вдавливани- ем абразивных частиц  $A_p$ , упругую деформацию  $A_{упр}$  испытуемого образца 2 с оправкой 3 и упру- гую деформацию диссипативной подложки 4  $A_{дис}$ :

$$A_{уд} = A_p + A_{упр} + A_{дис}. \quad (1)$$

Если известны компоненты тензоров напряжений и деформаций, то работа пластической деформации материала частиц и упругой деформации порошкового образца можно определить по следующим выражениям [7]:

$$A_p = \frac{1}{2} \sigma_{ijp} \cdot \varepsilon_{ijp}; \quad A_{упр} = \frac{1}{2} \sigma_{ijпр} \cdot \varepsilon_{ijупр}. \quad (2)$$

При больших деформациях для расчета глав- ных напряжений при известных главных дефор- мациях используем следующую систему уравне- ний [8]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{E}{3} (\varepsilon - \varepsilon_3^2); \quad \sigma_2 - \sigma_3 = \frac{E}{3} (\varepsilon_2^2 - \varepsilon_3^2), \quad (3)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – главные деформации;  $E$  – модуль упругости ре- зины УДП.

Из выражений (2) и (3) следует, что для определения диссипативной работы в данной модели нужно найти компоненты тензоров де- формаций и напряжений материальных точек (представительных элементов) подложки и вы- числить по ним значения главных деформаций и напряжений.

Согласно схеме (рис. 1, б) суммарная (макси- мальная) деформация рассматриваемой системы

$$\sum \Delta Z = \Delta Z_{пл} + \Delta Z_{упр} + \Delta Z_{дис}, \quad (4)$$

где  $\Delta Z_{пл}$  – абсолютная пластическая дефор- мация в зоне контакта порошкового материала;  $\Delta Z_{упр}$  – упругая деформация испытуемого об- разца и оправки;  $\Delta Z_{дис}$  – упруговязкая дефор- мация диссипативной подложки в момент  $t$ .

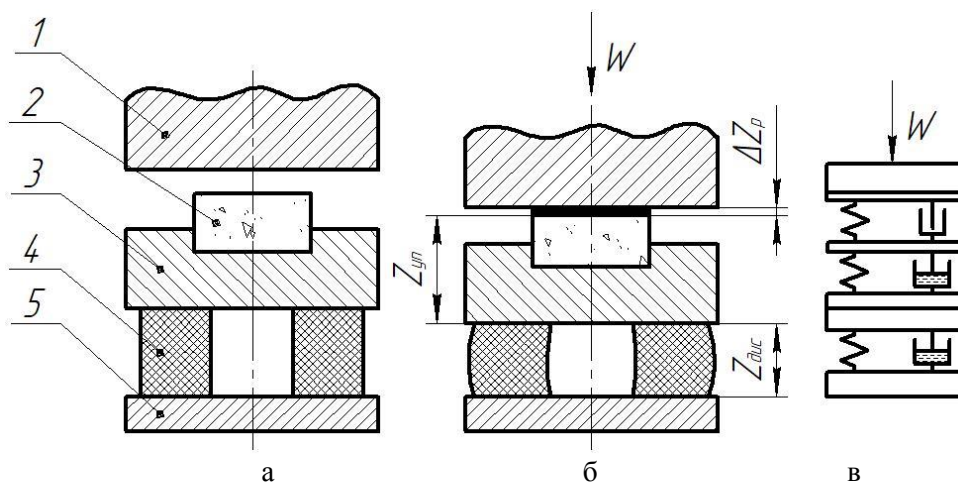


Рис. 1. Механические (а, б) и реологическая (в) модели испытания на ударно-абразивный износ порошковых материалов на УДП: 1 – боек (контртело); 2 – образец из испытуемого материала; 3 – оправка; 4 – упругодиссипативная подложка; 5 – опорная плита

Fig. 1. Mechanical (a, б) and rheological (в) models of testing for impact-abrasive wear of powder materials on the elastic-dissipative substrate: 1 is a striker (counterbody); 2 is a sample from the tested material; 3 is a mandrel; 4 is an elastic-dissipative substrate; 5 is a base plate

Величина  $\Delta Z_{\text{пл}}$  принимается равной высоте неровностей или определяется экспериментально по линейному износу испытуемого порошкового материала. Значения  $\Delta Z_{\text{упр}}$  испытуемых образцов с оправкой можно рассчитать, если известно напряженное состояние по следующей формуле [9]:

$$\sigma_{ij} = 3\lambda \varepsilon_{\text{ср}} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  и  $\mu$  – упругие константы Ляме;  $\varepsilon_{\text{ср}}$  – средняя упругая деформация пористого тела;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

Среднюю деформацию  $\varepsilon_{\text{ср}}$  деформируемого тела определяют по формуле

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{1}{3}(\lambda_{11} + \lambda_{22} + \lambda_{33}) = \frac{1}{3}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}), \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{22}$ ,  $\varepsilon_{33}$  – диагональные компоненты тензора деформаций.

Допускаем, что на торце цилиндрической подложки приложена ударная нагрузка, расположенная симметрично ее оси и распределена одинаково во всех меридианных сечениях. Тогда для осесимметричного напряженного и деформационного состояния в цилиндрических координатах, переходя к конечно-разностным методам, компоненты тензора деформации вычисляем по следующим выражениям [9, 10]:

$$\varepsilon_{\rho} = \frac{du_{\rho}}{d\rho}; \varepsilon_{\theta} = \frac{u_{\rho}}{\rho}; \varepsilon_z = \frac{du_z}{dz}; \gamma_{\rho z} = \frac{du_z}{d\rho} + \frac{du_{\rho}}{dz}, \quad (7)$$

где  $du_{\rho}, du_z$  – приращения радиуса вектора  $\rho$  и аппликаты  $z$  за один удар (максимальные амплитудные приращения).

