

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCESУДК 621.9.048:621.785.54
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-94-102>Поступило в редакцию 12.08.2019
Received 12.08.2019**Член-корреспондент В. В. Рубаник, Ю. В. Царенко***Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси,
Витебск, Республика Беларусь***ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ПРОВОЛОКИ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ
УГЛОВЫМ ПРОТЯГИВАНИИ**

Аннотация. Исследована структура ультрамелкозернистых материалов, полученных деформационными способами при воздействии ультразвуковых колебаний; предложены новые способы и устройства интенсивной пластической деформации с наложением ультразвуковых колебаний, позволяющие формировать ультрамелкозернистую структуру в протяженных материалах; определены оптимальные режимы пластической деформации и термообработки, позволяющие достичь наиболее высокой термостабильности и пластичности в сочетании с высокой прочностью материалов. Разработаны конструкции ультразвуковых колебательных систем для получения протяженных объемных наноструктурированных материалов, и опробована технологическая схема получения ультрамелкозернистой проволоки с использованием ультразвуковой обработки при равноканальном угловом протягивании. Показано, что данный процесс деформационной обработки может быть совмещен в единый технологический цикл с волочением проволоки. Применен в машиностроении, приборостроении и кабельной промышленности.

Ключевые слова: ультразвук, ультрамелкозернистые материалы, пластическая деформация, прочность, пластичность, термостабильность, структура, проволока

Для цитирования: Рубаник, В. В. Влияние ультразвука на физико-механические свойства проволоки при равноканальном угловом протягивании / В. В. Рубаник, Ю. В. Царенко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 1. – С. 94–102. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-94-102>

Corresponding Member Vasily V. Rubanik, Yury V. Tsarenko*Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Vitebsk, Republic of Belarus***ULTRASOUND INFLUENCE ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES
OF WIRE AT EQUAL-CHANNEL ANGULAR BROACHING**

Abstract. The structure of ultrafine-grained materials obtained by deformation methods under the influence of ultrasonic vibrations is investigated; new methods of intense plastic deformation have been developed with the imposition of ultrasonic vibrations, allowing the formation of an ultrafine-grained structure in extended materials; optimal modes of plastic deformation and heat treatment were determined, allowing one to achieve the highest thermal stability and ductility in combination with high strength of materials. The designs of ultrasonic oscillatory systems for obtaining extended bulk nanostructured materials were developed, and a technological scheme of producing an ultrafine-grained wire using ultrasonic processing with equal-channel angular broaching was tested. It is shown that this process of deformation processing is industrially applicable, and can be combined into a single technological cycle with wire drawing. The results can be used in engineering, instrument making and cable industry.

Keywords: ultrasound, ultrafine-grained materials, plastic deformation, strength, ductility, thermal stability, structure, wire

For citation: Rubanik V. V., Tsarenko Yu. V. Ultrasound influence on the physical and mechanical properties of wire at equal-channel angular broaching. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 1, pp. 94–102 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-94-102>

Введение. Наноструктурные материалы обладают высокой прочностью и рядом других, привлекательных для технических применений, физических свойств. Технологически весьма перспективными способами получения наноструктурных материалов являются деформационные методы объемного наноструктурирования – методы, использующие большие степени пластической деформации для измельчения зерен в исходно крупнозернистых материалах. Однако в ряде случаев пластичность наноструктурных материалов значительно ниже, чем у крупнозернистых поликристаллов. Кроме того, существует проблема термической стабильности микроструктуры наноструктурных материалов, в них рост зерен начинается при значительно более низких температурах, чем в крупнозернистых материалах. Эти особенности свойств связаны с микроструктурой наноструктурных материалов [1–7].

В [8] показана перспективность разработки непрерывных методов интенсивной пластической деформации, основанных на комбинировании различных схем пластической деформации. Формируемая при таком воздействии ультрамелкозернистая структура обеспечивает повышенные механические свойства металлов и сплавов без изменения их химического состава. На основе комбинирования деформаций растяжения и сжатия, которые существуют при волочении проволоки, с деформациями изгиба и кручения предложены методы, способствующие формированию ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в обрабатываемой проволоке. Существенным отличием предлагаемых способов от большинства существующих схем интенсивной пластической деформации является возможность непрерывной обработки длинномерных изделий в условиях массового производства на действующем оборудовании и с использованием существующего инструмента метизной отрасли. Отмечено, что эффективность процесса измельчения исходной крупнозернистой структуры, следовательно, и уровень механических свойств обрабатываемой проволоки для каждого метода различны. Это обусловлено разной степенью интенсивности комбинированного деформационного воздействия. Исследования механических свойств проволоки после разных видов комбинированной деформационной обработки показали большие возможности изменения механических свойств в широком диапазоне [9].

