

Б. Г. Гасанов, М. А. Исмаилов

**ЗАВИСИМОСТЬ УДАРНО-АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ОТ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗИНОВОЙ ПРОСЛОЙКИ**

Южно-Российский государственный политехнический университет

им. М. И. Платова, г. Новочеркасск

email: kafmlsik@gmail.com

Установлено, что при ударно-абразивном испытании слоистых композиционных материалов из сталей 40Х, П40Х и резины величина поглощенной энергии зависит не только от физико-механических свойств материалов, но и от геометрических параметров упруго-диссипативного слоя. Ударно-абразивная износостойкость слоистых композиционных материалов в 1,5–2 раза больше, чем при использовании износостойких сталей. Предложен метод определения деформированного состояния резиновой упруго-диссипативной подложки слоистых композиционных материалов, и показано влияние интенсивности напряжений и деформаций на работу диссипации при испытании конструкционных сталей на ударно-абразивную износостойкость. Исследовано влияние режима термической обработки рабочего слоя из стали 40Х на ударно-абразивный износ СКМ. Выявлен механизм разрушения поверхности спеченных конструкционных сталей при ударно-абразивном износе.

Ключевые слова: слоистый композиционный материал, напряженно-деформированное состояние, диссипативная подложка, ударно-абразивная износостойкость

B. G. Gasanov, M. A. Ismailov

**DEPENDENCE OF IMPACT AND ABRASIVE WEAR RESISTANCE
OF LAYERED COMPOSITE MATERIALS
ON THE DEFORMED STATE OF THE RUBBER LAYER**

**Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
Novocherkassk**

It is established that during impact-abrasive testing of layered composite materials made of 40X, P40X and rubber steels, the amount of absorbed energy depends not only on the physical and mechanical properties of the materials, but also on the geometric parameters of the elastic-dissipative layer. The impact and abrasive wear resistance of layered composite materials is 1.5-2 times greater than when using wear-resistant steels. A method for determining the deformed state of a rubber elastic-dissipative substrate of layered composite materials is proposed and the effect of stress and strain intensity on the dissipation operation when testing structural steels for impact and abrasive wear resistance is shown. The influence of the heat treatment regime of the 40X steel working layer on the impact and abrasive wear of the SCM is investigated. The mechanism of destruction of the surface of sintered structural steels during impact and abrasive wear has been revealed.

Keywords: Layered composite material, stress-strain state, dissipative substrate, impact and abrasive wear resistance

Введение

Среди материалов, применяемых для повышения эксплуатационной надежности оборудования и машин, резинотехнические изделия занимают особое место благодаря свойственной им эластичности и коррозионной стойкости, позволяющей выдерживать без разрушения значительные деформации, не допустимые для многих конструкционных материалов [1; 2]. Это особо относится к деталям и агрегатам буровых насосов, строительно-дорожных машин и технологического оборудования, детали которых работают в условиях абразивного и ударно-абразивного воздействия [3; 4].

Выявлено, что резиновые покрытия, нанесенные на стальные изделия, работают значительно дольше, если улучшить технологию гуммирования [5]. Экспериментально обосновано, что применение резиновых подложек, называемые также упруго-диссипативными (УДП), позволяют увеличить износостойкость конструкционных сталей за счет поглощения и рассеивания части энергии удара [6; 7]. Анализ этих и других публикаций показал, что недостаточно исследовано влияние деформированного состояния резиновой прослойки слоистых материалов или УДП на ударно-абразивную износостойкость изделий на их основе.

Целью данной работы является исследование влияния деформированного состояния резиновой подложки на ударно-абразивную изно-

состоятельность резинометаллических слоистых композиционных материалов.

**Материалы и методы
исследования**

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены цилиндрические образцы с рабочим слоем из стали 40X и резины (рис. 1). Металлические пластинки и резиновые цилиндрики без и с отверстием склеивали клеем на основе хлоропренового каучука или соединяли в процессе горячей вулканизации под давлением. Ударно-абразивную износостойкость оценивали на специально разработанной установке [8] при непрерывной подаче порошка электрокорунда. Для экспериментального определения деформированного состояния отдельных элементов слоистого образца осаждали при нагрузке 300 Н на стенде, разработанного для статических испытаний двух и многослойных материалов [9]. Для изучения деформированного состояния резиновой упруго-диссипативной подложки использовали также программный комплекс ANSYS Inc., в том числе ANSYS Mechanical [10]. 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.

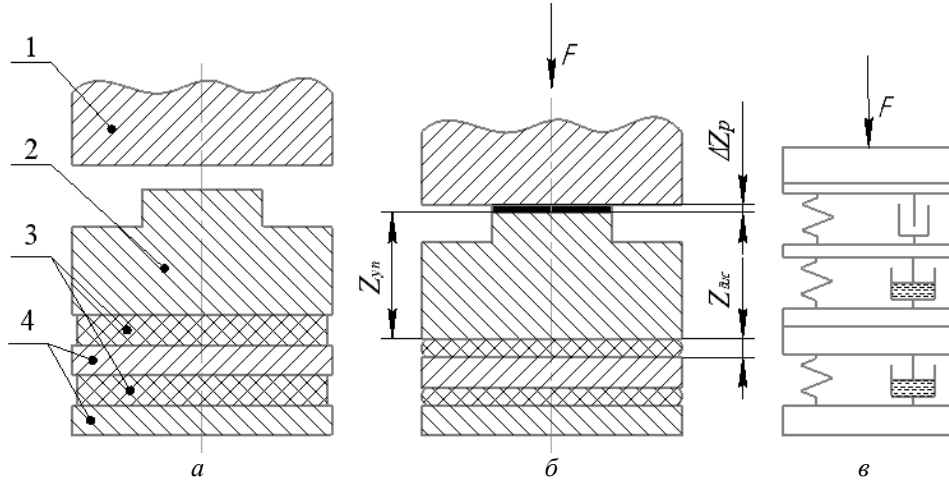


Рис. 1. Механические (а, б) и реологическая (в) модели испытания на ударно-абразивный износ рабочей поверхности СКМ:

1 – боек (контртело); 2 – образец из стали 40Х; 3 – упруго-диссипативная резиновая подложка; 4 – стальная шайба

Для аналитического описания реологии механической модели испытания слоистых композиционных материалов (СКМ) на ударно-абразивную износостойкость, показанной на рис. 1, использовали закон сохранения энергии или баланса работы. Суммарная работа ($A_{уд}$), совершаемая бойком 1, затрачивается на пластическую деформацию испытываемого образца 2 вдавливанием абразивных частиц (A_p), на упругую деформацию стальных колец 3 и 5 ($A_{упр}$) и упруго-диссипативную работу резиновой подложки 4 ($A_{дис}$):

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

Если известны компоненты тензоров напряжений и деформаций любого слоя СКМ, то работа его пластической и упругой деформации можно определить по следующим формулам [11]:

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

Из выражений (2) следует, что для определения диссипативной работы каждого элемента СКМ в данной модели нужно найти компоненты тензоров деформаций и напряжений материальных точек и вычислить по ним значения главных деформаций и напряжений.

Диссипативная работа подложки зависит от физических характеристик демфера (резины), амплитуды (γ_i) и частоты (ω) гармонических колебаний деформации [12]:

$$A_{дис} = \int_0^t \sigma(t) d\varepsilon_z \quad (3)$$

Колебания деформации подложки приводит к появлению осциллирующих напряжений, которые выражаются следующим образом [14]

$$\sigma(t) = \sigma_0 \gamma(t) + \sigma_0 e^{i(\omega t + \delta)} \quad (4)$$

где $\gamma(t) = \gamma_0 e^{i\omega t}$ – деформация подложки, изменяющаяся по гармоническому закону; δ – угол возможных остаточных напряжений по отношению к изменению деформации; σ_0 – мгновенный модуль сдвига при упругой деформации подложки.

Для определения НДС необходимо разработать или специальную программу, или подобрать такие формулы, в которых характеристики диссипативной подложки можно было задать через константы:

$$E = 2G(1 + \mu), \quad (5)$$

где E – упругости Юнга; G – модуль упругости при сдвиге (Гука); μ – коэффициент Пуассона. Для резины $\mu = 0,5$.

Если известны главные удлинения, то для расчета главных напряжений используют следующую систему [13]:

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_3 &= \frac{E}{3} (\lambda_1^2 - \lambda_3^2); \\ \sigma_2 - \sigma_3 &= \frac{E}{3} (\lambda_2^2 - \lambda_3^2), \\ \sigma_{ij} &= 3\lambda \varepsilon_{cp} \delta_{ij} + 2\mu_{ij}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – главные деформации; E – модуль упругости резины, λ и μ – упругие константы Ляме; ε_{cp} – средняя деформация рассматриваемого элемента; δ_{ij} – символ Кронекера.

Поэтому для определения диссипативной работы каждого слоя СКМ в данной модели нужно найти компоненты тензоров деформаций и напряжений материальных точек резиновой подложки и вычислить по ним значения главных деформаций и напряжений.

Среднюю деформацию представительных

элементов СКМ определяли по следующей формуле:

$$\varepsilon_{cp} = \frac{1}{3}(\lambda_{11} + \lambda_{22} + \lambda_{33}) = \frac{1}{3}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}), \quad (7)$$

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

Допускаем, что на торце цилиндрической подложки приложена нагрузка, расположенная симметрично ее оси и распределена одинаково во всех сечениях. Тогда в меридианных плоскостях резиновой подложки не могут возникнуть касательные напряжения вследствие симметрии нагрузки. Следовательно, напряжение $\sigma_\theta = \sigma_2$ всегда является главным, всего будет 3 нормальных ($\sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_z$) и два равных между собой касательных напряжения ($\sigma_{\rho z} = \sigma_{z\rho}$).

Для индексации исследуемого элемента резиновой подложки введем обозначение ПЭ_{kl}, где k соответствующая строка, а l – столбец. Критические точки (вершины) представитель-

ного элемента обозначим буквами, как это показано на (рис. 2, б и в) элемент ПЭ₁₁. При осесимметричном напряженном состоянии перемещения в тангенциальном направлении практически отсутствуют и удлинение представительного элемента подложки происходит вследствие радиальных деформаций (рис. 3). Поэтому компоненты тензора деформации вычислили по следующим выражениям:

$$\varepsilon_\rho = \frac{du_\rho}{d\rho}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_\rho}{\rho}; \quad \varepsilon_z = \frac{du_z}{dz}; \quad \gamma_{\rho z} = \frac{du_z}{d\rho} + \frac{du_\rho}{dz}. \quad (8)$$

Переход выражения (8) к конечно-разностным методам можно написать в следующем виде:

$$\varepsilon_\rho = \frac{\Delta u_\rho}{\Delta \rho}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_\rho}{\rho}; \quad \varepsilon_z = \frac{\Delta u_z}{\Delta z}; \quad \gamma_{\rho z} = \frac{\Delta u_z}{\Delta \rho} + \frac{\Delta u_\rho}{\Delta z}, \quad (9)$$

где $\Delta u_\rho, \Delta u_z$ – максимальные амплитудные приращения радиуса вектора ρ и аппликаты z за один удар.