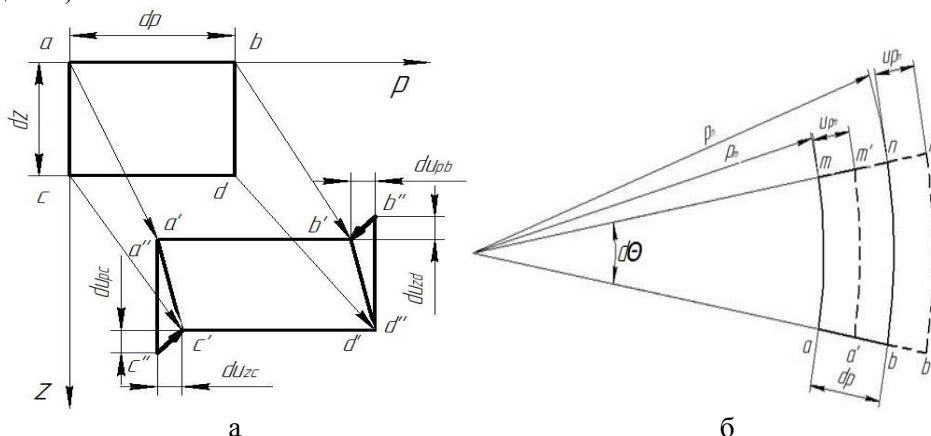


Рис. 2. Проекция представительного элемента УДП в цилиндрических координатах для определения приращений деформаций: а – боковая поверхность элемента; б – поверхность элемента в плоскости, перпендикулярной к оси симметрии

Fig. 2. Projections of a representative element of the elastic-dissipative substrate in cylindrical coordinates to determine the increments of deformations: a is a lateral surface of the element; б is a surface of the element in the plane perpendicular to the axis of symmetry

Приращения  $du_{\rho}, du_z$ , радиус вектора  $\rho$  и аппликаты  $z$  экспериментально определяли для каждого конечного элемента графическим способом по схеме, показанной на рис. 2.

Для этого на подложку из резины наносили сетку, как показано на рис. 3, выделяли малый объем (представительный элемент) двумя плоскостями, проходящими через ось симметрии, под углом  $d\theta$  между ними, двумя плоскостями, перпендикулярными к этой оси, и двумя цилиндрическими поверхностями с радиусами  $\rho$  и  $\rho + d\rho$ .

Из теории упругости известно, что удельная потенциальная энергия упругой деформации равна половине скалярного произведения тензора напряжений и тензора деформаций. Тогда согласно формуле (2) в главных осях получим

$$A_{\text{дис}} = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3). \quad (8)$$

Для осесимметричного напряженного состояния зависимости между напряжениями и деформациями линейные и имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\rho} - \varepsilon_{\text{ср}} &= \frac{1}{2G}(\sigma_{\rho} - \sigma_{\text{ср}}); \gamma_{\rho\theta} = 0; \\ \varepsilon_{\theta} - \varepsilon_{\text{ср}} &= \frac{1}{2G}(\sigma_{\theta} - \sigma_{\text{ср}}); \gamma_{\theta\rho} = \frac{1}{G}; \sigma_{\theta\rho} = 0; \\ \varepsilon_z - \varepsilon_{\text{ср}} &= \frac{1}{2G}(\sigma_z - \sigma_{\text{ср}}); \gamma_{z\rho} = \gamma_{\rho z} = \frac{1}{G}\sigma_{\rho z}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{1}{3}(\varepsilon_z + \varepsilon_{\rho} + \varepsilon_{\theta})$ ;  $\sigma_{\text{ср}} = \frac{1}{3}(\sigma_z + \sigma_{\rho} + \sigma_{\theta})$ ;

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}.$$

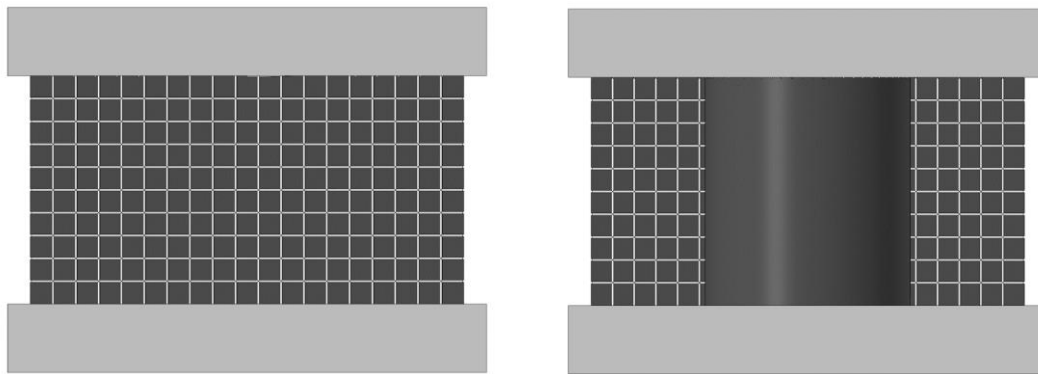


Рис. 3. Схема УДП с нанесенной сеткой на цилиндрической поверхности и сечении  
 Fig. 3. The scheme of the elastic-dissipative substrate with a grid applied on a cylindrical surface and the cross section

