

Научная статья
УДК 621.43
DOI 10.18101/2306-2363-2025-1-11-15

Особенности механических свойств наноматериалов для технических средств

© **Болоев Петр Антонович**
доктор технических наук, профессор
pboloev@mail.ru

© **Гергенова Татьяна Петровна**
старший преподаватель
lemex74@mail.ru

© **Миронов Геннадий Доржиевич**
аспирант
box.gmirr@gmail.com

© **Енина Наталья Александровна**
преподаватель
natali.enina.01@mail.ru

© **Нечкин Вадим Николаевич**
аспирант
nvofficialpro@mail.ru

© **Бондарчук Елизавета Викторовна**
магистрант
elizaveta.bondarchuk.98@mail.ru

Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова
Россия, 670000, Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а

Аннотация. Важной проблемой в машиностроении является снижение вибраций деталей, которые приводят к циклическим нагрузкам, авариям, поломкам и повышенному шуму. Нанокристаллические материалы сочетают высокую прочность с демпфирующими свойствами, что отличает их от традиционных материалов, где улучшение вибропоглощения обычно сопровождается снижением прочности. Исследования показали, что формирование субмикроструктурной структуры в стали увеличивает коэффициент внутреннего трения и предел текучести в 4 раза. Это позволяет рекомендовать наноматериалы для упрочнения критически нагруженных деталей, таких как поршневые пальцы ДВС, работающие в условиях ударных нагрузок и трения. Применение таких структур повышает ресурс узлов, снижает затраты на ремонт и открывает перспективы для создания энергоэффективных и долговечных механизмов. Результаты работы подтверждают целесообразность внедрения нанотехнологий в машиностроение для повышения надежности и экологичности техники.

Ключевые слова: наноматериалы, механические свойства, демпфирование колебаний, сверхпластичность, износостойкость, двигатели внутреннего сгорания, подшипники скольжения.

Для цитирования

Особенности механических свойств наноматериалов для технических средств / П. А. Болоев, Т. П. Гергенова, Г. Д. Миронов и др. // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2025. Вып. 1. С. 11–15.

Введение

Возможности практического использования нанокристаллических материалов базируются на их свойствах, таких как твердость, прочность, упругость, пластичность и т. д.

Среди механических свойств нанокристаллических материалов в первую очередь необходимо отличить необычайно высокую твердость. Размер зерен оказывает заметное влияние на микротвердость. Этот эффект хорошо изучен на металлах, сплавах и керамике с размером зерен D более 1 мкм. Согласно закону Холла — Петча:

$$\bar{\sigma}_\gamma = \bar{\sigma}_o + K_\gamma D^{-0,5}, \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}_o$ — внутреннее напряжение, препятствующее движению дислокаций; K_γ — постоянная. Отсюда размерная зависимость твердости:

$$H_\gamma \approx H_o + KD^{-0,5}, \quad (2)$$

Если деформация осуществляется диффузионным скольжением, то скорость деформации $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$ равна

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{B\sigma\omega\delta d_{dif}}{K_B T D^3}, \quad (3)$$

где B — коэффициент пропорциональности; σ — приложенное напряжение; ω — атомный объем; δ — толщина границы зерна; d_{dif} — коэффициент диффузии.

Из уравнений (1) — (3) следует, что уменьшение размера зерен должно приводить к заметному изменению механических свойств. В частности, уравнения (1) и (2) предсказывают упрочнение материала при уменьшении размера зерна D .

При 300 К микротвердость нанокристаллических материалов в 2–7 раз выше, чем у H_γ крупнозернистых материалов [1].

Основная часть

Важной проблемой является демпфирование колебаний деталей, снижающее вредное воздействие циклических нагрузок, вызывающих большинство аварий и поломок, уменьшает шумы, связанные с вибрацией механизмов. Нанокристаллические материалы сочетают повышенные прочные и демпфирующие свойства. В обычных материалах при повышении демпфирующих свойств прочные свойства снижаются.

По данным проведенных исследований, в результате формирования в стали субмикрокристаллической структуры фон внутреннего трения и предел текучести возросли в 4 раза. Поэтому для практического использования можно рекомендовать, например, упрочнение поршневого пальца двигателя внутреннего сгорания, работающего в резкопеременном режиме нагрузок и трения, восстанавливать его путем гальванического осаждения нанопорошка с целью повышения твердости и износостойкости при ремонте. В этом случае можно ожидать повышение надежности в 2–4 раза этой детали, а также коленвала [2; 3].

Процесс эксплуатации топливной аппаратуры связан с ухудшением технического состояния плунжерных пар. Из-за износа плунжерных пар возникает большая неравномерность подачи топлива, а также запаздывание момента впрыска.

Износ деталей плунжерных пар происходит вследствие гидроабразивного воздействия, который обусловлен наличием в топливе механических частиц. Износ имеет локальный характер и расположен в местах, наиболее благоприятных для зацемянения абразивных частиц. Значительно изнашиваются плунжера, особенно участок в ее верхней части, расположенной против впускного окна гильзы. Длина изношенного участка 9,5...11 мкм. У втулки изнашивается внутренняя поверхность, примыкающая к впускному и перепускному окнам. Большой износ находится у впускного окна, меньший — у перепускного. Износ составляет 26 мкм.