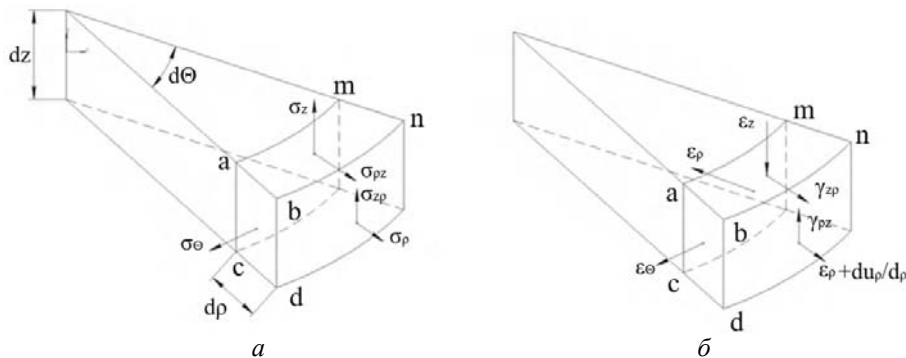


Рис. 2. Схема для оценки напряженного (а) и деформированного (б) состояния представительного элемента $dz, d\theta$ и $d\rho$ диссипативной подложки

Приращения $\Delta u_\rho, \Delta u_z$ радиус вектора ρ и аппликаты z определяли для каждой критической

точки графическим способом по схеме, показанной на рис. 3.

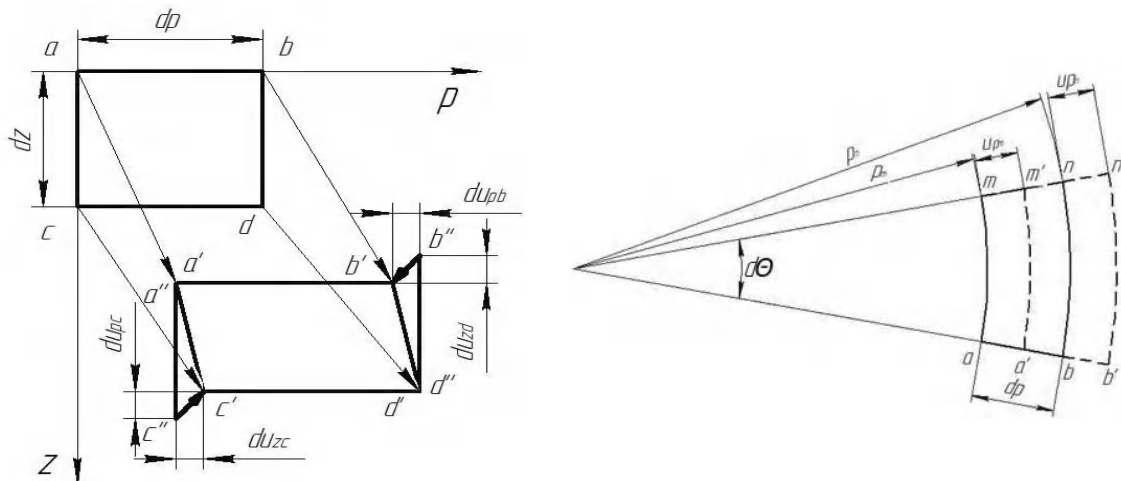


Рис. 3. Схема деформации представительного элемента упруго-диссипативной подложки

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

$$A_{\text{упр}} = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3), \quad (10)$$

$$\varepsilon_\rho - \varepsilon_{cp} = \frac{1}{2G}(\sigma_\rho - \sigma_{cp}); \gamma_{\rho\theta} = 0;$$

$$\varepsilon_\theta - \varepsilon_{cp} = \frac{1}{2G}(\sigma_\theta - \sigma_{cp}); \gamma_{\theta\rho} = \frac{1}{G}; \sigma_{\theta\rho} = 0; \quad (11)$$

$$\varepsilon_z - \varepsilon_{cp} = \frac{1}{2G}(\sigma_z - \sigma_{cp}); \gamma_{z\rho} = \gamma_{\rho z} = \frac{1}{G}\sigma_{\rho z},$$

где $\varepsilon_{cp} = \frac{1}{3}(\varepsilon_z + \varepsilon_\rho + \varepsilon_\theta)$; $\sigma_{cp} = \frac{1}{3}(\sigma_z + \sigma_\rho + \sigma_\theta)$; $G = \frac{E}{2}(1 + \mu)$

Подставляя выражения (6) и (11) в формулу (10), имеем

$$A_{\text{упр}} = \frac{1+\mu}{6E}(\sigma_z + \sigma_\rho)^2 + (\sigma_\rho + \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta + \sigma_z)^2. \quad (12)$$

Для моделирования и расчета напряженно-деформированного состояния цилиндрических образцов с упруго-диссипативной подложкой использовали программный комплекс ANSYS Inc., в том числе ANSYS Mechanical, основанный на методе конечных элементов [10].

Результаты исследования и их обсуждение

После осадки образцов СКМ замеряли их конечную деформацию в направлении прило-

где σ_i и ε_i – главные напряжения и главные деформации.

Для осесимметричного напряженного состояния зависимости между напряжениями и деформациями линейные и выражения (6) запишем в развернутом виде:

женной нагрузки и перпендикулярно ей, его слоев и отдельных элементов согласно схем, приведенных на (рис. 2 и 3), а также по формулам (9).