Если допускаем, что  $\gamma_{pz} \rightarrow 0$ , то есть форма диссипативной подложки не меняется при ударе, то  $\varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \varepsilon_\rho$  являются главными деформациями, а  $\sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_\rho$  – главными напряжениями. Тогда, решая совместно выражения (8) и (9), получаем

$$A_{\text{дис}} = \frac{1+\mu}{6E} \left[ (\sigma_z - \sigma_\rho)^2 + (\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 \right]. \quad (10)$$

С учетом бочкообразования при осадке подложки из резины, можно вычислить по формулам (9) сдвиговые напряжения  $\sigma_{z\rho}$  и деформации  $\gamma_{z\rho}$ , а диссипативную работу (работу, затраченную на упругую деформацию) определим по следующей формуле:

$$A_{\text{дис}} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \left[ (\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\rho)^2 \right], \quad (11)$$

где  $\varepsilon_i$  и  $\sigma_i$  – интенсивность деформаций и напряжений.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены цилиндрические УДП, состоящие из бутилкаучука и металлических шайб из нормализованной стали 45 (см. рис. 3). Металлические шайбы и резиновые цилиндрики без и с отверстием склеивали клеем на основе хлоропренового каучука. Горячедеформированные цилиндрические образцы из стали П40Х остаточной пористостью не более 2–4% получали по технологии, приведенной в работе [11]. Ударно-абразивную износостойкость оценивали на специально разработанной установке [12] при непрерывной подаче порошкообразного электрокорунда. Для экспериментального определения напряженно-деформированного состояния каждого элемента из 11-ти выделенных по высоте слоев подложку осаждали при нагрузке 300 Н на стенде, разработанном для статических

испытаний многослойных материалов [13]. Для изучения напряженно-деформированного состояния цилиндрических образцов с упругодиссипативной подложкой использовали также программный комплекс ANSYS Inc., в том числе ANSYS Mechanical [14]. Микрорентгеноспектральный анализ проводили в ЦКП ЮРГПУ(НПИ) на растровом электронном микроскопе Quanta 200 разрешающей способностью 5 нм, с рентгеновским микроанализатором EDAX GENESIS, оснащенный ЭВМ и соответствующим программным обеспечением.

### Результаты исследования и их обсуждение

При осадке резиновые подложки с нанесенной координатной сеткой с шагом 1 мм (см. рис. 3) принимали бочкообразную форму (рис. 4). После осадки измеряли конечную деформацию образца и выделенных слоев в направлении приложенной нагрузки и перпендикулярно ей. Используя схему на рис. 2, по формулам (7) и (9) вычисляли компоненты тензора деформаций и напряжений.

В табл. 1 приведены среднестатистические значения компонента деформаций и напряжений всех элементов каждого слоя, начиная с верхнего (слой 1) до нижнего (слой 11). Степень относительной деформации по высоте 1-го ( $\varepsilon_z = 0,155$ ) и 10-го ( $\varepsilon_z = 0,135$ ) слоев мало отличается, а минимальное значение (0,135) имеет средний (5) слой. Максимальные значения  $\varepsilon_\rho$  и  $\varepsilon_\theta$  имеют верхний и нижний слои, а минимальные значения получены у средних слоев, тогда как напряжения  $\sigma_\rho$  и  $\sigma_\theta$  у слоев 1 и 10 составляют 41,1 и 40,7 кПа, а слоя 5 – 36 и 35,5 кПа, что связано с появлением дополнительных сдвиговых напряжений в зоне контакта плит и образцов.