На основе анализа зависимости свойств металлов и сплавов от размера структурных составляющих показана высокая эффективность применения деформационных методов формирования УМЗ структуры для значительной модификации свойств материалов¹ [10]. Использование специальных схем деформации обеспечивает переход материала в УМЗ состояние, при этом наряду с существенным повышением прочности сохраняются пластические свойства материала [10]. Среди многочисленных разработок способ равноканального углового (РКУ) прессования остается наиболее прогрессивной схемой обработки, позволяющей формировать однородную УМЗ структуру с преимущественно большеугловыми границами зерен. Однако несмотря на это существующие способы обладают низкой технологичностью и ограниченностью использования в промышленных условиях.

Проблема может быть решена развитием известных и созданием принципиально новой непрерывной схемы деформации, адаптированной к условиям промышленного производства и позволяющей формировать УМЗ структуру проволоки для гарантированного достижения высоких прочностных показателей продукции.

Общим для ультрамелкозернистых материалов, полученных деформационными методами, является то, что их микроструктура неравновесна (метастабильна). Электронномикроскопические исследования показывают диффузный дифракционный контраст границ зерен в данных материалах, свидетельствующий о наличии высоких внутренних напряжений. Источниками этих напряжений являются неравновесные границы зерен, сформировавшиеся при пластической деформации.

Одной из проблем фундаментального характера является проблема термической стабильности ультрамелкозернистой структуры, так как развитая поверхность границ зерен делает такую структуру предельно неустойчивой. В связи с этим представляет повышенный интерес определение кинетических констант роста зерен в ультрамелкозернистых материалах. Дан-

¹ Устройство деформирования проволоки: пат. 8704 Респ. Беларусь / Ю. В. Царенко, В. В. Рубаник, В. Ю. Лобанов; дата публ.: 30.10.2012.

ная научная задача осложняется тем обстоятельством, что в УМЗ материалах довольно часто наблюдается аномальный рост зерен, заключающийся в укрупнении лишь отдельных зерен и приводящий во время отжига к образованию так называемой бимодальной зеренной микроструктуры, характеризующейся наличием соседствующих мелко- и крупнокристаллической фракций зерен [5; 6].

Известно [10], что ультразвуковое воздействие при определенных амплитудах может способствовать релаксации неравновесной структуры границ зерен и снятию таким образом внутренних напряжений. Это должно оказать положительный эффект на термическую стабильность микроструктуры и пластичность ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов. Таким образом, можно ожидать повышения комплекса свойств наноматериалов путем воздействия ультразвуком.

Необходимо отметить, что пластическая деформация с наложением ультразвуковых колебаний является одним из высокоэффективных методов модификации микроструктуры материалов. При этом в зависимости от частоты, амплитуды, локальности воздействия можно достичь как упрочнения материала, так и его разупрочнения, пластификации.

Целью данной работы является разработка метода деформационного измельчения структуры в протяженных материалах с использованием ультразвуковых колебаний, установление закономерностей изменения микроструктуры, механических свойств и термической стабильности протяженных ультрамелкозернистых материалов при воздействии ультразвуковой обработки.

Результаты и их обсуждение. Суть метода равноканальной угловой протяжки заключается в многократном протягивании проволоки через волоку специального профиля, что вызывает одноосное растяжение и изгиб проволоки одновременно в двух очагах деформации. Способ реализуется при неполном заполнении инструмента проволокой, которая в процессе обработки сохраняет неизменной площадь поперечного сечения (рис. 1).

Отметим, что предлагаемые в настоящее время способы интенсивной пластической деформации (ИПД) не могут быть применены в массовом производстве для изготовления крупногабаритных изделий (например, при производстве проката или проволоки), поскольку размеры образцов, получаемых с использованием интенсивного кручения под высоким давлением, равноканального углового прессования и винтового прессования, невелики. Ограничения связаны с тем, что в этих схемах в комбинации со сдвигом используется сжатие, которое реализуется в малом технологическом пространстве. Схема сдвиговой пластической деформации с растяжением лишена этого недостатка. Такое сочетание в полной мере можно отнести к разряду комбинированных схем пластической деформации со сдвигом.