Основные расчеты при оценке напряженно-деформированного состояния проводили, используя модель упруго-диссипативной подложки, построенной в ANSYS с использованием МКЭ (рис. 4, а).

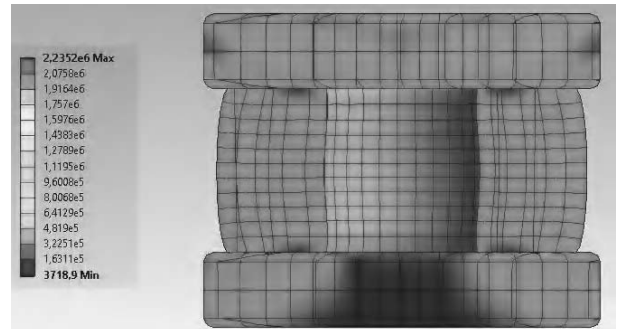
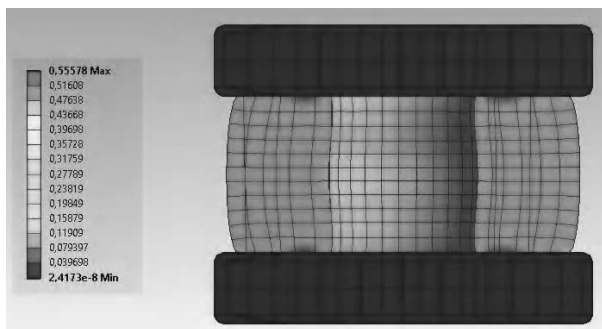


Рис. 4. Эпюры интенсивности деформации (а) и напряжения (б) при моделировании статической осадки УДП

Поскольку при осадке резиновые подложки с нанесенной координатной сеткой с шагом 1 мм принимают бочкообразную форму

(рис. 4, б), то сдвиговые напряжения $\sigma_{z\rho}$ и деформации $\gamma_{z\rho}$ определяли по следующим выражениям [14]:

$$\varepsilon_\rho - \varepsilon_{cp} = \frac{1}{2G}(\sigma_\rho - \sigma_{cp}); \gamma_{\rho\theta} = 0;$$

$$\varepsilon_\theta - \varepsilon_{cp} = \frac{1}{2G}(\sigma_\theta - \sigma_{cp}); \gamma_{\theta\rho} = \frac{1}{G}; \sigma_{\theta\rho} = 0. \quad (13)$$

Тогда зависимость (12) можно записать в следующем виде:

$$A_{\text{упр}} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} (\sigma_\rho + \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta + \sigma_z)^2 + (\sigma_z + \sigma_\rho)^2, \quad (14)$$

где ε_i и σ_i – интенсивность деформаций и напряжений.

Значения ε_i и σ_i рассчитывали по следующим формулам:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_\rho - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_\rho)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{\rho z}} \quad (15)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\rho)^2 + 6 \cdot \sigma_{\rho z}^2} \quad (16)$$

Для оценки характера распределения деформаций и напряжения по слоям обозначим каждый слой по высоте – $N_{пр} = n_i/n_{об}$ и по радиусу – $R_{пр} = r_i/r_{об}$. (где n_i и r_i – рассматриваемые слои по высоте и радиусу, $n_{об}$ и $r_{об}$ – общее количество слоев). Исследования показали, что при нагрузках в интервале 300–600 Н степень относительной деформации по высоте ε_z резиновой подложки любого слоя практически не зависит от радиуса вектора r и в большей степени на ε_z влияет ее высота. В частности, относительная степень деформации ε_z верхнего и нижнего слоев резиновой подложки без от-

верстия, контактирующих со слоем из стали 40Х, составляет 0,095 – 0,096, минимальное значение ($\varepsilon_z = 0,074$ –0,075) имеет средний слой (рис. 5, кривая 1). При наличии отверстия в резиновой подложке максимальные значения ε_z (0,11) получены в слоях, контактирующих со стальными прослойками (рис. 5, кривая 2), а у средних слоев $\varepsilon_z = 0,087$ –0,88. Напряжения σ_ρ и σ_θ у слоев 1 и 10 не превышают 25–25,5 кПа, а в средних слоях $\sigma_\rho = 23,7$ кПа (рис. 6, б), что связано появлением дополнительных сдвиговых напряжений в зоне контакта стальной шайбы с резиной.

Если условно разделить резиновую подложку на кольца по радиусу толщиной стенки и высотой 1 мм и определить значения ε_ρ каждого ее элемента, как это показано на (рис. 2–4), то можно установить зависимость компонент деформаций ε_ρ от радиуса и высоты резинового слоя СКМ. Как это видно из (рис. 6, а) значения ε_ρ в меньшей степени зависят от радиуса и в основном на ε_ρ влияет высота резинового слоя. В частности, относительная радиальная деформация σ_ρ выделенных на (рис. 2, б) слоев резиновой подложки изменяется в пределах от 0,075 до 0,105 (рис. 6, а). Аналогичный характер имеет зависимость компонент тензора напряжений σ_ρ от радиуса и высоты подложки (рис. 6, б).