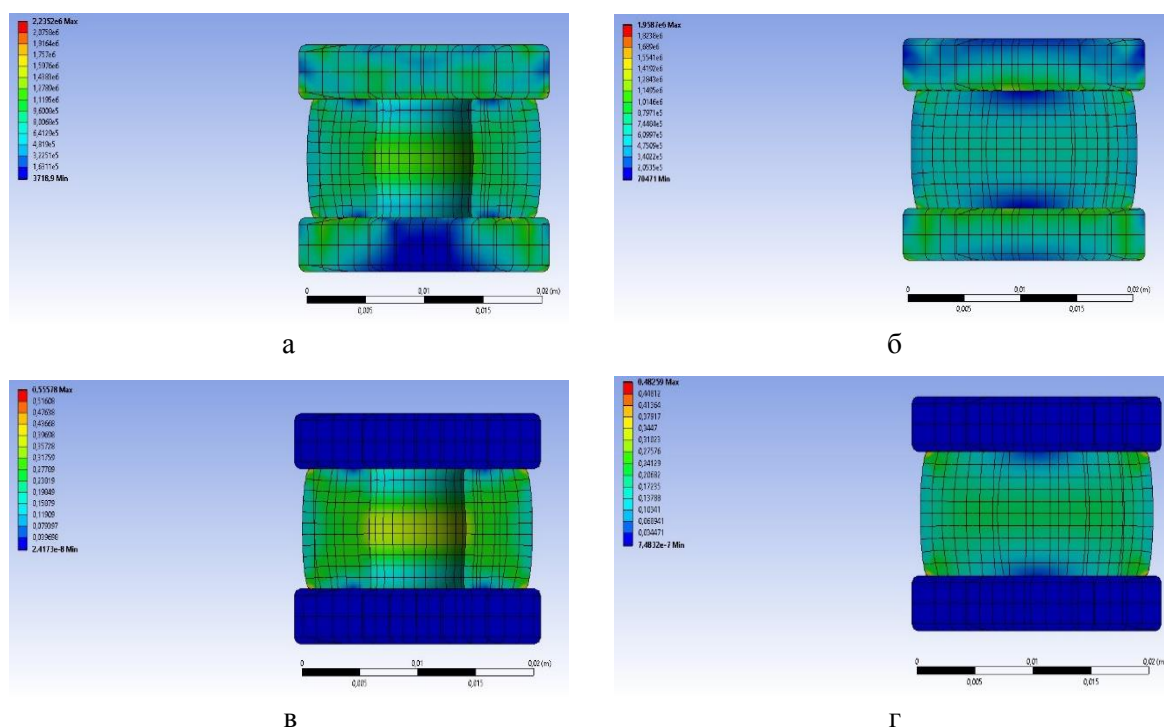


Рис. 4. Эпюры интенсивности напряжения (а, б) и деформации (в, г) при моделировании статической осадки УДП с отверстием (а, в) и без отверстия (б, г) в программном комплексе ANSYS Mechanical

Fig. 4. Diagrams of stress intensity (а, б) and deformation (в, г), when modeling static precipitation of the elastic-dissipative substrate with a hole (а, в) and without a hole (б, г) in the ANSYS Mechanical software suite

Таблица 1. Поля деформаций и напряжений упругодиссипативной подложки с отверстием после статической осадки под нагрузкой 300 Н

Table 1. Fields of deformations and stresses of the elastic-dissipative substrate with a hole after static precipitation under a load of 300 N

Представительный элемент слоя	$\epsilon_p$	$\epsilon_z$	$\epsilon_\theta$	$\epsilon_{cp}$	$\gamma_{pz}$	$\sigma_p$ , кПа	$\sigma_z$ , кПа	$\sigma_\theta$ , кПа	$\sigma_{pz}$ , кПа
1	0,158	0,155	0,156	0,157	0,268	41,1	40,3	40,7	34,8
2	0,153	0,150	0,152	0,152	0,258	39,8	39	39,5	33,5
3	0,148	0,145	0,146	0,147	0,245	38,5	37,7	38,9	31,8
4	0,143	0,140	0,142	0,142	0,235	37,2	36,4	37,1	30,1
5	0,138	0,135	0,136	0,137	0,225	36	35,1	35,5	29,3
6	0,138	0,135	0,136	0,137	0,225	36	35,1	35,5	29,3
7	0,143	0,140	0,142	0,142	0,235	37,2	36,4	37,1	30,1
8	0,148	0,145	0,146	0,147	0,245	38,5	37,7	38,9	31,8
9	0,153	0,150	0,152	0,152	0,258	39,8	39	39,5	33,5
10	0,158	0,155	0,156	0,157	0,268	41,1	40,3	40,7	34,8

На рис. 5, а показано изменение расчетных значений интенсивности напряжений и деформаций в УДП с отверстием при статической осадке.

Максимальные значения интенсивности напряжений  $\sigma_i$  и деформаций  $\epsilon_i$  получены для верхнего и нижнего слоев (60,3 кПа и 0,155). Они уменьшаются при приближении к центральным слоям (50,7 кПа и 0,130).

Значения интенсивности напряжений и деформаций были вычислены также по результатам моделирования в программном комплексе ANSYS Mechanical (рис. 5, б).

Сравнивая значения интенсивности напряжений и деформаций, показанные на рис. 5, можно сделать вывод о том, что оба способа могут быть использованы для оценки  $\sigma_i$  и  $\epsilon_i$  УДП.

Несколько другие значения напряжений и деформаций получены при испытании в тех же условиях цилиндрических УДП без отверстия (табл. 2). Сопротивление деформации такой подложки заметно выше, чем у подложки с отверстием. Например, средняя величина  $\epsilon_z$  верхнего слоя у подложки с отверстием составляет 0,11 (см. табл. 1), у подложки без отверстия  $\epsilon_z = 0,09$  (см. табл. 2). Аналогично значения  $\epsilon_p$ ,  $\epsilon_0$  и  $\gamma_{pz}$  получены у подложки без отверстия, которые несколько меньше, чем при осадке УДП с отверстием.

На рис. 6 показаны характерные особенности изменения по слоям интенсивности напряжений и деформаций при статической осадке подложки без отверстия. Полученные значения интенсивности напряжений ( $\sigma_i = 46,7$  кПа) и деформации

( $\epsilon_i = 0,12$ ), например, первого слоя, меньше, чем у УДП с отверстием, из-за большего сопротивления слоев при статической осадке.

Значения интенсивности напряжений и деформаций УДП без отверстия, полученные экспериментальным путем (рис. 6, а), сравнивали с результатами моделирования (рис. 6, б). Как следует из полученных результатов, расчетные значения  $\sigma_i$  и  $\epsilon_i$  практически не отличаются от результатов, определенных на основе моделирования процесса осадки с использованием программного комплекса ANSYS Inc.

Удельную работу деформации подложки с отверстием и без него вычисляли по формуле (11) для каждого слоя на основе результатов экспериментов, приведенных в табл. 1 и 2 и на рис. 5 и 6.

