

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВЕРХЛЕГКОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

В.О. Наумова¹⁾, О.П. Ровенская²⁾, В.Д. Марченко³⁾

1) студент Армавирского механико–технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Армавир, Россия, naumova.vitaliya@bk.ru

2) к.вет.н., старший преподаватель Армавирского механико–технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Армавир, Россия, olhovik_1980@mail.ru

3) магистрант Института механики, робототехники, инженерии транспортных и технических систем ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия, marchenko-armavir@mail.ru

Аннотация: данная статья посвящена инновационному методу создания инженерами металлургической промышленности нового сверхлегкого металлического материала, который получил название (ultralight metallic microlattice) — ультралегкая металлическая губка.

Ключевые слова: металлические микрорешетки, полые трубки, никель, модуль Юнга, методом электроосаждения.

INVESTIGATION OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF AN ULTRALIGHT METAL MATERIAL

Vitaly O. Naumova¹⁾, Oksana P. Rovenskaja²⁾, V. D. Marchenko³⁾

1) the student Armavir Institute of Mechanics and Technology (branch) of Federal State Budgetary Institution of Higher Education “Kuban State Technological University”, city of Armavir, Russia, naumova.vitaliya@bk.ru

2) k. vet.n., senior lecturer of Armavir mechanics-co–Institute of technology (branch) of the Kuban state technological University, Armavir, Russia, olhovik_1980@mail.ru

3) the master's student of the Institute of Mechanics, Robotics, Engineering of Transport and Technical Systems of the Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia, marchenko-armavir@mail.ru

Abstract: this article is devoted to an innovative method of creating a new ultralight metal material by engineers of the metallurgical industry, which was called (ultralight metallic microlattice) - an ultralight metal sponge.

Key words: metal microlattices, hollow tubes, nickel, Young's module, by electrodeposition.

В металлургической промышленности инженерами в ходе определенных испытаний удалось создать новый сверхлегкий металлический материал. Он получил название никелевая «кость» (ultralight metallic microlattice) — ультра-легкая металлическая губка. Материал этот, в прямом смысле слова, невесомый: если положить его на одуванчик, то цветок останется невредим. Однако при всей кажущейся хрупкости «никелевая кость» может выдерживать огромные по сравнению со своим весом нагрузки. Причина в его необычном строении — на 99,99% материал полый, и, по сути, состоит из воздуха, что напоминает строение другого прочного «материала» — человеческой кости.

Эффективные свойства материалов с низкой плотностью определяются сотовой архитектурой (то есть пространственной конфигурацией пустот в твердом теле), так и свойствами твердого компонента (например, жесткостью, прочностью и т. д.). В настоящее время в сверхлегком режиме ниже 10 мг/см^3 существует такие материалы: аэрогели с диоксидом кремния [плотность $\rho \geq 1 \text{ мг/см}^3$], аэрогели с углеродными нанотрубками [$\rho \geq 4 \text{ мг/см}^3$], металлические пены [$\rho \geq 10 \text{ мг/см}^3$] и полимерные пены [$\rho \geq 8 \text{ мг/см}^3$]. Материалы имеют широкий спектр применений, таких как теплоизоляция, амортизация ударов или вибрация, акустическое поглощение, токосъемники в электродах батареи и опорах катализатора. Все упомянутые выше материалы сверхнизкой плотности имеют случайную ячеистую архитектуру. Эта случайная структура ячейки приводит к некоторым полезным свойствам (например, высокой удельной площади поверхности и ограничению потока газа), но, как правило, неэффективное распределение компонента приводит к определенным свойствам (например, жесткость, прочность, поглощение энергии и проводимость). Например, модуль Юнга E сверхлегких стохастических материалов плохо масштабируется с плотностью, обычно следуя $E \sim \rho^3$, в отличие от хорошо известного отношения $E \sim \rho^2$ для случайных пен с открытыми порами с более высокими относительными плотностями. В крупномасштабных структурах было показано, что введение порядка и иерархии может существенно улучшить использование материала и результирующие свойства. Например, Эйфелева башня обладает относительной плотностью, подобной плотности аэрогелей низкой плотности, но она явно структурно устойчива. Разница в размерах между самыми маленькими и самыми большими структурными элементами будет определять степень иерархии. В этой статье представлен метод создания упорядоченных материалов решетчатых полых труб с минимальным масштабом $\sim 100 \text{ нм}$. в сочетании с контролем структурных элементов в масштабе от мм до см, это позволяет довести преимущества порядка и иерархии до уровня материалов. В результате получается сверхлегкий ячеистый материал с эффективным использованием материала, модулем Юнга, который следует за $E \sim \rho^2$, и способен восстанавливаться после сжатия больше 50%, демонстрируя при этом большое поглощение энергии при циклической нагрузке.