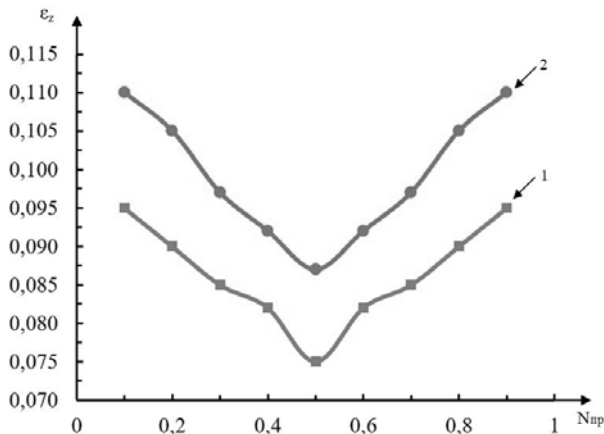


Рис. 5. Влияние $N_{пр}$ на относительную деформацию слоя $N_{пр} = 0,5$:
1 – без отверстия; 2 – с отверстием

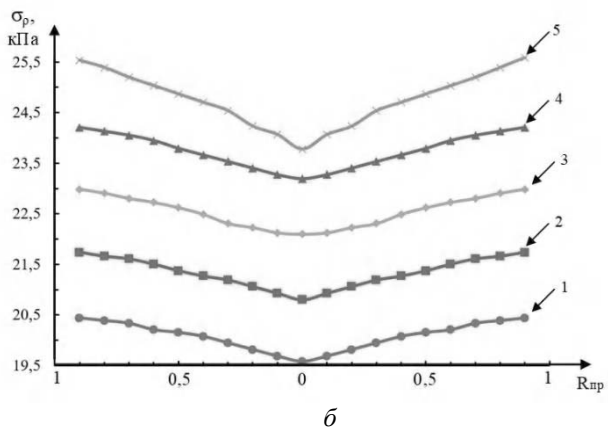
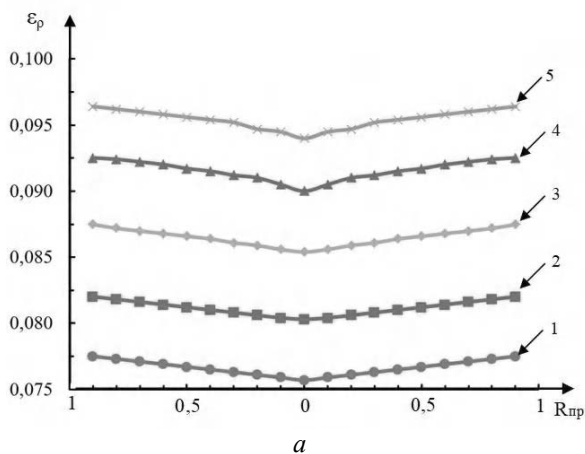


Рис. 6. Влияние приведенных высоты и радиуса на относительную степень деформации ε_ρ (а) и напряжений σ_ρ (б) резинового слоя $N_{пр}$:
1 – 0,5; 2 – 0,6; 3 – 0,7; 4 – 0,8; 5 – 0,9

Используя программный комплекс ANSYS, по формулам (9) и (11) вычисляли напряженно-деформированное состояние всех представительных элементов упругой подложки. Это по-

зволило определить интенсивность деформаций и напряжений по выражениям (16) и (17), соответственно, определить диссипативную работу подложки без отверстия (рис. 7).

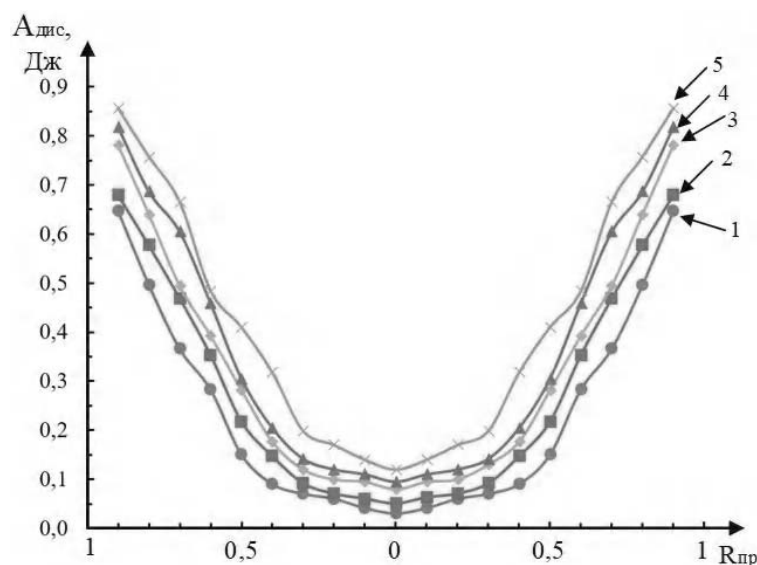


Рис. 7. Зависимость удельной диссипативной работы от приведенной высоты резиновой подложки $N_{пр}$:
1 – 0,5; 2 – 0,6; 3 – 0,7; 4 – 0,8; 5 – 0,9

Значения интенсивности напряжений и деформаций резинового слоя (подложки) без отверстия, полученные экспериментальным путем (рис. 8, а), сравнивали с результатами моделирования (рис. 8, б). Как следует из полу-

ченных результатов, расчетные значения σ_i и ϵ_i практически не отличаются от результатов, определенных на основе моделирования процесса осадки с использованием программного комплекса ANSYS Inc.

