

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 539.215

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-181-189



Оригинальная статья /Original article

Поверхностная энергия в процессах измельчения твердых тел

В.Т.Федоров¹, М.Н.Кокоев²

¹Концерн «Наноиндустрия»,

¹119334, г. Москва, ул. Бардина, д. 4, корпус 1, Россия,

²Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,

²360004, г.Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является экспериментальное измерение поверхностной энергии твердых тел при их измельчении. **Метод.** Исследование основано на применении методов определения поверхностного натяжения твердых тел. На измельчение материалов в промышленности расходуется не менее 20-25 % всей производимой в мире электроэнергии. При уменьшении получаемых частиц до десятков нанометров вклад поверхностной энергии (σ_t) в работу измельчения становится столь большим, что его трудно не учитывать. Измерение поверхностного натяжения жидкостей давно отработано. Но измерение (σ_t) твердых тел вызывает большие трудности. В настоящее время известно более двадцати методов определения (σ_t). **Результат.** На основе явления самопроизвольного изгиба тонких нитевидных структур разработан метод определения (σ_t). Приводятся примеры, в которых (σ_t) на границе раздела фаз играет важную роль при получении образцов с микроструктурой методом интенсивной пластической деформации (ИПД). Для получения тонких металлических порошков предложен один из вариантов метода ИПД. Найден способ физической активации алюминиевых гранул, повышающий скорость реакции металла в водной среде примерно в тысячу раз. **Вывод.** Новая технология позволяет получать высокочистые не окисленные металлические порошки без токсичных стоков и выбросов и при затратах энергии, ниже, чем во всех известных способах.

Ключевые слова: поверхностная энергия, твердое тело, интенсивная пластическая деформация, нанопорошок, получение водорода.

Для цитирования: В.Т.Федоров, М.Н.Кокоев. Поверхностная энергия в процессах измельчения твердых тел. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3): 181-189. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-181-189

Surface Energy in the Processes of Disintegration of Solids

V.T. Fedorov, M.N. Kokoev

¹Concern "Nanoindustry",

¹4 Bardin St., building 1, Moscow 119334, Russia,

²H.M. Berbekov Kabardino-Balkar State University,

²173 Chernyshevsky St., Nalchik 360004, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to experimentally measure the surface energy of solids during their grinding. **Method.** The study is based on the use of methods for determining the surface tension of solids. At least 20-25% of all electricity produced in the world is spent on grinding materials in industry. When the resulting particles are reduced to tens of nanometers, the contribution of surface energy (σ_t) to the grinding work becomes so large that it is difficult not to take it into account. Measuring the surface tension of liquids has long been proven. But measuring (σ_t) of solids causes great difficulties. Currently, more than twenty methods for determining (σ_t) are known. **Result.** Based on the phenomenon of spontaneous bending of thin thread-like structures, a method for determining (σ_t) has been developed. Examples are giv-

en in which (σ_t) at the phase interface plays an important role in obtaining samples with a micro-structure using the method of severe plastic deformation (SPD). To obtain fine metal powders, one of the variants of the SPD method has been proposed. A method has been found for the physical activation of aluminum granules, which increases the reaction rate of the metal in an aqueous environment by about a thousand times. This is necessary for the development of an anaerobic power plant capable of operating at great depths. **Conclusion.** The new technology makes it possible to obtain high-purity, non-oxidized metal powders without toxic waste and emissions and with energy costs lower than in all known methods.

Keywords: surface energy, solid, severe plastic deformation, nanopowder, hydrogen production.

For citation: V.T. Fedorov, M.N. Kokoev . Surface Energy in the Processes of Disintegration of Solids. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3): 181-189. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-181-189

Введение. Измельчение минерального сырья при производстве строительных материалов, в порошковой металлургии, химической и пищевой промышленности - процесс весьма энергоемкий. По объемам измельчаемого материала первые места занимают производство цемента, металлургия и зерна злаков. На дробление и измельчение материалов расходуется не менее 20-25 % всей производимой в мире электроэнергии. До 85-90 % материалов механически измельчается в шаровых мельницах, остальное приходится на валковые, вибрационные, струйные, вихревые и другие мельницы.