На основании уравнения баланса мощностей [12] показано, что зависимость, описывающая влияние угла соосности инструмента относительно заготовки на напряжение деформирования p , имеет вид

$$\frac{p}{2k} = \frac{1 + (1-x)^2 + 2fx}{2-x} + 2f(1-x), \quad (1)$$

$$x = h / d,$$

где h – изменение соосности проволоки относительно канала волоки; d – диаметр канала волоки; f – величина фактора трения; k – максимальное касательное напряжение. Величина h определяется углом входного конуса волоки β и длиной калибрующей зоны a ($h = a \sin \beta$).

Анализ уравнения (1) показывает, что $p / 2k$ имеет минимум при $x \approx 0,6$ независимо от величины фактора трения f . Подставляя это значение x в (1), находим

$$p_{\min} = 1,66k(1 + 2f).$$

Расчет напряжения деформирования на выходе проволоки из калибрующей зоны волоки проводится аналогичным образом.

С целью снижения силы трения в очаге деформации предложено устройство с выполненным профилем волочильного инструмента в материале концентратора ультразвуковых колебаний [13],

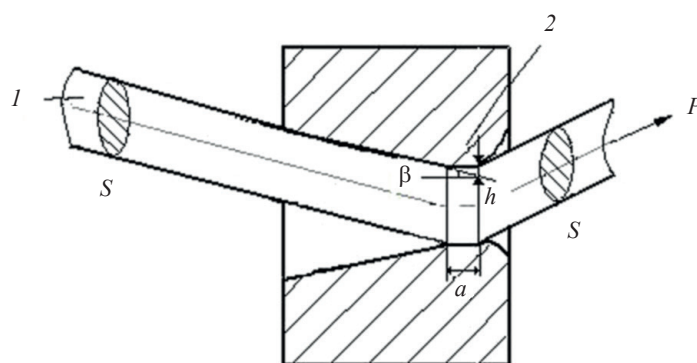


Рис. 1. Схема очага деформации РКУ протягивания проволоки 1 через волоку 2

Fig. 1. The scheme of the deformation of the RCU wire stretching 1 through the draw plate 2

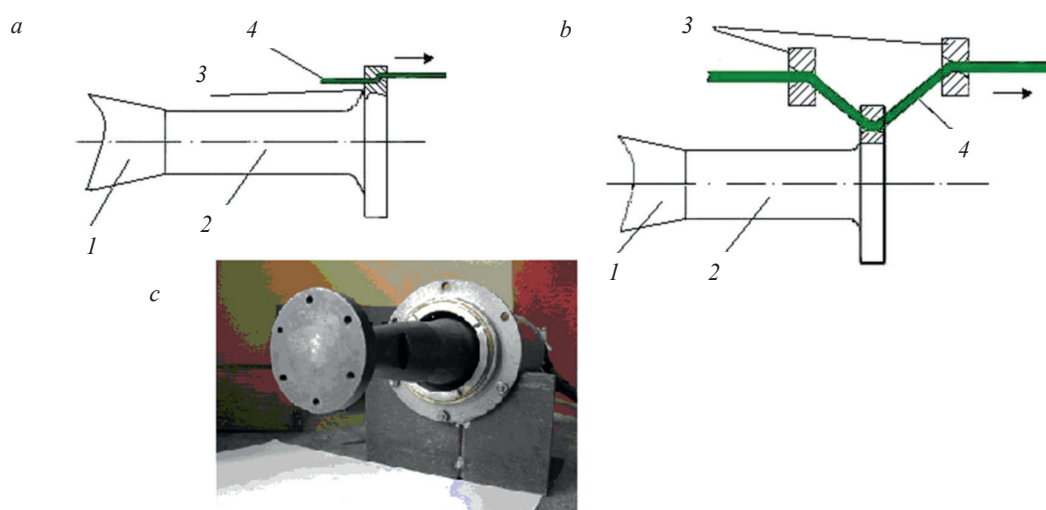


Рис. 2. Схемы устройств РКУ протягивания проволоки с наложением ультразвуковых колебаний (a, b); вид концентратора колебаний с волочильными каналами (c)