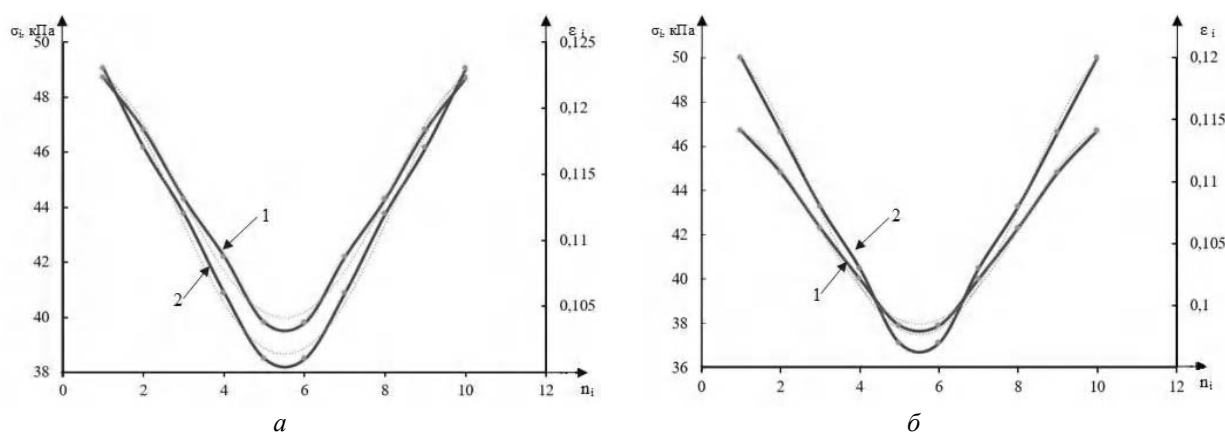


Рис. 8. Интенсивность напряжений (1) и деформаций (2) наружного слоя ($R_{пр}=1$) без отверстия при статической осадке:
а – экспериментальные данные; б – данные моделирования в ANSYS

На рис. 9 показаны расчетные значения деформаций ϵ_p и напряжений σ_p в процессе статической осадки при нагрузке 300 Н трехслойного образца «сталь – резина – сталь» с отверстием (рис. 2, б).

Поскольку приложенная нагрузка в этом случае сосредоточена на меньшей площади, то значения ϵ_z (рис. 5) и ϵ_p (рис. 6, а и 9, а) каждого условного слоя значительно больше, чем у образцов без отверстия.

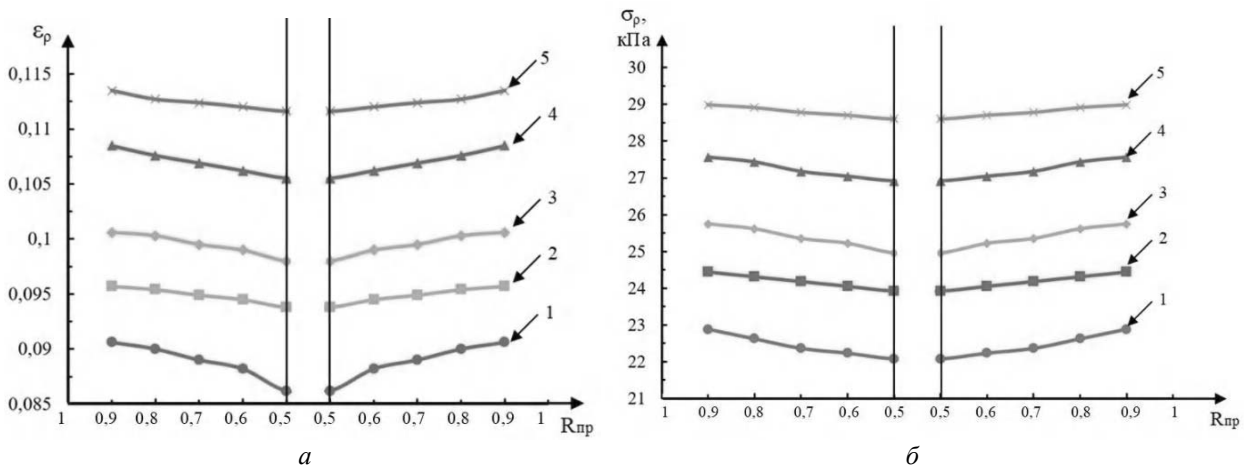


Рис. 9. Влияние приведенных высоты и радиуса на относительную степень деформации ε_p (а) и напряжений σ_p (б) резинового слоя $N_{пр}$:
1 – 0,5; 2 – 0,6; 3 – 0,7; 4 – 0,8; 5 – 0,9

Как следовало ожидать, с увеличением компонент радиальной и угловой деформаций (ε_θ , ε_p) каждого слоя возрастает диссипативная работа подложки (рис. 7 и 10). При наличии отверстия в УДП эта разница существенная. В частности, удельная диссипативная работа $A_{дис}$ средних слоев резины с отверстием и без него от-

личаются в 1,5–2 раза, а верхних и нижних слоев – не более, чем на 20–25 % (рис. 7 и 10). Это показывает, что при наличии отверстия в резиновой подложке СКМ работа, затраченная на упруго-пластическую деформацию рабочего слоя, будет также в 1,3–1,8 раза меньше, чем при использовании резиновых подложек без отверстий.