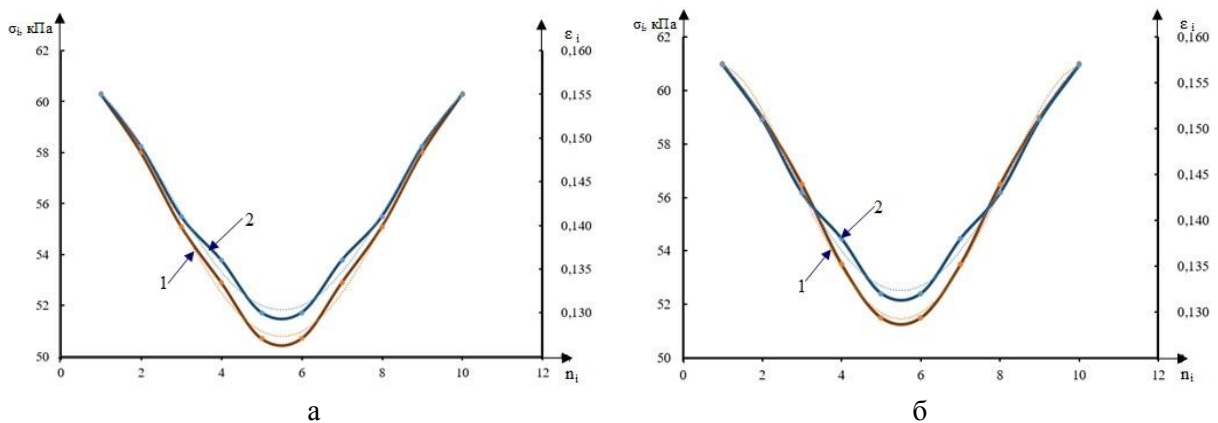


Рис. 5. Интенсивность напряжений (1) и деформаций (2) наружных представительных элементов слоев  $n_i$  УДП с отверстием при осадке: а – экспериментальные данные; б – вычисленные данные, используя ANSYS  
 Fig. 5. The intensity of stresses (1) and deformations (2) of the outer representative elements of the layers ( $n_i$ ) of the elastic-dissipative substrate with a hole during precipitation: a is experimental data; б is data calculated using ANSYS

Таблица 2. Поля деформаций и напряжений упругодиссипативной подложки без отверстия после осадки под нагрузкой 300 Н

Table 2. Fields of deformations and stresses of the elastic-dissipative substrate without a hole after precipitation under a load of 300 N

Представительный элемент слоя	$\epsilon_p$	$\epsilon_z$	$\epsilon_0$	$\epsilon_{cp}$	$\gamma_{pz}$	$\sigma_p$ , кПа	$\sigma_z$ , кПа	$\sigma_0$ , кПа	$\sigma_{pz}$ , кПа
1	0,112	0,11	0,112	0,111	0,208	29,1	28,6	29,1	27
2	0,107	0,105	0,107	0,106	0,198	27,9	27,3	27,8	25,7
3	0,102	0,1	0,102	0,101	0,188	26,5	26	26,6	24,4
4	0,098	0,095	0,097	0,096	0,178	25,3	24,7	25,2	23,1
5	0,094	0,09	0,092	0,092	0,168	24	23,4	23,9	21,9
6	0,094	0,09	0,092	0,092	0,168	24	23,4	23,9	21,9
7	0,098	0,095	0,097	0,096	0,178	25,3	24,7	25,2	23,1
8	0,102	0,1	0,102	0,101	0,188	26,5	26	26,6	24,4
9	0,107	0,105	0,107	0,106	0,198	27,9	27,3	27,8	25,7
10	0,112	0,11	0,112	0,111	0,208	29,1	28,6	29,1	27

Как следовало ожидать, с увеличением компонент радиальной и угловой деформаций ( $\varepsilon_\theta$ ,  $\varepsilon_\rho$ ) каждого слоя возрастает диссипативная работа подложки (рис. 7). При наличии отверстий в УДП эта разница существенная. В частности,  $A_{\text{дис}}$  средних слоев УДП с отверстием и без него отличаются в 1,5–2 раза, а верхних и нижних слоев – не более чем на 15–20% (рис. 7, кривые 1 и 2). Это означает, что при наличии отверстия в УДП работа, затраченная на упругопластическую деформацию рабочего слоя испытываемого образца 3 (см. рис. 1), будет также в 1,5–2 раза меньше, чем при

использовании резиновой упругодиссипативной подложки без отверстия, что подтверждают экспериментальные результаты.

На рис. 8 показано влияние характеристик УДП и цикла ударно-абразивных испытаний горячештампованной стали П40Х (без термообработки) на интенсивность износа (потери массы) образцов. Как и следовало ожидать, при использовании УДП с отверстием потери массы при установившемся режиме ударно-абразивного испытания снижаются с 0,04 до 0,008 г по сравнению с результатами испытания без УДП.