Согласно теории дробления и измельчения [1,2] работа A , затрачиваемая на измельчение, есть сумма двух энергий:

$$A = E_p + E_d, \text{ где } E_p = \sigma_t \Delta S \text{ и } E_d = K \Delta V, \quad (1)$$

здесь E_p - энергия, идущая на образование новых поверхностей при разрушение материала; σ_t - удельная поверхностная свободная энергия твердого тела (Н/м), ΔS - приращение поверхности, E_d - энергия деформации, K - энергия упругой и пластической деформации единицы объема твердого тела, ΔV - деформируемый объем тела.

Из (1) следует, что работа измельчения E_p зависит от площади ΔS вновь образуемой поверхности и удельной поверхностной энергии измельчаемого материала (σ_t). Удельная поверхностная энергия является основной характеристикой переходного слоя между фазами. Чем меньше тонина помола, тем больше затрачивается энергии на получение высокодисперсных частиц. До фракции 1-5 мкм вклад поверхностной энергии на работу измельчения мал и составляет около 1 %. Остальная работа по измельчению материалов так или иначе превращается в тепло. По мере уменьшения размеров частиц до субмикронных и особенно нанопорошков вклад поверхностной энергии в затрату работы на измельчение становится настолько заметным, что его трудно не учитывать.

Постановка задачи. Измерение поверхностной энергии (натяжения) различных жидкостей с точностью, достаточной для практики, не вызывает особых трудностей. В противоположность этому, экспериментальное измерение поверхностной энергии твердых тел дается с большим трудом. Для каких-то веществ эти измерения удаются с удовлетворительной точностью, а для многих веществ данные измерения σ вызывают сомнение.

Методы исследования. В настоящее время известно более двадцати методов определения поверхностного натяжения твердых тел. Из методов измерения σ металлов наиболее точен и хорошо отработан компенсационный метод «нулевой» ползучести [3]. Однако этот и другие методы не позволяют определить σ с достаточной точностью при нормальных температурах. В работе Николовой [4] предложен прямой экспериментальный метод для определения σ твердых тел, основанный на эффекте Таммана. Было замечено, что происходит изгиб тонких пластинок толщиной 0,1-1 мм (толщина образца берется с учетом его длины) из оптического стекла и других материалов. Изгиб наблюдается

в том случае, если одна из сторон пластинки отполирована, а другая подвергнута шлифованию. Полированная сторона всегда вогнута. Дается формула для определения поверхностного натяжения полированной стороны пластинки толщиной h :

$$\sigma = \frac{1}{6} \cdot \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{h^2}{r}, \quad (2)$$

где r – радиус кривизны пластинки, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Кан и Ханнеман [5] замечали самопроизвольный изгиб в тонких отожженных пластинках несимметричных кристаллов соединений InSb , GaAs , InAs и др. Изгибы кристаллов авторы объясняют различием в величине поверхностного натяжения для противоположных граней кристаллов. Ханнеманом было получено равенство, выражающее разность поверхностных натяжений грани типа А и В {III} для InSb :

$$(\sigma_A - \sigma_B) = \frac{Yt^2}{6r}, \quad (3)$$

где Y – модуль приближения (при изотропной упругости $Y = E / (1 - \nu)$), t – толщина пластинки, r – радиус изгиба пластинки.

Если пренебречь анизотропией упругих свойств кристалла (различием величины E у разных граней) и в (3) подставить значение Y , то получим:

$$(\sigma_A - \sigma_B) = \frac{1}{6} \cdot \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{t^2}{r}. \quad (4)$$

Видно, что правые части формул Николовой (2) и Ханнемана (3) после преобразования одинаковы. Отмечается, что самопроизвольный изгиб пластинок может быть в нескольких случаях:

а) вследствие различия в величинах поверхностного натяжения на разных гранях монокристалла;

б) из-за различной адсорбции на поверхностях пластинок;

в) вследствие избирательной адсорбции на одной из поверхностей.

Самопроизвольный изгиб очень чувствителен ко всем этим эффектам и наглядно показывает влияние среды на поверхностное натяжение. Метод позволяет определить лишь различие в величине поверхностного натяжения между гранями монокристалла.