Fig. 2. Schemes of devices RKU extending a wire with an overlay of US (a, b); a kind of hub oscillation with rod channels (c)

расположенное в пучности его смещений, что обеспечивает повышение производительности устройства деформации проволоки (рис. 2). С целью обеспечения технологической стабильности пластическая деформация реализуется при неполном заполнении инструмента проволокой, которая в процессе обработки сохраняет неизменной площадь поперечного сечения. При этом выполняется условие недопустимости превышения значений напряжений, возникающих в переднем конце заготовки под действием усилия протяжки, величины временного сопротивления материала проволоки. Нарушение этого условия приведет к обрыву переднего конца проволоки.

В пересекающиеся каналы отверстий 3, выполненных в волноводе, помещают проволоку 4 и, включая питание ультразвукового преобразователя 1, возбуждают в концентраторе 2 ультразвуковые колебания. При деформации проволока 4 изменяет направление течения два раза и извлекается из инструмента 3 тянущим барабаном.

При изменении направления течения проволоки 4 происходит сдвиговая деформация и упрочнение металла. Наложение ультразвуковых колебаний на инструмент 3 позволяет снизить силы трения, приводит к изменению условий течения металла и облегчению пластического деформирования проволоки 4. Процесс деформации проволоки с использованием предлагаемого устройства повторяют несколько раз до достижения необходимого уровня механических свойств.

Использование в качестве источника ультразвуковых колебаний магнитострикционного преобразователя типа ПМС15А-18 обеспечивает выполнение в торцевой поверхности волновода специальной конструкции порядка 6–8 волоочильных каналов, что позволяет на одном устройстве реализовать схему многократного протягивания проволоки различных диаметров методом РКУ.

Поскольку изготовление инструмента специального профиля (рис. 2, *a*) в материале концентратора ультразвуковых колебаний является трудоемкой задачей, кроме того, и стойкость такого инструмента в целом невысокая, особенно при обработке сильно упрочняемых материалов, предложено РКУ протягивание проволоки с наложением ультразвуковых колебаний осуществлять через три волокна из твердого сплава и синтетического алмаза типа СКМ одинакового диаметра (рис. 2, *b*). Устройство работает следующим образом. В пересекающиеся каналы волок 3 помещают проволоку 4 и, включая питание ультразвукового преобразователя 1, возбуждают в концентраторе 2 ультразвуковые колебания. При протягивании с помощью ролика 3 проволока 4 изменяет направление движения два раза, подвергаясь деформации изгибом в разных направлениях. В концентраторе ультразвуковых колебаний волокна могут быть запрессованы, либо в его торце, где максимальная амплитуда смещений, выполнялись отверстия с профилем волоочильного канала.

Концентратор ультразвуковых колебаний (рис. 2, *c*) был изготовлен из стали 40Х и термообработан до твердости 40–42 HRC. В торцевой поверхности концентратора выполнены отверстия по профилю волоочильного инструмента. Наложение ультразвуковых колебаний на инструмент уменьшает силы трения, приводит к изменению условий течения металла и снижению усилия пластического деформирования проволоки.

Воздействие ультразвука на процесс пластической деформации проволоки оказывает влияние на контактные условия, свойства и структуру деформируемого материала, изменение схемы напряженного состояния, характер протекания пластической деформации. Действие указанных факторов проявляется в разной степени и зависит от интенсивности ультразвуковых колебаний, выбора волоочильного инструмента, скоростных условий протекания процесса обработки.

После РКУ протягивания проволоки с наложением ультразвуковых колебаний были проведены испытания ее механических свойств (предел прочности, относительное удлинение, микротвердость), а также рентгеноструктурные и электронномикроскопические исследования.

Установлено, что микротвердость никеля после РКУ протягивания без обработки с ультразвуком до температуры нагрева 150 °С снижается незначительно, затем происходит ее резкое уменьшение (рис. 3). Микротвердость деформированного с ультразвуком никеля в зависимости от температуры отжига до температуры нагрева 150 °С практически не изменяется.