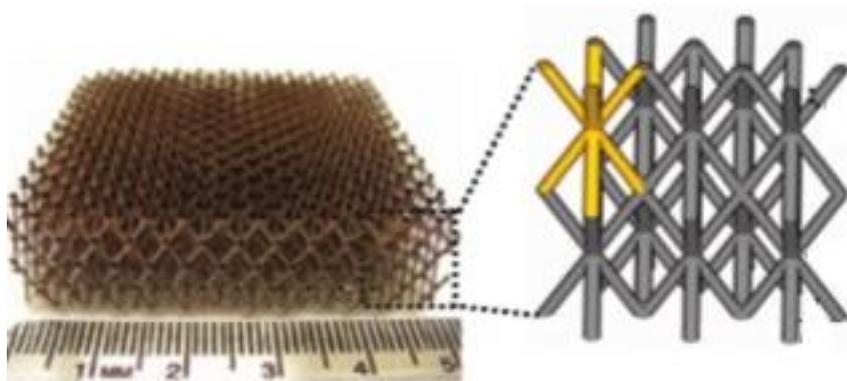


Рисунок 1. Ультралегкая металлическая губка

Базовая архитектура металлических микрорешеток состоит из периодического массива полых трубок, которые соединяются в узлах, образуя восьмигранную элементарную ячейку без каких-либо элементов решетки в базисной плоскости. Микроструктурная архитектура может быть разделена на три уровня иерархии в трех различных масштабах длины: элементарная ячейка (~ мм до см), элемент решетки с полой трубкой (~ мм до мм) и стенка с полой трубкой (~ нм до мм). Каждый архитектурный элемент может управляться независимо, обеспечивая исключительный контроль над дизайном и свойствами получаемой микротрещины. Архитектура определяет относительную плотность решетки с абсолютной плотностью, определяемой материалом пленки.

Процесс изготовления начинается с создания сплошных микроструктурных шаблонов с использованием самораспространяющего фотополимерного волновода. В этом методе жидкий тиоленовый фотономер подвергается воздействию коллимированного ультрафиолетового (УФ) света через узорчатую маску, создавая взаимосвязанную трехмерную решетку из фотополимера. Широкий спектр различных архитектур с размерами элементарной ячейки в диапазоне от 0,1 до 10 мм может быть получен путем изменения структуры маски и угла падающего света. Сфокусируемся на архитектурах с длиной L от 1 до 4 мм, диаметром D от 100 до 500 мкм, толщиной стенки от 100 до 500 нм и углом наклона 60° . Конформные никель-фосфорные тонкие пленки были нанесены на полимерные решетки методом электроосаждения, а полимер был впоследствии вытравлен. Автокаталитическая реакция безэлектронного никелирования позволяет осаждать тонкие пленки на сложных формах и внутренних порах без заметных ограничений по массообмену. Сверхлегкая микролатура по существу переводит осажденную наноразмерную тонкую пленку в трех измерениях, чтобы сформировать макроскопический материал, где базовые структурные элементы представляют собой полые трубки. Контролируя время реакции, можно получить однородное конформное покрытие толщиной 100 нм, в результате чего получается ячеистый материал с плотностью 0,9 мг / см³ (рис. 1). Плотность рассчитывается с использованием веса твердой структуры, но без учета веса воздуха в порах, в соответствии со стандартной практикой для ячеистых материалов. Плотность воздуха в условиях окружающей среды, 1,2 мг / см³, умноженная на его объемную долю, должна быть добавлена, чтобы выразить плотность твердотопливного композита. Этот метод формирования микроструктур

позволяет значительно более эффективно контролировать, чем обычные методы формирования других материалов сверхлегкого веса, таких как аэрогели из вспененного песка, где номинально случайные процессы определяют формирование пористости.