Полученные результаты трудно поддаются количественной обработке, но оказывается, что сам по себе самопроизвольный изгиб является уникальным для исследований энергетики адсорбции. Нами сделана попытка рассмотрения самопроизвольного изгиба как явления, имеющего самостоятельное значение в механике тонких нитевидных структур. Оказалось, что для ряда твердых тел нитевидной формы с поперечным сечением не более 10-100 мкм при определенной длине, силы поверхностного натяжения вызывают их изгиб. В соответствии с Л. Эйлером, прямой стержень, нагруженный осевой силой P , сохраняет свою форму прямолинейной лишь в том случае, когда $P < P_{кр}$, где $P_{кр}$ – критическая сила, превышение которой приводит стержень к изгибу:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{(\mu l)^2}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости Юнга, $J_{\min}$ – минимальный главный момент инерции поперечного сечения стержня, l – длина стержня, μ – коэффициент приведения длины.

Подставив в (5) значение P , выраженное через σ_t , получим величину критической длины самопроизвольного изгиба нитевидной структуры под действием сил поверхностного натяжения, если она лишена внутренних напряжений:

$$l_{кр} = \left(\frac{\pi^2 EJ_{\min}}{\sigma_t b \mu^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6),$$

где σ_t – поверхностное натяжение твердого тела, b – периметр поперечного сечения.

Следует подчеркнуть, что форма любой нитевидной структуры естественного или искусственного происхождения не может быть прямолинейной, если она имеет длину больше критической и лишена каких-либо внутренних напряжений. Данное явление может в значительной степени влиять на процесс усадки композиционных материалов, особенно при термическом воздействии на них в процессе изготовления или эксплуатации. Например, при изготовлении теплоизоляционных плиток из кварцевых волокон, работающих при высокой температуре. В результате термообработки плитки испытывают значительную усадку. Усадка изделий из волокна объясняется остаточными механическими напряжениями. Но не только, усадка волокон при определенных условиях может объясняться вкладом сил поверхностного натяжения (σ_T).

При толщине волокон несколько мкм и длиной более критической вклад в общую деформацию волокон за счет поверхностного натяжения становится заметным, а то и определяющим. Это объясняется тем, что при высоких температурах модуль упругости материалов снижается, в то время как поверхностное натяжение меняется незначительно. Например, при термической обработке теплоизолирующих плиток из ультратонких кварцевых волокон с плотностью изделия $0,2 \text{ г/см}^3$ усадочные напряжения, вызванные силами поверхностного натяжения, равны 50-100 кПа. При температуре спекания плитки (выше 1200 К) эти напряжения могут вызвать значительную усадку изделий.

Обсуждение результатов. На основе явления самопроизвольного изгиба нитевидных структур разработан метод определения σ_T . В случае превышения сжимающей стержень силой P критического значения происходит быстрое нарастание величины прогиба стержня:

$$f = \frac{l\sqrt{8}}{\pi} \left(1 - \frac{P_{кр}}{P} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) значение $P_{кр}$ из (5) и учитывая, что $P = \sigma \cdot b$, для поверхностного натяжения нитевидного образца получим [6]:

$$\sigma_T = \frac{8\pi^2 EJ_{\min}}{b\mu^2 (8l^2 - \pi^2 f^2)}. \quad (8)$$

Для измерения описанным способом σ_T необходимо отжечь нитевидный или ленточный образец из исследуемого материала, с соответствующей поправкой на $J_{\min}$, в зависимости от формы поперечного сечения, снять спрямляющую нагрузку и измерить максимальный прогиб и остальные геометрические параметры образца. При этом необходимо выполнить два основных условия:

а) длина образца должна быть не меньше критической длины самопроизвольного изгиба. Критическая длина образца предварительно оценивается по теоретическому значению σ_T и формуле (6);

б) поперечные размеры образца должны быть не больше 10-100 мкм с тем, чтобы вклад сил тяжести в деформацию образца был минимальным и не превышал долей процента.

в) в результате отжига образец должен быть лишен каких-либо внутренних напряжений.