В интервале температур отжига 150–250 °С микротвердость проволоки резко снижается, далее с ростом температуры нагрева наблюдается ее монотонное снижение. На основании этого можно сделать вывод, что никель, подвергнутый интенсивной пластической деформации методом РКУ протягивания с наложением ультразвука, является термически стабильным до температуры 150 °С, а затем его свойства резко изменяются.

При температуре отжига от 150 до 200 °С наблюдается резкое снижение микротвердости никеля после РКУ протягивания без воздействия ультразвука, но после РКУ протягивания с наложением ультразвука данный процесс заканчивается при температурах более высоких, около 240 °С. Таким образом, РКУ протягивание с амплитудой смещений 10 мкм на волокне приводит к некоторому повышению термостабильности механических свойств никеля. С дальнейшим ростом температуры отжига до 500 °С наблюдается монотонное снижение микротвердости никеля независимо от условий РКУ протягивания проволоки. Полученные результаты согласуются с исследованиями термостабильности сильноупрочненного методом кручения под высоким давлением никеля после ультразвуковой обработки [13; 14].

После РКУ протягивания наблюдается также изменение физико-механических свойств образцов никелевой проволоки НП2 (рис. 4). Так, предел прочности проволоки σ_b уже после четырех циклов РКУ протягивания достигает значения 480 МПа и при дальнейших циклах

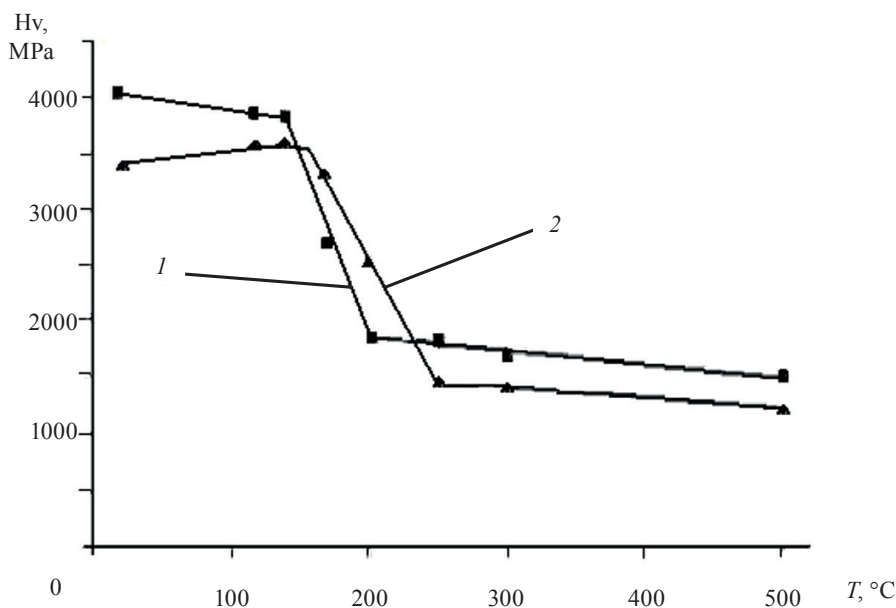


Рис. 3. Зависимость микротвердости деформированной проволоки никеля от температуры нагрева: 1 – без УЗК; 2 – с УЗК

Fig. 3. Dependence of the microhardness of the deformed nickel wire on the heating temperature: 1 – without ultrasonic; 2 – with ultrasonic

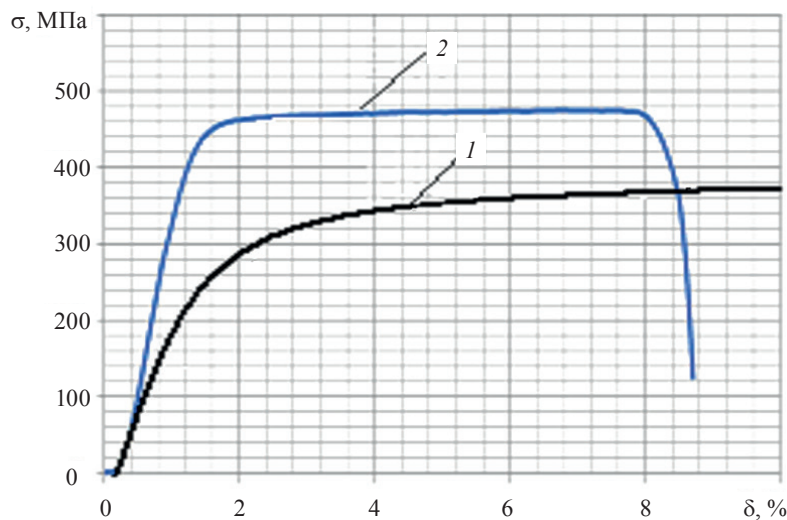


Рис. 4. Кривые растяжения проволоки НП2: 1 – отожженный образец; 2 – после 4 циклов растягивания