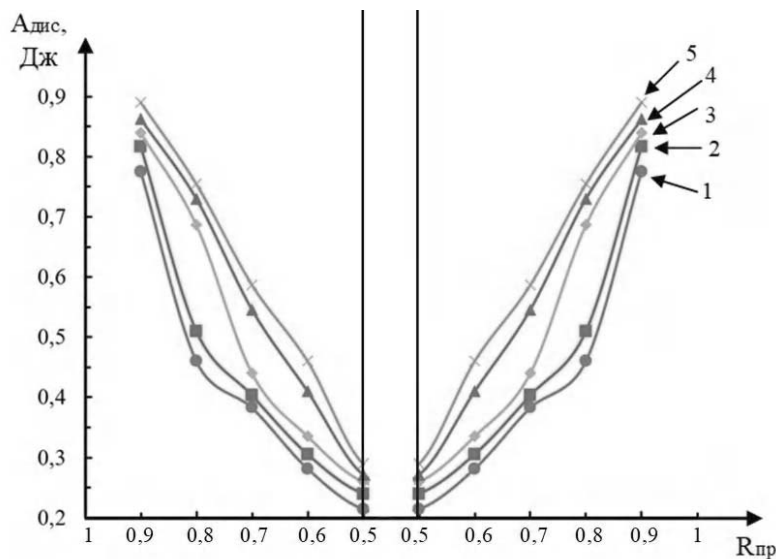


Рис. 10. Влияние внутреннего отверстия резиновой подложки на удельную диссипативную работу при высоте резиновой подложки $N_{пр}$:
1 – 0,5; 2 – 0,6; 3 – 0,7; 4 – 0,8; 5 – 0,9

На рис. 11 показано влияние характеристик УДП и способа термической обработки стали 40Х на интенсивность износа (потери массы) образцов при их ударно-абразивном испытании. В случае использования УДП с отверстием потери массы рабочего слоя из улучшенной стали 40Х снижаются 2–3 раза по сравнению с ударно-абразивным износом

образца из той же стали при испытании без резиновой подложки (рис. 11, кривые 1 и 2). Поскольку твердость образцов из стали 40Х после закалки и низкого отпуска существенно выше, чем после улучшения, то ударно-абразивная износостойкость после испытания при одинаковых условиях повышается на 5–8 % (рис. 11).

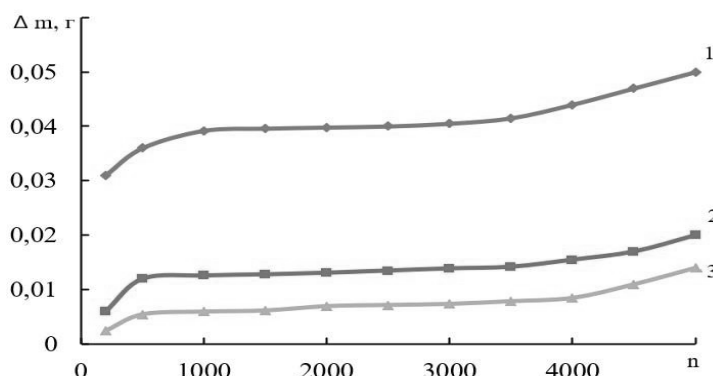


Рис. 11. Влияние режима термообработки на ударно-абразивный износ рабочего слоя СКМ из стали 40X:
1 – закалка + ВО без подложки; 2 – закалка + ВО с подложкой; 3 – закалка + НО с подложкой

Было также исследовано влияние химического состава порошков абразива и особенности разрушения спеченной стали П40Х в зоне деформации при ударно-абразивном испытании. На первом этапе испытания износ материала образцов возрастает пропорционально энергии удара в результате внедрения твердых абразивных частиц вдавливаются в частицы порошка и в межчастичные границы (рис. 12, 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 испытываемых образцов покрывается вдавленными в материал частиц железа абразивными включениями (рис. 12, б), соответственно, снижается интенсивность износа поверхности образцов с увеличением времени испытания.