Для измерения σ_T поликристаллических тел, например металлов, образец следует брать в виде тонкой ленты. Это вызвано тем, что образцы в виде проволоки при отжиге часто образуют, так называемую, «бамбуковую» структуру. В результате рекристаллизации образец в конце отжига представляет собой шарнирно-сочлененную систему из крупных зерен, поперечный размер которых приближается к диаметру исходной проволоки или становится выше диаметра образца. Для таких образцов понятие критической длины теряет смысл и определение σ_T невозможно. Данным методом определено поверхностное натяжение полиамидных волокон при комнатной температуре. Оно оказалось равным 43 мН/м. Для снятия внутренних напряжений полиамидные волокна длительно отжигались в инертной среде при 410-430 К.

Прочность твердых тел, вычисленная в предположении «идеальной» структуры кристаллической решетки (без дефектов различного рода), на несколько порядков больше действительной прочности:

$$P_T \approx (2E\sigma_T/\delta)^{1/2}, \quad (9)$$

где E – модуль Юнга, σ_T – удельная свободная поверхностная энергия, δ – трансляционная постоянная решетки кристалла.

Для объяснения временной прочности твердых тел обычно применяются представления Гриффитса о зародышевых трещинах [7,8]. Значение фактической прочности с учетом наличия в теле некоторой чечевицеобразной "опасной" трещины длиной l_m равно:

$$P_P = [2E\sigma_T/(l_m\pi)]^{1/2}. \quad (10)$$

При $P > P_P$ трещина растет и тело разрушается, при $P < P_P$ трещина смыкается и исчезает. Полученная зависимость для P_P относится к изотропному телу, когда (σ_T) одинаково для любого направления раскола. Размер опасных трещин для хрупкого твердого тела, например для кварца, может быть от 1,5 до 600 мкм, в зависимости от принятой в расчетах величины отношения P_T/P_P . Для малых частиц и волокон размер опасной трещины уменьшается. Из выражений (9,10) величина поверхностной энергии (σ_T) имеет важное значение для теории и практики материаловедения.

В последние годы применение новых технологий обработки материалов в научных исследованиях и промышленности резко возросло. Например, в исследованиях, направленных на разработку методов получения прочных и одновременно пластичных материалов [9]. При некоторых методах интенсивной пластической деформации (ИПД) металлов (severe plastic deformation - SPD) удается так измельчить кристаллы металла, что они уменьшают свой размер от (100-500 мкм) до 50 нм, в зависимости от интенсивности и продолжительности обработки. В результате ИПД повышается микротвердость и прочность образцов при сохранении пластичности, иногда меняются к лучшему магнитные и химические свойства [10,11].

При еще одном варианте ИПД - экструзии пластичных металлов под давлением в несколько раз выше, чем при обычной экструзии и при скорости, которые на один-два порядка больше принятой, происходит разрушение металла с образованием тонкого порошка. Впервые об этом эффекте было сообщено в [12]. Установлено, что при такой ИПД при некоторых режимах диспергируются не только пластичные металлы и сплавы, но и некоторые неметаллы (в этом плане показателен тефлон).

К открытию этого эффекта более ста лет назад был близок академик Н.С. Курнаков. Он установил с Ю.А. Жемчужниковым, что при медленном сжатии соли или серы в прочном контейнере с отверстием наблюдаются редкие, но сильные выбросы измельченного вещества [13]. Однако такое разрушение соли или серы было достаточно ожидаемым, так как эти вещества хрупки по своей природе. Много позднее П. Бриджмен также исследовал хрупкое разрушение некоторых веществ при высоких давлениях [14].

Во второй половине 20 века отмечали появление трещин в металлических заготовках при гидравлической экструзии [15], а в работе [16] наблюдали процесс трещинообразования при высокой скорости экструзии некоторых алюминиевых сплавов.

Однако тотальное разрушение пластичных металлов и сплавов при экструзии с превращением их в тонкий порошок ранее не было известно. Действительно, трудно представить, что многие пластичные металлы и сплавы при особых режимах экструзии и часто при комнатной температуре в твердом состоянии могут распыляться подобно жидкому топливу в дизеле. Впервые превращение металла в порошок удалось увидеть при экструзии индия, когда из контейнера произошел выброс облака тонкой металлической пыли. Возможность такого явления объясняли особыми свойствами индия. Действительно, индий самый мягкий металл, если не брать во внимание некоторые щелочные металлы. Однако дальнейшие исследования показали, что диспергирование при особых режимах экструзии возможно для многих металлов и других веществ. Опытным путем при различной температуре подтверждено диспергирование более чем для 20 металлов и сплавов.