Fig. 4. Tension curves of the wire NP2: 1 – annealed sample; 2 – after 4 cycles of stretching

протягивания изменяется до 750 МПа. Относительное удлинение проволоки после РКУ протягивания при этом уменьшается до 6–7 %.

Установлено, что оптимальная амплитуда ультразвуковых колебаний в зоне обработки протягиваемой проволоки составляет 10–14 мкм. Для достижения высокого предела прочности и сохранения высокого уровня пластических свойств никелевой проволоки достаточно РКУ деформации за 4–5 проходов.

Микроструктурные исследования никеля (рис. 5) показали, что после 10 циклов пластической деформации методом РКУ протягивания с наложением ультразвука происходит измельчение зерен с 2–3 мкм в исходном состоянии до 500–700 нм.

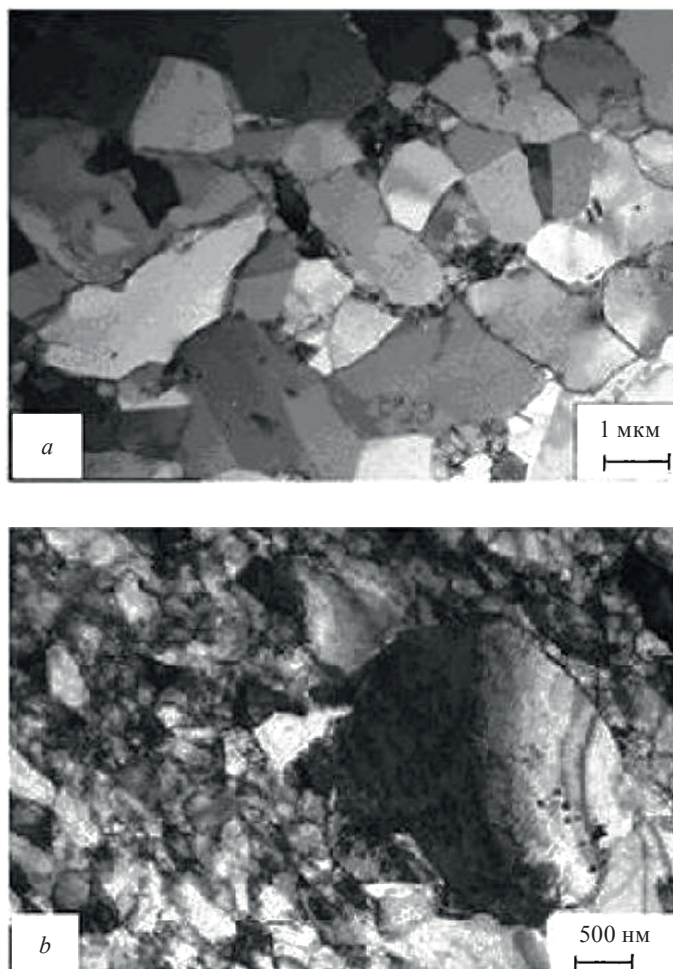


Рис. 5. Микроструктура проволоки НП2 после отжига (а) и РКУ протягивания (b) за 10 проходов

Fig. 5. Microstructure of NP2 wire after annealing (a) and RCU stretching (b) for 10 passes

Заключение. Разработан способ РКУ протягивания с наложением ультразвуковых колебаний, позволяющий получать проволоку с ультрамелкозернистой структурой. Показано, что при РКУ протягивании наблюдается повышение прочностных свойств никелевой проволоки при сохранении высоких пластических свойств, что позволяет использовать данный процесс в условиях массового производства протяженных изделий. Разработана и опробована технологическая схема получения ультрамелкозернистой проволоки с использованием ультразвуковой обработки при равноканальном угловом протягивании. Данный процесс деформационной обработки промышленно применим и может быть совмещен в единый технологический цикл с процессом волочения проволоки.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Т19-067).