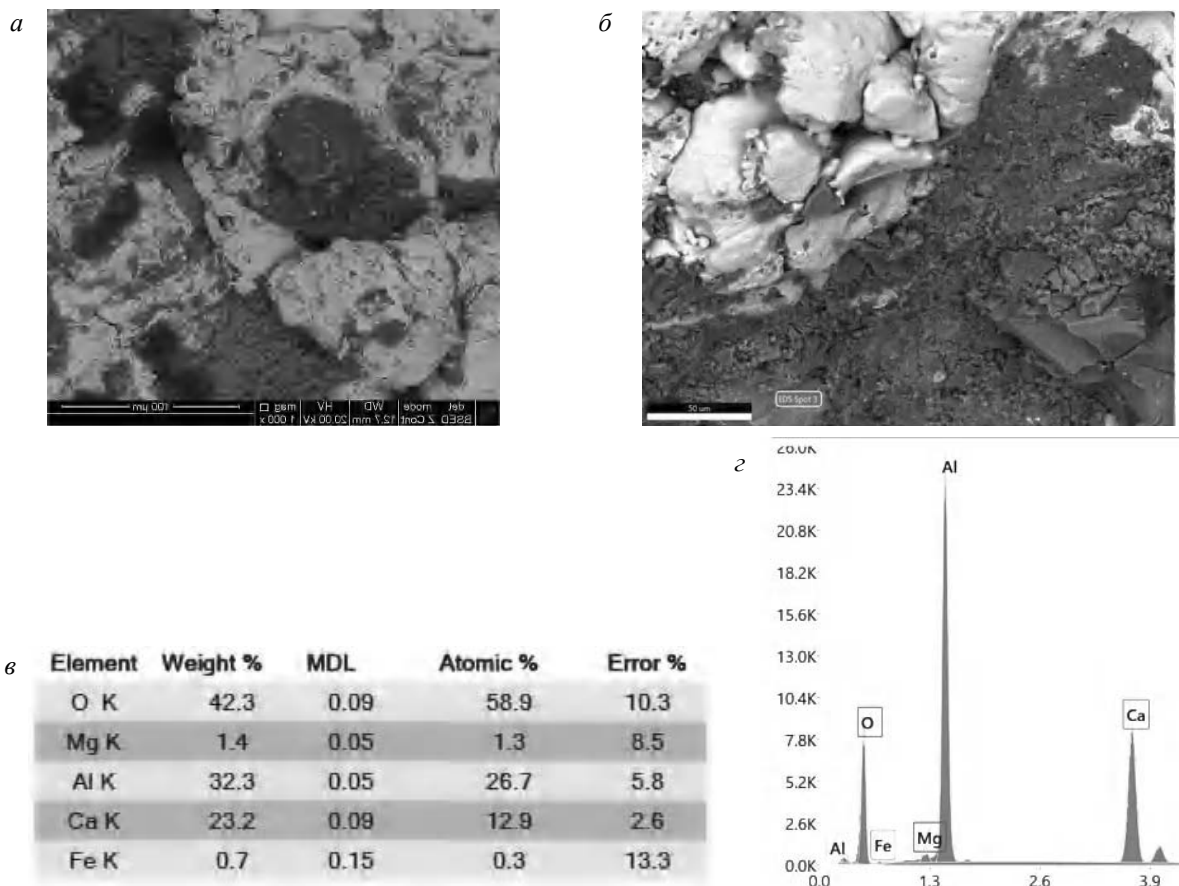


Рис. 12. Микроструктура поверхности стали П40Х на стадии интенсивного износа (а), в установившемся режиме износа (б) и распределение компонентов в частицах абразива (в и г)

Было выявлено, что характер износа также зависит от состава абразивного порошка. В частности, частицы оксидов кремния и алюминия меньше разрушаются в процессе удара и их большая часть вдавливаются в матрицу образца (рис. 12, а), что активирует 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 (рис. 12, б). Этим можно объяснить также снижение интенсивности износа образца с увеличением количества ударов на стадии установившегося износа.

Заключение

Разработан метод определения напряженно-деформированного состояния резинового упруго-диссипативного подложки слоистых композиционных материалов и показано влияние интенсивности напряжений и деформаций на работу диссипации при испытании конструкционных сталей на ударно-абразивную износостойкость.

Установлено, что при ударно-абразивном испытании слоистых композиционных материалов с рабочей поверхностью из сталей 40Х, П40Х и резины величина поглощенной энергии зависит не только от физико-механических свойств материалов, но и от геометрических параметров упруго-диссипативного слоя. Ударно-абразивная износостойкость СКМ в 1,5–2 раза больше, чем при использовании резинового слоя без отверстия.

Показано влияние режима термической обработки рабочего слоя из стали 40Х на ударно-абразивный износ СКМ. Выявлен механизм разрушения поверхности спеченных конструкционных сталей при ударно-абразивном износе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каучуки для изготовления резинотехнических изделий с повышенным ресурсом работоспособности : учеб. пособие / М. А. Ваниев [и др.] ; ВолгГТУ. – Волгоград : ВолгГТУ, 2013. – 71 с.
2. Исследование влияния типа каучука и вулканизирующей системы на теплообразование и усталостную выносливость резин при многократном сжатии / М. А. Ваниев, Т. Н. Евдошенко, Н. В. Сычев [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3(198) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – С. 55–60.
3. Виноградов, В. Н. Износостойкость сталей и сплавов : учеб. пособие для вузов / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин. – М. : Нефть и газ, 1994. – 417 с.
4. Абдюкова, Р. Я. Анализ причин отказов клапанов буровых насосов / Р. Я. Абдюкова, Н. Я. Багаутдинов // Эксплуатация нефтяных и газовых месторождений и подготовка нефти. – 2012. – № 4. – С. 66–70.
5. Донченко, А. С. Применение износостойких материалов на предприятиях цветной металлургии / А. С. Донченко, А. П. Соснин. Изд-во «Недра», 1971. – 200 с.
6. Дж. С. Дик. Технология резины : рецептурное и испытания : перевод с английского В. А. Шершнева / Дж. С. Дик. — Санкт-Петербург : НОТ, 2010. – 620 с.
7. Сиротин, П. В. Оценка возможности повышения ударно-абразивной износостойкости композиционных материалов за счет оптимизации их упруго-диссипативных свойств / П. В. Сиротин, Б. Г. Гасанов, М. А. Исмаилов // Актуальные проблемы порошкового материаловедения (Пермь, 26–28 ноября 2018 г.) / под ред. А. А. Ташкинова. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – 552 с.
8. Установка для испытания на ударно-абразивное и ударно-гидроабразивное изнашивание конструкционных и специальных материалов: патент 2434219 Рос. Федерация № 2009146684/28/ Б. Г. Гасанов, П. В. Сиротин, А. Д. Ефимов; заявл. 15.12.2009; опубл. 20.06.2011. Бюл. № 32.
9. Стенд для статических испытаний композиционных многослойных материалов (варианты): патент 2725530 Рос. Федерация № 2019132563/ Сиротин П. В., Исмаилов М. А.; заявл. 14.10.2019; опубл. 02.07.2020. бюл. № 19.
10. Инженерный анализ в ANSYS WORKBENCH: учеб. пособ. / В. А. Бруйка, В. Г. Фокин, Я. В. Кураева. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 149 с.: ил.
11. Гун, Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г. Я. Гун. – М. : Металлургия, 1980. – 456 с.
12. Малкин, А. Я. Реология: концепции, методы, приложения : пособие / А. Я. Малкин, А. И. Исаев. – Санкт-Петербург : Профессия, 2017. – 560 с.
13. Громов, Н. П. Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов. – М. : Металлургия. 1978. – 360 с.
14. Аркулис, Г. Э. Теория пластичности / Г. Э. Аркулис, В. Г. Дорогобид. – М. : Металлургия, 1987. – 352 с.