Это явление послужило основой для разработки нового метода получения субмикронных порошков пластичных металлов и сплавов. Новая технология позволяет получать высокочистые не окисленные металлические порошки без токсичных стоков и выбросов и при затратах энергии, ниже чем во всех известных способах.

При всестороннем сжатии вещества давление в прочном контейнере возрастает до некоторой величины, по достижении которой начинается экструзия металла с высокой скоростью. Запасенная в металле и в гидросистеме пресса энергия сжатия переходит в работу разрушения вещества при экструзии, создания в нем дефектов структуры, образования новой поверхности помноженной на (σ_T). Разрушение металла при экструзии происходит под действием нескольких факторов. При выходе вещества с высокой скоростью из контейнера происходит быстрая релаксация напряжения упругого сжатия вещества. Это приводит к восстановлению равновесных межатомных расстояний и последующему разрыву металла по местам дефектов и микротрещин за счет сил инерции. Кроме того, внутри канала существует большой градиент скорости. Поэтому на процесс диспергирования оказывает большое влияние выделение тепла при внутреннем трении.

Нагрев металла может быть следствием трения при движении металла с большой скоростью через конусный канал [17]. Выделение тепла по указанным выше причинам может приводить к появлению какого-то количества жидкой фазы или даже полному плавлению металла, если металл легкоплавкий. Видно, что при получении металлических порошков большинство частиц имеет округлую или совершенно сферическую форму, что явно говорит о достижении металлом температуры плавления. Разрушению вещества способствуют также сильные деформации сдвига, которые действуют на металл при движении его через канал из контейнера.

В первом приближении определить необходимое давление P экструзии вещества в твердой фазе для обеспечения его разрушения с образованием тонкого порошка можно из уравнения баланса энергии. Потенциальная энергия сжатия вещества в контейнере во время экструзии расходуется на упругую и пластическую деформацию вещества, потери на трение, образование новой поверхности измельчаемого вещества и создание различных дефектов структуры при деформации и разрушении и др. При получении металлических субмикронных и нанопорошков вклад (σ_T) в работу диспергирования металлов нужно обязательно суммировать с другими затратами энергии. Заметное влияние на величину необходимого давления и затрат энергии на измельчение оказывает кинетическая энергия, которую уносит поток частиц разрушенного вещества. В зависимости от скорости частицы уносят порядка 15-20 % затраченной на экструзию энергии. Большая часть из указанных выше затрат энергии переходит в тепло.

С 2000 года ряд стран проводят разведочные работы в океане и готовятся к началу освоения морских месторождений, поскольку на суше месторождения руд цветных металлов истощаются. Основные группы полезных ископаемых заключены в железомарганцевых конкрециях, кобальт-марганцевых корках и глубоководных полиметаллических сульфидов. Промышленное освоение их должно произойти в ближайшие годы. Для добычи конкреций с большой глубины нужна разработка дистанционно управляемых подводных тяжелых бульдозеров, ковшовых погрузчиков, гидромониторов с воздухонезависимыми энергосиловыми установками (ЭСУ), способными работать на большой глубине.

Научные лаборатории во многих странах продолжают поиск бортового хранилища водорода в виде молекулярных и ионных гидридов алюминия, лития и других металлов как источников H_2 для электрохимического генератора [18]. Но гидриды металлов дороги, дефицитны, слишком чувствительны к условиям хранения и поэтому опасны. Да к тому же сам электрохимический генератор слишком дорог и ненадежен.

Новый подход в разработке воздухонезависимой ЭСУ - в качестве энергоносителя предполагается использовать алюминиевые гранулы для получения водорода и тепловой энергии гидротермальным окислением алюминия. Для работы ЭСУ применяется бортовые запасы алюминия в виде гранул и жидкий кислород в качестве окислителя. В резуль-

тате гидротермального окисления получается водород и тепловая энергия. Работает установка по замкнутому циклу. Водяные пары после компактного турбогенератора конденсируют и возвращают в цикл, так что ЭСУ может работать на любой глубине.