Acknowledgement. The work has been financially supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant no. T19-067).

Список использованных источников

1. Валиев, Р. З. Объемные наноструктурные материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М., 2007. – 397 с.
2. Мулюков, Р. Р. Деформационные методы наноструктурирования материалов: предпосылки, история, настоящее и перспективы / Р. Р. Мулюков, А. А. Назаров, Р. М. Имаев // Изв. вузов. Физика. – 2008. – Т. 51, № 5. – С. 47–59.
3. Носкова, Н. И. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы / Н. И. Носкова, Р. Р. Мулюков. – Екатеринбург, 2003. – 279 с.

4. Nazarov, A. A. Nanostructured Materials. Chapter 22 / A. A. Nazarov, R. R. Mulyukov // Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology / ed. W. Goddard [et al.]. – Boca Raton; London; New York; Washington, 2002. <https://doi.org/10.1201/9781420040623>

5. Чувильдеев, В. Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения / В. Н. Чувильдеев. – М., 2004. – 304 с.

6. Исследование формирования субмикроструктурной структуры поверхностного слоя стальной проволоки с целью повышения уровня ее механических свойств / Г. С. Гун [и др.] // Вестн. Магнитогорского гос. тех. ун-та им. Г. И. Носова. – 2007. – № 3. – С. 84–86.

7. Исследование особенностей структурообразования в процессе интенсивной пластической деформации углеродистых конструкционных сталей / М. В. Чукин [и др.] // Черные металлы. – 2011. – № 7/8. – С. 25–28.

8. Влияние ультразвуковой обработки на структуру и механические свойства ультрамелкозернистого никеля, полученного равноканальным угловым прессованием / А. А. Самигуллина [и др.] // Письма о материалах. – 2012. – Т. 2, № 4. – С. 214–217.

9. Changes in the microstructure and mechanical properties of nanomaterials under an ultrasonic wave effect / A. A. Nazarov [et al.] // J. Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – Vol. 43, N 2. – P. 153–159. <https://doi.org/10.3103/s1052618814020113>

10. Лаптев, А. М. Влияние конфигурации штампа на напряжение и деформации при равноканальном угловым прессовании / А. М. Лаптев, Е. Ю. Вяль // Физика и техника высоких давлений. – 2007. – Т. 17, № 3. – С. 97–102.

11. Effect of ultrasonic treatment on the structure and properties of ultrafine-grained nickel / A. A. Nazarova [et al.] // Physics of Metals and Metallography. – 2010. – Vol. 110, N 6. – P. 574–581. <https://doi.org/10.1134/s0031918x10120082>

12. Effect of ultrasonic treatment on the microstructure and properties of nanostructured nickel processed by high pressure torsion / A. A. Nazarova [et al.] // Materials Science Forum. – 2010. – Vol. 667–669. – P. 605–609. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.667-669.605>

13. Microstructure changes in ultrafine-grained nickel processed by high pressure torsion under ultrasonic treatment / A. A. Samigullina [et al.] // Ultrasonics. – 2018. – Vol. 82. – P. 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.09.005>

14. Царенко, Ю. В. Получение протяженных объемных наноструктурированных материалов с использованием ультразвуковой обработки / Ю. В. Царенко, В. В. Рубаник, В. П. Бобров // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: материалы Междунар. науч. конф., Витебск, 26–29 сент. 2016 г. – Витебск, 2016. – С. 191–193.

References

1. Valiev R. Z., Alexandrov I. V. *Bulk nanostructured materials: preparation, structure and properties*. Moscow, 2007. 397 p. (in Russian).

2. Mulyukov R. R., Nazarov A. A., Imaev R. M. Deformational methods of material nanostructuring: Premises, history, state of the art, and prospects. *Russian Physics Journal*, 2008, vol. 51, no. 5, pp. 492–504. <https://doi.org/10.1007/s11182-008-9068-4>

3. Noskova N. I., Mulyukov R. R. *Submicrocrystalline and nanocrystalline metals and alloys*. Yekaterinburg, 2003. 279 p. (in Russian).