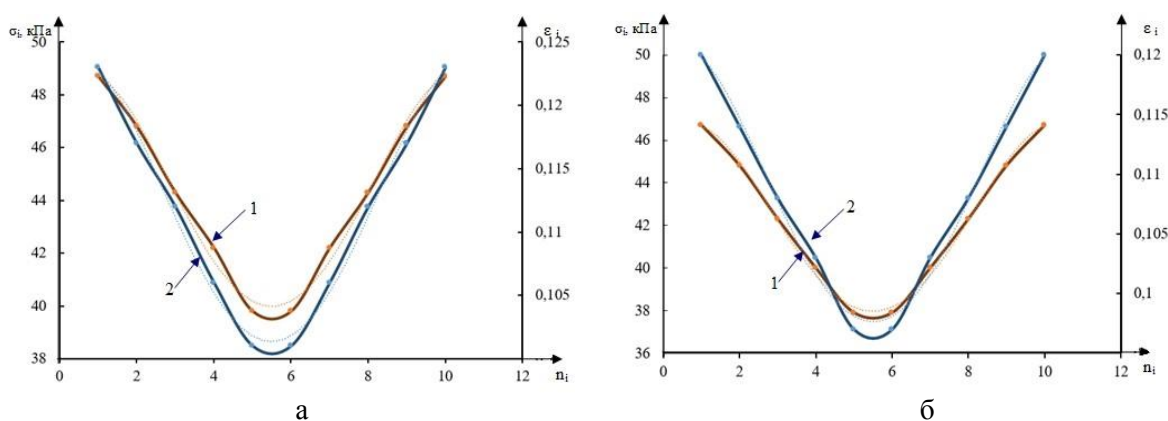


Рис. 6. Интенсивность напряжений (1) и деформаций (2) наружного представительного элемента  $n_i$  УДП без отверстия при статической осадке: а – экспериментальные данные; б – данные моделирования в ANSYS  
 Fig. 6. The intensity of stresses (1) and deformations (2) of the external representative element  $n_i$  of the elastic-dissipative substrate without a hole during static precipitation: a is experimental data; б is data modeled in ANSYS

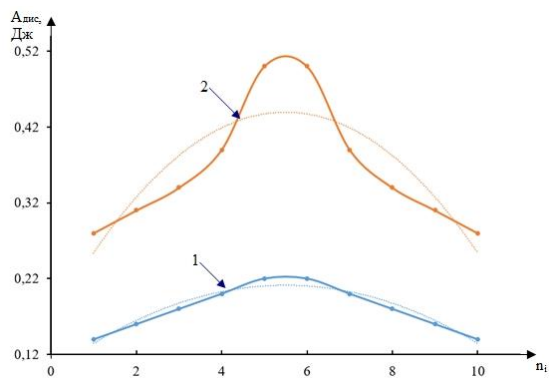


Рис. 7. Зависимость работы деформации УДП каждого слоя УДП: 1 – без отверстия; 2 – с отверстием  
 Fig. 7. Dependence of the deformation behavior of the elastic-dissipative substrate of every elastic-dissipative substrate layer: 1 is without a hole, 2 is with a hole

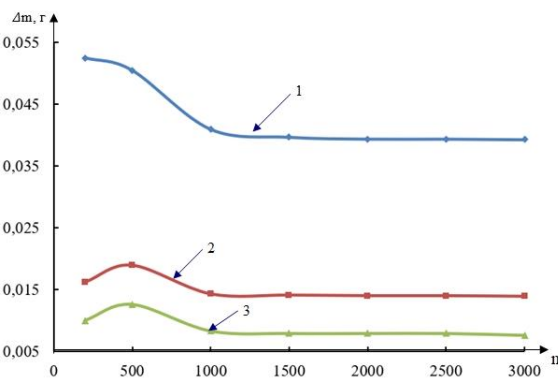
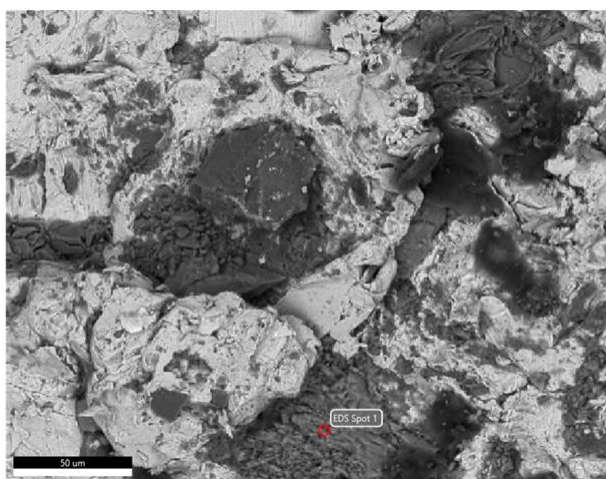


Рис. 8. Влияние характеристик УДП на интенсивность износа горячештампованной стали П40Х: 1 – без УДП; 2 – УДП без отверстия; 3 – УДП с отверстием  
 Fig. 8. Influence of elastic-dissipative substrate characteristics on the wear rate of hot-stamped steel P40Kh: 1 is without the elastic-dissipative substrate; 2 is the elastic-dissipative substrate without a hole; 3 is the elastic-dissipative substrate with a hole

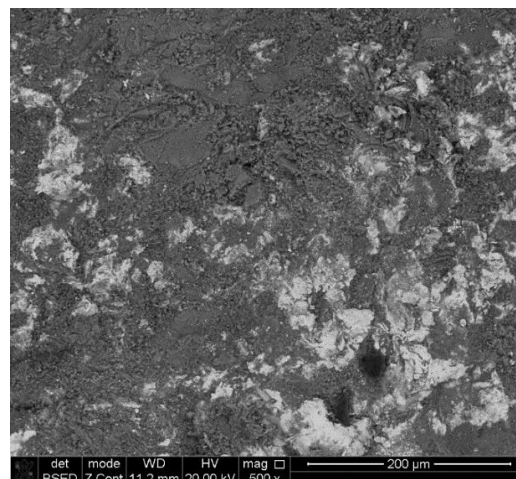
Было также исследовано влияние химического состава порошков, абразива и особенности разрушения стали П40Х в зоне деформации при ударно-абразивном испытании. На первом этапе износ материала образцов возрастает пропорционально энергии удара в результате внедрения твердых абразивных частиц в частицы порошка и в межчастичные границы (рис. 9, а), трещины при этом появляются и развиваются в большей степени по границам частиц порошка железа. На втором этапе происходит замедление интенсивности износа из-за упрочнения в металле в зоне удара. Кроме этого, с увеличением количества ударов практически вся поверхность зоны деформации испытуемых образцов покрывается вдавленными в материал частицами железа с абразивными включениями (рис. 9, б), соответственно, снижается интенсив-

ность износа поверхности образцов с увеличением времени испытания (см. рис. 8).