Но проблема в том, что алюминий всегда покрыт прочной пленкой оксида. Это основное препятствие для повышения скорости гидротермального окисления алюминия. Много лет во многих лабораториях пытались активировать алюминий десятками способов, но достигаемая скорость реакции была недостаточна. Об этих попытках написано в [19]. Например, нанопорошки алюминия с размерами частиц менее 100 нм реагируют в 70 раз быстрее с водой с выделением тепловой энергии и водорода при температуре всего 80°С, чем обычные промышленные порошки алюминия с размерами частиц 10-50 мкм при значительно более высокой температуре [20]. Однако из-за очень высокой стоимости нанопорошков алюминия (около \$300 за 1 кг), низкой производительности оборудования (метод взрывания проволок электрическим разрядом) и большой взрывоопасности нанопорошков их не применяют в энергосиловых установках.

Наконец во время экспериментов по изучению одного из видов ИПД пластичных металлов был обнаружен эффект кратковременной гигантской химической активности после разрушения металла в экстремальных условиях. В подтверждение проявления этого явления, кроме других экспериментов, служит такой факт. При разрушении металлов в результате ИПД наблюдается сильная фотоэмиссия, видимая невооруженным глазом. Сильная фотоэмиссия - это следствие быстрой релаксации напряжений и аннигиляции дефектов на поверхности частиц разрушенного вещества, крайне неравновесного состояния мгновенно диспергированного металла, что говорит об избыточной поверхностной энергии частиц. Многочисленные дефекты, с большой скоростью вышедшие на поверхность частицы - это центры топохимической реакций. На основе этого явления предложен новый метод активации алюминия, повышающий скорость окисления частиц алюминия примерно от одной до трех тысяч раз. Это явление кратковременной гигантской химической активности предложено использовать в воздухонезависимых (анаэробных) ЭСУ, использующих гидротермальное окисление алюминия.

Новый метод позволяет вместо порошка применять в ЭСУ крупные алюминиевые гранулы. В отличие от порошков, гранулы алюминия совершенно безопасны для транспортировки любым видом транспорта, удобны в использовании и хранении в любых климатических условиях. Гранулы намного дешевле порошков, так как их получают путем простого технологического передела. Новый метод активации гранул алюминия открывает путь применения гидротермального окисления для разработки воздухонезависимых (анаэробных) ЭСУ для оснащения ими подводной тяжелой техники для добычи полезных ископаемых морских месторождений цветных и редких металлов.

Вывод.

1. По мере уменьшения размеров частиц до нанопорошков, в которых всё больше нуждается промышленность и строительство, вклад поверхностной энергии в затрату работы на измельчение становится заметным, что его трудно не учитывать. Измерение поверхностного натяжения различных жидкостей с точностью, достаточной для практики, не вызывает особых трудностей. Но измерение поверхностной энергии твердых тел (σ_t) удастся с большим трудом. Предложен и испытан метод измерения поверхностной энергии твердых тел при любой температуре.
2. При некоторых методах интенсивной пластической деформации (ИПД) металлов, в которых удастся так измельчить кристаллы металла, что они уменьшают свой размер от (100-500 мкм) до 50 нм, в зависимости от интенсивности и продолжительности обработки. В результате ИПД металлов и сплавов повышается микротвердость и прочность образцов при сохранении пластичности, в некоторых случаях меняются к лучшему магнитные и химические свойства.
3. Один из методов ИПД - экструзия пластичных металлов при давлении в несколько

раз выше, чем обычно и при скорости, которая на один-два порядка больше принятой, происходит разрушение металла с образованием тонкого порошка. Это явление послужило основой для разработки нового метода получения субмикронных порошков пластичных металлов и сплавов. Новая технология позволяет получать высокочистые не окисленные металлические порошки без токсичных стоков и выбросов и при затратах энергии, ниже, чем во всех известных способах.

4. Во время экспериментов по изучению одного из видов ИПД металлов был обнаружен эффект кратковременной гигантской химической активности после разрушения металла в экстремальных условиях. При разрушении металлов в результате ИПД наблюдается сильная фотоэмиссия, видимая невооруженным глазом.

Новый метод физической активации алюминия открывает путь для практического применения безопасного и дешевого энергоносителя в виде алюминиевых гранул в воздуонезависимых энергосиловых установках.