Для восстановления и упрочнения плунжерных пар существуют различные методы нанесения на рабочую поверхность слоя какого-либо износостойкого материала, например хрома, никеля и др.

Одним из наиболее распространенных методов восстановления плунжерных пар является гальваническое хромирование. Этот процесс позволяет нанести слой хрома толщиной 15–30 мкм на изношенные поверхности, что повышает их твердость до 800–1000 HV и снижает коэффициент трения. Однако у хромирования есть недостатки:

1. Высокая пористость покрытия, способствующая коррозии;
2. Трудность обработки локальных зон износа (например, участков у впускных окон);
3. Экологическая опасность из-за использования электролитов на основе хромового ангидрида.

Более перспективными считаются высокоэнергетические методы напыления, такие как:

– детонационное напыление карбидов вольфрама (WC-Co). Позволяет создать плотное покрытие с адгезией до 80 МПа, устойчивое к гидроабразивному износу. Твердость слоя достигает 1200–1400 HV, а износостойкость повышается в 3–5 раз по сравнению с хромированием;

– плазменное напыление нитрида титана (TiN). Формирует тонкий (5–10 мкм) износостойкий слой с низким коэффициентом трения (0,1–0,2). Метод особенно эффективен для зон контакта плунжера и втулки.

Использование современных методов восстановления снижает затраты на ремонт на 40–60% по сравнению с заменой плунжерных пар. Например, детонационное напыление увеличивает ресурс детали до 15 000 моточасов, что на 30% превышает показатели новых узлов с заводским хромированием.

Следует также упомянуть о сверхпластичности керамических наноматериалов — до 20 раз. Такие материалы можно использовать в подшипниках скольжения коренных и шатунных подшипников коленчатого вала двигателя. Это такие материалы, как Si_3N_4/SiC , TiO_2 , MgO и т. д.

В настоящее время в этих подшипниках используются свинец, олово и сурьма (бензиновые двигатели), алюминий, сурьма и магний — для дизелей. Срок службы этих подшипников также можно было бы увеличить до 2–4 раз по сравнению с существующими [4].

Заключение

Наноматериалы широко используются в альтернативной энергетике — в топливных элементах, литий-ионных аккумуляторах и т. д. Они имеют большую перспективу для развития энергомашиностроения, модернизации существующих двигателей внутреннего сгорания. Используя особенности наноматериалов и нанотехнологии, возможно повышение надежности и ресурса существующих и разрабатываемых технологических средств.

Литература

1. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. Москва: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2007. 416 с. Текст: непосредственный.
2. Морохов И. Д., Трусов Л. И., Чижик С. П. Ультрадисперсные металлические среды. Москва: Атомиздат, 1977. 261 с. Текст: непосредственный.
3. Ярославцев А. Б. Химия твердого тела. Москва: Научный мир, 2009. 328 с. Текст: непосредственный.
4. Кайбышев О. А., Валиев Р. З. Границы зерен и свойства металлов. Москва: Металлургия, 1987. 214 с. Текст: непосредственный.

Статья поступила в редакцию 12.05.2025; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принята к публикации 24.06.2025.

Mechanical Property Features of Nanomaterials for Engineering Means

Petr A. Boloev
Dr. Sci. (Engineering), Prof.,
pboloev@mail.ru

Tatyana P. Gergenova
Senior Lecturer
lemex74@mail.ru

Gennadii D. Mironov
Research Assistant
box.gmirr@gmail.com

Natalya A. Enina
Lecturer
natali.enina.01@mail.ru

Vadim N. Nechkin
Research Assistant
nvofficialpro@mail.ru

Elizaveta V. Bondarchuk
Master Student
elizaveta.bondarchuk.98@mail.ru

Dorzhi Banzarov Buryat State University
24a Smolina St., 670000 Ulan-Ude, Russia

Abstract. One of the major challenges in mechanical engineering is reducing component vibrations, which can lead to cyclic loading, malfunctions, breakdowns, and increased noise levels. Nanocrystalline materials combine high strength with damping properties, distinguishing them from conventional materials, where enhanced vibration absorption typically comes at the cost of reduced strength. Research has shown that forming a submicrocrystalline structure in steel increases both the internal friction coefficient and the yield strength by a factor of four. This makes nanomaterials suitable for reinforcing critically loaded components, such as internal combustion engine piston pins operating under impact loads and friction. The use of such structures extends the service life of components, reduces maintenance costs, and supports the development of energy-efficient and long-lasting mechanisms. The findings confirm the feasibility of implementing nanotechnologies in mechanical engineering to improve the reliability and environmental sustainability of equipment.

Keywords: nanomaterials, mechanical properties, vibration damping, superplasticity, wear resistance, internal combustion engines, sliding bearings.

For citation

Boloev P. A., Gergenova T. P., Mironov G. D., Enina N. A., et al. Mechanical Property Features of Nanomaterials for Engineering Means. *Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics.* 2025; 2: 11–15 (in Russ.).

The article was submitted 12.05.2025; approved after reviewing 24.06.2025; accepted for publication 24.06.2025.