Характеристика базовой составляющей методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показала, что тонкие пленки никеля без электроосаждения в осаждении имеют средний размер зерна ~ 7 нм. Энергетически-дисперсионная рентгеновская спектроскопия подтвердила, что состав пленки составляет 7% фосфора и 93% никеля по массе. Поскольку пленки не подвергались отжигу после осаждения, они оставались в виде пересыщенного твердого раствора фосфора в кристалле. Характеристика базовой составляющей методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показала, что тонкослойные никелевые пленки без напыления имеют средний размер зерна ~ 7 нм. Энергетически-дисперсионная рентгеновская спектроскопия подтвердила, что состав пленки составляет 7% фосфора и 93% никеля по массе. Поскольку пленки не подвергались отжигу после осаждения, они оставались в виде пересыщенного твердого раствора фосфора в кристалле со штаммами, превышающими 50%. В этом эксперименте образец не был ограничен лицевыми панелями или прикреплен к каким-либо компрессионным валикам. Из-за небольшой конусности в диаметре распорки решетки деформация обычно начинается на конкретной поверхности. При первом сжатии решетка имеет модуль сжатия 529 кПа с отклонениями от линейного упругого поведения, начиная с ~ 10 кПа. Напряжение уменьшается незначительно после пика, что связано с событиями потери устойчивости и разрушения узла, и впоследствии на кривой напряжение-деформация устанавливается широкое плато по мере того, как события потери устойчивости и локализованного разрушения распространяются по решетке прижимной. После разгрузки напряжение быстро падает, но не приближается к нулю до тех пор, пока валик не закроется в исходное положение. После снятия нагрузки микроструктура восстанавливается до 98% своей первоначальной высоты и восстанавливает свою первоначальную форму. Поведение «напряжение-деформация», соответствующее первому циклу, никогда не повторяется во время последующего тестирования. Скорее, во время второго сжатия, пиковое напряжение отсутствует, и поведение «псевдотвердения» изменяется, но уровень напряжения, достигаемый при 50% деформации, всего на 10% ниже, чем после первого цикла. Последовательные циклы сжатия за исключением кривых напряжения-деформации почти идентичны кривым второго сжатия. Жесткость и прочность уменьшаются с номером цикла, но остаются почти постоянными после третьего цикла. Микрорешетка также показывает значительный гистерезис во время экспериментов по сжатию. Для первого цикла мы оцениваем работу, сделанную в сжатии, как $4,6 \text{ мДж/см}^3$, а рассеяние энергии - $3,5 \text{ мДж/см}^3$, что дает коэффициент энергопотребления (Du / u) 0,77. Это большое рассеяние энергии приводит к обширным микротрещинам узлов и, таким образом, ограничивается первым циклом. После трех циклов вычисляется почти постоянный коэффициент потери энергии $\sim 0,4$. Из этой оценки мы извлекаем коэффициент потерь ($\tan d$) $\sim 0,16$, что на порядок выше, чем для типичных никелевых пено-

пластов. Увеличение плотности и толщины стенок в конечном итоге привело к сжатию, более характерному для металлических ячеистых материалов.

Основа сверхлегкого материала — это переплетенные между собой трубки, их толщина в тысячу раз меньше толщины человеческого волоса. При этом и сами трубки изнутри полые. Первые образцы нового материала были сделаны из сплава фосфора и никеля, нанесенного на полимерную губчатую основу. Возможности применения «Никелевая кость» практически безграничны. В частности, появление материала было на «ура» встречено авиационной промышленностью, ведь изготовленные из ультралегкого материала компоненты самолета сократят общую массу лайнера, что поможет существенно сэкономить на топливе.

Список использованных источников:

1. Архипов В.А., Жарова И.К., Коротких А.Г. и др. Методы измерения коэффициента излучения поверхности теплоизоляционных материалов // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Докл. X Всерос. науч.-практ. конф. – Бийск, 26–28 мая 2010. – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2010. – С. 49–52.
2. Бирюкова, Н. М. Исследование сплавов на основе никеля, применяемых в электронном приборостроении / Н. М. Бирюкова, М. С. Липай, В. Г. Соколов. — Текст : непосредственный // Технические науки: проблемы и перспективы : материалы I Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, март 2011 г.). — Санкт-Петербург : Реноме, 2011. — С. 89-92.
3. Гершенфельд Н. (сентябрь 2013 г.). «Обратимо собранные сотовые композиционные материалы». Наука. – 2013. - 341 (6058): 1219–1221.