Библиографический список:

1. Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. и др. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. Москва. Металлургия. 1987. 792 с.
2. Ребиндер П. А., Щукин Е. Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физических наук. 1972. Т.108. N 9. С. 3-42.
3. А.с. № 408198 СССР. Прибор для измерения поверхностного натяжения твердых тел / С.Н. Задумкин, Х.Б. Хоконов, И.Г. Шебзухова // Открытия. Изобретения. 1973. Бюллетень № 47. С.121.
4. Николова Э. О поверхностном натяжении твердых тел, определенном эффектом Таммана // Годишник на висшете учебни заведения. Техническа физика. 1981. Т.28. Кн. 1. С.21-26.
5. Cahn J.W., Hanneman R.E. (111) Surface tensions of III-IV Compounds and their relationship to spontaneous bending of thin crystals // Surface science.- 1964, № 1.- P.387-397. [Кан Дж.В., Ханнеман Р.Е. (111) Поверхностные натяжения соединений III-IV и их связь со спонтанным изгибом тонких кристаллов // Науки о поверхности. 1964, № 1. С.387-397.]
6. Федоров В.Т. Явление самопроизвольного изгиба нитевидных структур // Поверхностные явления на границах конденсированных фаз. Нальчик, 1983. С.49-53.
7. Изотов А.Д., Лазарев В.Б., Жаворонков Н.М. Межатомные взаимодействия и ударная стойкость твердых тел при высокоскоростных деформациях//Доклады АН СССР. 1985. Т. 285, № 6. С.1401-1405.
8. Морохов И.Д., Трусков Л.И., Чижик С.П. Ультрадисперсные металлические среды. Москва. Атомиздат. 1977. 264 с.
9. Кокоев М.Н., Федоров В.Т. Высокопрочные металлические материалы для строительства особо ответственных сооружений//Вестник Отделения строительных наук РААСН. 2020. Том 2. С. 299-304.
10. Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials // Progr. Mat. Sci. 2006. V. 51. P. 427-556. [Мейерс М.А., Мишра А., Бенсон Д.Дж. Механические свойства нанокристаллических материалов // Прогр. мат. науч. 2006. Т. 51. С. 427-556.]
11. Europaeische Patentschrift EP 2 821 156 B1. Vorrichtung und Verfahren zur Umformung von Bauteilen aus Metallwerkstoffen. Fedorov Viktor (RU), Ivanisenko Julia (DE), Baretzky Brigitte (DE) Hahn Horst (DE). Prioritaet: 04.07.2013.
[Европейский патент EP 2 821 156 B1. Устройство и способ формования деталей из металлических заготовок. Приоритет: 04.07.2013]
12. V.T. Fedorov and Kh.B. Khokonov. Phenomenon dispersion of solids with the rapid stress relaxation of hydrostatic compression // Sov. Phys. Dokl. 33(6) (1988) p. 463.
13. Федоров В.Т., Кокоев М.Н., Энергоноситель высокой надежности для резервных источников электро- и теплоснабжения // Вестник РААСН 2016. С. 604-608.
14. Бриджмен П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. Москва. Издательство иностранной литературы. 1955. 275 с.
15. Береснев Б.И., Трушин Е.В. Процесс гидроэкструзии. Москва. Наука. 1976. 199 с.
16. R.B. Pond. Metal Progress, 89(1966)77. [Понд Р.Б. Металл Прогресс, 89(1966)77.]
17. K. Mueller. Fundamentals of Extrusion Technology. Giesel Verlag. Isernhagen. Germany. 2004. [К. Мюллер. Основы технологии экструзии. Гизель-издательство. Изернхаген. Германия. 2004.]
18. Булычев Б.М., Стороженко П.А. Молекулярные и ионные гидриды металлов как источники водорода для энергетических установок // Альтернативная энергетика и экология. 2004. № 4. С.5-10.
19. Федоров В.Т., Кокоев М.Н. Геологоразведка арктического шельфа и проблема анаэробной силовой установки // Вестник Российской Академии естественных наук. 2020. N 1. С. 21-24.