Было выявлено, что характер износа зависит также от состава абразивного порошка. В частности, частицы оксидов кремния и алюминия меньше разрушаются при ударе и больше вдавливаются в материал образца (см. рис. 9, а), что активизирует процесс разрушения поверхности, а другие примеси (например, карбонаты кальция и магния) сами разрушаются при ударе, их микрочастицы заполняют микропоры и другие кристаллические дефекты частиц и покрывают более равномерно поверхность испытания образцов (см. рис. 9, б). Этим можно объяснить также снижение интенсивности износа образца с увеличением количества ударов на стадии установившегося износа.



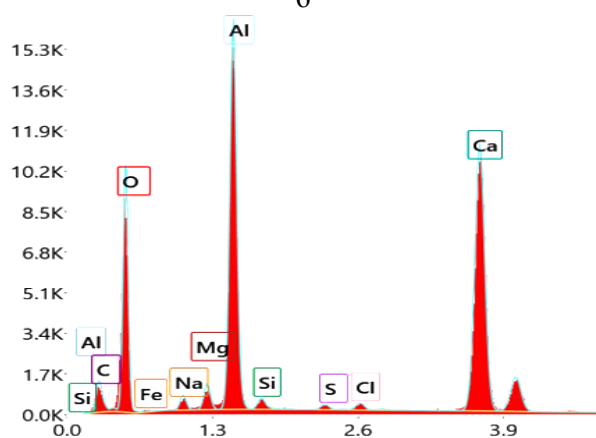
а



б

Element	Weight %	MDL	Atomic %	Error %
C K	6.1	0.34	10.5	12.7
O K	45.5	0.12	58.8	10.5
Na K	1.4	0.09	1.3	11.4
Mg K	1.5	0.05	1.2	9.1
Al K	18.6	0.05	14.2	6.3
Si K	0.6	0.05	0.4	10.6
S K	0.3	0.05	0.2	15.7
Cl K	0.4	0.05	0.3	11.4
Ca K	24.7	0.07	12.7	2.4
Fe K	0.9	0.12	0.3	8.7

в



г

Рис. 9. Микроструктура поверхности стали П40Х на стадии интенсивного износа (а), в установившемся режиме износа (б) и распределение компонентов в абразивных частицах (в, г)  
 Fig. 9. The surface microstructure of steel P40Kh at the stage of intensive wear (a), in the steady-state wear mode (б) and the distribution of components in abrasive particles (в, г)

### Заключение

Разработан метод определения напряженно-деформированного состояния резиновой упруго-диссипативной подложки и показано влияние интенсивности напряжений и деформаций на работу диссипации при испытании конструкционных сталей на ударно-абразивную износостойкость.

Установлено, что при ударно-абразивном испытании конструкционной стали П40Х, полученной горячей штамповкой пористых спеченных заготовок, с использованием резиновой УДП величина поглощенной энергии зависит не только от физико-механических свойств УДП, но и от ее геометрических параметров.

Экспериментально показано, что при одинаковой высоте резиновой УДП с отверстием работа диссипации, соответственно, ударно-абразивная износостойкость испытуемого материала в 1,5–2 раза больше, чем при использовании УДП без отверстия.

Показано влияние химического состава абразивных частиц на механизм разрушения поверхности порошковых сталей на начальной стадии испытания и в режиме установившегося износа. Выявлен механизм разрушения поверхности порошковых образцов при ударно-абразивном износе.

### Список литературы

1. Трение, изнашивание и смазка: справочник / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алинина. М.: Машиностроение, 1978. Кн.1. 400 с.
2. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Износостойкость сталей и сплавов: учеб. пособие для вузов. М.: Нефть и газ, 1994. 417 с.
3. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 222 с.
4. Абдюкова Р.Я., Багаутдинов Н.Я. Анализ причин отказов клапанов буровых насосов // Эксплуатация нефтяных и газовых месторождений и подготовка нефти. 2012. № 4. С. 66–70.
5. Гасанов Б.Г., Сиротин П.В. Порошковые материалы для деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания // Металлург. 2011. № 3. С. 61–64.
6. Гасанов Б.Г., Бабеев А.В., Баев С.С. Влияние химического состава на жаростойкость и ударную износостойкость материалов на основе распыленных порошков высокохромистой стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т19. №4. С. 45–55. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-79-89

7. Сиротин П.В., Гасанов Б.Г., Исмаилов М.А. Оценка возможности повышения ударно-абразивной износостойкости композиционных материалов за счет оптимизации их упругодиссипативных свойств // Актуальные проблемы порошкового материаловедения: материалы международной научно-технической конференции. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. Т. 1. С. 287–295.
8. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1980. 456 с.
9. Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Теория пластичности. М.: Металлургия, 1987. 352 с.
10. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1978. 360 с.
11. Промышленная технология горячего прессования порошковых изделий / Ю.Г. Дорофеев, Б.Г. Гасанов, В.Ю. Дорофеев, В.Н. Мищенко, В.И. Мирошников. М.: Металлургия, 1990. 206 с.
12. Пат. 2434219 Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Установка для испытания на ударно-абразивное и ударно-гидроабразивное изнашивание конструкционных и специальных материалов / Б.Г. Гасанов, П.В. Сиротин, А.Д. Ефимов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова». №2009146684/28; заявл. 15.12.2009; опубл. 20.06.2011.
13. Пат. 2725530 Российская Федерация, МПК G01N 3/08. Стенд для статических испытаний композиционных многослойных материалов (Варианты) / П.В. Сиротин, М.А. Исмаилов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова». №2019132563; заявл. 14.10.2019; опубл. 02.07.2020.
14. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 149 с.: ил.