4. Nazarov A. A., Mulyukov R. R. Nanostructured Materials. Chapter 22. Goddard W., Brenner D., Lyshevski S., Iafate G. (eds.). *Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology*. Boca Raton, London, New York, Washington, 2002. <https://doi.org/10.1201/9781420040623>

5. Chuvil'deev V. N. *Nonequilibrium grain boundaries in metals. Theory and applications*. Moscow, 2004. 304 p. (in Russian).

6. Gun G. S., Chuikin M. V., Emaleeva D. G., Kopceva N. V., Efimova Ju. Ju., Baryshnikov M. P. Study the formation of submicrocrystalline structure in the surface layer of the steel wire with the purpose of improve its mechanical properties. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G. I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2007, no. 3, pp. 84–86 (in Russian).

7. Chuikin M. V., Kopceva N. V., Korchunov A. G., Emaleeva D. G., Nikitenko O. A. Study of structure formation peculiarities in the process of intensive plastic deformation of carbon structural steels. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2011, no. 7/8, pp. 25–28 (in Russian).

8. Samigullina A. A., Tsarenko Ju. V., Rubanik V. V., Popov V. A., Danilenko V. N., Mulyukov R. R. Effect of ultrasonic treatment on structure and mechanical properties of ultrafinegrained nickel, processed by equal-channel angular pressing. *Letters on Materials*, 2012, vol. 2, no. 4, pp. 214–217. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2012-4-214-217>

9. Nazarov A. A., Samigullina A. A., Mulyukov R. R., Tsarenko Yu. V., Rubanik V. V. Changes in the microstructure and mechanical properties of nanomaterials under an ultrasonic wave effect. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2014, vol. 43, no. 2, pp. 153–159. <https://doi.org/10.3103/s1052618814020113>

10. Laptev A. M., V'yal E. Yu. Influence of die configuration on stress and strain at equal-channel angular pressing. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii = Physics and High Pressure Technology*, 2007, vol. 17, no. 3, pp. 97–102 (in Russian).

11. Nazarova A. A., Mulyukov R. R., Rubanik V. V., Tsarenko Yu. V., Nazarov A. A. Effect of ultrasonic treatment on the structure and properties of ultrafine-grained nickel. *Physics of Metals and Metallography*, 2010, vol. 110, no. 6, pp. 574–581. <https://doi.org/10.1134/s0031918x10120082>

12. Nazarova A. A., Mulyukov R. R., Tsarenko Yu. V., Rubanik V. V., Nazarov A. A. Effect of ultrasonic treatment on the microstructure and properties of nanostructured nickel processed by high pressure torsion. *Materials Science Forum*, 2010, vol. 667–669, pp. 605–609. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.667-669.605>

13. Samigullina A. A., Mukhametgalina A. A., Sergeyev S. N., Zhilyaev A. P., Nazarov A. A., Zagidullina Yu. R., Parkhimovich N. Yu., Rubanik V. V., Tsarenko Yu. V. Microstructure changes in ultrafine-grained nickel processed by high pressure torsion under ultrasonic treatment. *Ultrasonics*, 2018, vol. 82, pp. 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.09.005>

14. Tsarenko Yu. V., Rubanik V. V., Bobrov V. P. Production of extended bulk nanostructured materials using ultrasonic processing. *Tekhnicheskaya akustika: razrabotki, problemy, perspektivy: materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Vitebsk, 26–29 sentyabrya 2016 g.* [Technical acoustics: developments, problems, prospects: materials of the International Scientific Conference, Vitebsk, September 26–29, 2016]. Vitebsk, 2016, pp. 191–193 (in Russian).

Информация об авторах

Рубаник Василий Васильевич – член-корреспондент, д-р техн. наук, заведующий лабораторией. Институт технической акустики НАН Беларуси (пр. Генерала Людникова, 13, 210009, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: ita@vitebsk.by.

Царенко Юрий Валентинович – канд. техн. наук, заместитель директора. Институт технической акустики НАН Беларуси (пр. Генерала Людникова, 13, 210009, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: labpt@vitebsk.by.

Information about the authors

Rubanik Vasily V. – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Head of the Laboratory. Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus (13, General Ludnikov Ave., 210009, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: ita@vitebsk.by.

Tsarenko Yuriy V. – Ph. D. (Engineering), Deputy Director. Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus (13, General Ludnikov Ave., 210009, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: labpt@vitebsk.by.