20. Передовые порошковые технологии LLC. 2011. Томский политехнический университет. Томск. <http://www.nanosized-powders.com/ru/42/> (дата обращения 1.06.2023)

References

1. Anciferov V.N., Bobrov G.V., Druzhinin L.K. and other. Powder metallurgy and sprayed coatings. Moscow. Metallurgy. 1987; 792. (In Russ)
2. Rebinder P. A., Shchukin E. D. Surface phenomena in solids in the processes of their deformation and destruction. *Advances in the physical sciences*. 1972;10(9):3-42. (In Russ)
3. A.s. No. 408198 USSR. A device for measuring the surface tension of solids. S.N. Zadumkin, Kh.B. Khokonov, I.G. Shebzukhova. *Discoveries. Inventions*. 1973; 47:121. (In Russ)
4. Nikolova E. On the surface tension of solids determined by the Tammann effect. *Technical physics*. 1981; 28(1):21-26. (In Russ)
5. Cahn J.W., Hanneman R.E. (111) Surface tensions of III-IV Compounds and their relationship to spontaneous bending of thin crystals. *Surface science*. 1964;1:387-397.
6. Fedorov V.T. The phenomenon of spontaneous bending of filamentous structures. *Surface phenomena at the boundaries of condensed phases*. Nalchik, 1983; 49-53(In Russ)
7. Izotov A.D., Lazarev V.B., Zhavoronkov N.M. Interatomic Interactions and Impact Resistance of Solids under High-Speed Deformations. Reports of the Academy of Sciences of the USSR. 1985; 285(6): 1401-1405. (In Russ)
8. Morokhov I.D., Trusov L.I., Chizhik S.P. Ultrafine metallic media. Moscow. Atomizdat. 1977;264. (In Russ)
9. Kokoev M.N., Fedorov V.T. High-strength metal materials for the construction of especially critical structures. *Bulletin of the Department of Building Sciences RAASN*. 2020;2: 299-304. (In Russ)
10. Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progr. Mat. Sci*. 2006;51: 427-556.
11. Europäische Patentschrift EP 2 821 156 B1. Vorrichtung und Verfahren zur Umformung von Bauteilen aus Metallwerkstoffen. Fedorov Viktor (RU), Ivanisenko Julia (DE), Baretzky Brigitte (DE) Hahn Horst (DE). Prioritaet: 04.07.2013.
12. V.T. Fedorov and Kh.B. Khokonov. Phenomenon dispersion of solids with the rapid stress relaxation of hydrostatic compression. *Sov. Phys. Dokl*. 33(6) (1988; 463
13. Fedorov V.T. , Kokoev M.N. High reliability energy carrier for backup sources of electricity and heat supply. *Bulletin of the Department of Building Sciences RAASN*. 2016;604-608. (In Russ)
14. Bridgeman P.V. Study of large plastic deformations and rupture. Moscow. Publishing house of foreign literature. 1955; 275. (In Russ)
15. Beresnev B.I., Trushin E.V. hydroextrusion process. Moscow.The science. 1976;199 (In Russ)
16. R.B. Pond. Metal Progress, 89(1966)77.
17. K. Mueller. Fundamentals of Extrusion Technology. Giesel Verlag. Isernhagen. Germany. 2004.
18. Bulychev B.M., Storozhenko P.A. Molecular and ionic metal hydrides as sources of hydrogen for power plants. *Alternative Energy and Ecology*. 2004; 4:5-10. (In Russ)
19. Fedorov V.T., Kokoev M.N. Geological exploration of the Arctic shelf and the problem of an anaerobic power plant. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2020;1: 21-24. (In Russ)
20. Advanced powder technologies LLC. 2011. Tomsk Polytechnic University. Tomsk. <http://www.nanosized-powders.com/ru/42/> (Accessed 10.02.2023). (In Russ).

Сведения об авторах:

Федоров Виктор Тихонович, доктор технических наук, советник (fedorovsteer@gmail.com).

Кокоев Мухамед Нургалиевич, доктор технических наук, профессор, советник РААСН, академик РАЕН и РИА, профессор кафедры «Строительное производство»; kbagrostroy@yandex.ru

Information about authors:

Viktor T. Fedorov, Dr. Sci. (Eng), Advisor; fedorovsteer@gmail.com.

Mukhamed N. Kokoev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Adviser to RAASN, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences and RIA, prof. Department of Construction Production; kbagrostroy@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 11.07.2023

Одобрена после рецензирования / Revised 29.08.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 29.08.2023.