### References

1. Kragelsky I.V., Alisin V.V. *Trenie, iznashivanie i smazka: Spravochnik* [Friction, wear and lubrication: Handbook]. Moscow: Mechanical engineering, 1978, book 1, 400 p. (In Russ.)
2. Vinogradov V.N., Sorokin G.M. *Iznosostoykost staley i splavov: ucheb. posobie dlya vuzov* [Wear resistance of steels and alloys: textbook for universities]. Moscow: Oil and Gas, 1994, 417 p. (In Russ.)
3. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokolnikov M.G. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow: Mechanical engineering, 1990, 222 p. (In Russ.)
4. Abdyukova R.Ya., Bagautdinov N.Ya. Analysis of the causes of drilling pump valve failures. *Eksploatatsiya neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy i podgotovka nefii*

- [Exploitation of oil and gas fields and oil preparation], 2012, no. 4, pp. 66–70. (In Russ.)
5. Gasanov B.G., Sirotnin P.V. Powder materials for parts operating under shock-abrasive wear. *Metallurg* [Metallurgist], 2011, no. 3, pp. 61–64. (In Russ.)
  6. Gasanov B.G., Babets A.V., Baev S.S. Influence of a chemical composition on heat resistance and impact wear resistance of materials based on sprayed powders of high-chromium steel. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2021, vol. 19, no. 4, pp. 45–55. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-79-89
  7. Sirotnin P.V., Gasanov B.G., Ismailov M.A. Evaluation of the possibility of increasing impact-abrasive wear resistance of composite materials by optimizing their elastic-dissipative properties. *Aktualnye problemy poroshkovogo materialovedeniya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Current issues of powder materials science: proceedings of the international scientific and technical conference]. Perm: Publishing house of Perm National Research Polytechnic University], 2018, vol. 1, pp. 287–295. (In Russ.)
  8. Gun G.Ya. *Teoreticheskie osnovy obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow: Metallurgy, 1980, 456 p. (In Russ.)
  9. Arkulis G.E., Dorogobid V.G. *Teoriya plastichnosti* [Theory of plasticity]. Moscow: Metallurgy, 1987, 352 p. (In Russ.)
  10. Gromov N.P. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow: Metallurgy, 1978, 360 p. (In Russ.)
  11. Dorofeev Yu.G., Gasanov B.G., Dorofeev V.Yu., Mishchenko V.N., Miroshnikov V.I. *Promyshlennaya tekhnologiya goryachego pressovaniya poroshkovykh izdeliy* [Industrial technology of hot pressing of powder products]. Moscow: Metallurgy, 1990, 206 p. (In Russ.)
  12. Gasanov B.G., Sirotnin P.V., Efimov A.D. *Ustanovka dlya ispytaniya na udarno-abrazivnoe i udarno-gidroabrazivnoe iznashivanie konstruktsionnykh i specialnykh materialov* [Installation for testing for impact-abrasive and impact-hydroabrasive wear of structural and special materials]. Patent RU, no. 2434219, 2011.
  13. Sirotnin P.V., Ismailov M.A. *Stend dlya staticheskikh ispytaniy kompozitsionnykh mnogosloynnykh materialov (Varianty)* [Stand for static testing of composite multi-layer materials (Options)]. Patent RU, no. 2725530, 2020.
  14. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Kuraeva Ya.V. *Inzhenerny analiz v ANSYS Workbench: ucheb. posobie* [Engineering analysis in ANSYS Workbench: textbook]. Samara: Samara State Technical University, 2013, 149 p. (In Russ.)

Поступила 11.04.2022; принята к публикации 25.04.2022; опубликована 28.06.2022  
Submitted 11/04/2022; revised 25/04/2022; published 28/06/2022

**Сиротин Павел Владимирович** – кандидат технических наук, доцент,  
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,  
Новочеркасск, Россия. Email: spv\_61@mail.ru

**Гасанов Бадрудин Гасанович** – доктор технических наук, профессор,  
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,  
Новочеркасск, Россия. Email: kafmlsik@gmail.com

**Исмаилов Маркиз Азизович** – старший преподаватель,  
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,  
Новочеркасск, Россия. Email: al\_myalim@mail.ru. ORCID 0000-0003-1588-7444

**Дробязко Никита Александрович** – магистр,  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия.  
Email: nikitoideys@mail.ru

**Pavel V. Sirotnin** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.  
Email: spv\_61@mail.ru

**Badrudin G. Gasanov** – DrSc (Eng.), Professor,  
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.  
Email: kafmlsik@gmail.com

**Markiz A. Ismailov** – Senior Lecturer,  
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.  
Email: al\_myalim@mail.ru. ORCID 0000-0003-1588-7444

**Nikita A. Drobyazko** – master’s degree,  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.  
Email: nikitoideys@mail.ru