

Член-корреспондент В. В. Рубаник<sup>1</sup>, Ю. В. Царенко<sup>1</sup>, Дж. Т. Вонг<sup>2</sup>, Ю. В. Ли<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси,  
Витебск, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Нанкинский университет науки и технологии, Нанкин, Китайская Народная Республика*

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Аннотация.** Описано оригинальное устройство для получения наноструктурных материалов методом интенсивной пластической деформации с наложением ультразвуковых колебаний, которое обеспечивает измельчение структуры материала заготовки и исключает возникновение дефектов на ее поверхности и в торцевых областях. Этот эффект достигается за счет использования кольцевой прокладки, выполненной в виде полого волновода резонансной длины, закрепленного на неподвижной опоре в узле смещений, соединенного с концентратором и ультразвуковым преобразователем. Исследованы физико-механические свойства наноструктурных образцов никеля и меди после ультразвуковой обработки (УЗО). Показано, что УЗО наноструктурных образцов приводит к повышению их пластических свойств и незначительному снижению предела прочности. При малых амплитудах механических напряжений в пределах 17,5 МПа в образцах меди и никеля наблюдается заметный рост микротвердости. Дальнейшее увеличение амплитуды механических напряжений при ультразвуковой обработке до 100 МПа приводит к снижению микротвердости.

**Ключевые слова:** нанометаллы, ультразвуковая обработка, пластическая деформация, микротвердость, предел прочности

**Для цитирования.** Влияние ультразвуковой обработки на механические свойства металлов, подвергнутых интенсивной пластической деформации / В. В. Рубаник [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 356–364. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-356-364>

Corresponding Member Vasili V. Rubanik<sup>1</sup>, Yury V. Tsarenko<sup>1</sup>, Jing T. Wang<sup>2</sup>, Yu W. Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus, Vitebsk, Republic of Belarus*

<sup>2</sup>*Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, People's Republic of China*

## INFLUENCE OF ULTRASONIC PROCESSING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF METALS SUBJECTED TO INTENSE PLASTIC DEFORMATION

**Abstract.** An original device for production of nanostructured materials by the method of severe plastic deformation with the imposition of ultrasonic vibrations is described, which provides the grinding of the structure of the material of the workpiece and eliminates the occurrence of defects on its surface and in the end areas. This effect is achieved through the use of an annular spacer made in the form of a hollow waveguide of resonant length, fixed on a fixed support in the displacement unit, connected to a concentrator and an ultrasonic transducer. The physical-mechanical properties of nanostructured samples of nickel and copper after ultrasonic treatment (UST) have been studied. It is shown that UST of nanostructured samples leads to an increase in their plastic properties and a slight decrease in the tensile strength. At small amplitudes of mechanical stresses within 17.5 MPa, a noticeable microhardness increase is observed in copper and nickel samples. A further increase in the mechanical stress amplitude up to 100 MPa during ultrasonic treatment leads to a microhardness decrease.

**Keywords:** nanometals, ultrasonic treatment, plastic deformation, microhardness, ultimate strength

**For citation.** Rubanik V. V., Tsarenko Yu. V., Wang J. T., Liu Yu W. Influence of ultrasonic processing on the mechanical properties of metals subjected to intense plastic deformation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 356–364 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-356-364>

**Введение.** Формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) и нанокристаллической (НС) структур методами интенсивного пластического деформирования (ИПД) дает возможность радикально влиять как на деформационное поведение, так и на механические свойства металлов и сплавов, что позволяет считать ИПД весьма перспективным методом управления их структурой

и физико-механическими свойствами. Большой интерес к наноструктурированным материалам обусловлен их уникальными физическими и механическими свойствами: прочностью, пластичностью, износостойкостью, проводимостью и др. [1–3]. В силу того, что ультрамелкозернистые и нанокристаллические материалы появились сравнительно недавно, их устойчивость к внешним энергетическим воздействиям, в частности, к пластической деформации и ультразвуковой обработке (УЗО) изучена пока недостаточно, также не изучены процессы получения и способы последующей обработки таких материалов.

Общим для УМЗ и НС материалов, полученных деформационными методами объемного наноструктурирования, является то, что их микроструктура неравновесна (метастабильна). Электронно-микроскопические исследования показывают диффузный дифракционный контраст границ зерен в УМЗ и НС материалах, свидетельствующий о наличии высоких внутренних напряжений. Источниками этих напряжений являются неравновесные границы зерен, сформировавшиеся в процессе интенсивной пластической деформации металла [2; 4].

Несмотря на то что нанометаллы имеют высокую прочность, значительно превышающую прочность обычных металлов, их деформационная упрочняющая способность и пластичность низки. Высокая плотность кристаллических дефектов и значительная запасенная энергия приводят к низкой термической стабильности и электропроводности нанометаллов, что ограничивает область их применения. Материаловеды предлагают различные методы обработки наноструктурированных материалов, такие как неполный рекристаллизационный отжиг, градиентная деформация и др., чтобы получить гетерогенную микроструктуру в металле, и тем самым оптимизировать соотношение прочности, пластичности и электропроводности.

К настоящему времени исследователями накоплен большой опыт по интенсификации процессов обработки металлов давлением (ОМД) и изменению физико-механических свойств материалов с помощью ультразвуковых колебаний [5–7], т. е. ультразвуковое воздействие можно осуществлять как в процессе деформации металлов и сплавов, так и подвергать ультразвуковой обработке материалы после различных видов пластической деформации. Обработка металлов давлением с наложением ультразвуковых колебаний широко используется после открытия Блеха и Лангенекером акустопластического эффекта, заключающегося в резком снижении напряжения пластического течения металла при ультразвуковом воздействии [8]. Однако работ по применению ультразвукового контроля в процессах интенсивной пластической деформации практически нет. Это обусловлено в первую очередь трудностью ввода ультразвуковых колебаний в очаг деформации. Так, в [9] ультразвуковое воздействие на деформируемый металл при равноканальном угловом протягивании (РКУП) осуществляли непосредственно через пуансон или волновод, расположенный в дополнительном канале матрицы и контактирующий с деформируемым металлом в зоне сопряжения входного и выходного каналов. Эффективность ультразвукового воздействия при такой схеме РКУП невысокая, что и подтверждается результатами данного исследования.

Ультразвуковое воздействие на металлы эффективно и для интенсивной пластической деформации при равноканальном угловом протягивании. Такой способ позволяет снизить силы трения, что приводит к изменению условий течения металла и оказывает влияние на его физико-механические свойства [5], и, самое главное, получать протяженные изделия, например, проволоку. Как уже отмечалось, с помощью ультразвуковой обработки можно существенно улучшить физико-механические свойства металлов после интенсивной пластической деформации в УМЗ и НС состоянии. Так, нами впервые было показано, что УЗО является эффективным способом релаксации структуры сильно деформированных материалов, которая повышает долю большеугловых границ зерен, релаксацию неравновесных границ и тройных стыков зерен, не приводя к значительному росту зерен, при этом эффект релаксации структуры зависит от амплитуды ультразвука. Установлен эффект роста пластичности никеля, полученного методом РКУП после УЗО, происходящий одновременно с ростом предела текучести и предела прочности никеля, что может иметь практически важное значение для повышения комплекса механических свойств наноматериалов [10].

Целью данной работы является разработка метода деформационного измельчения структуры в протяженных материалах t-NPS способом с использованием ультразвуковых колебаний, а также

установление закономерностей изменения структуры, механических свойств ультрамелкозернистых материалов при ультразвуковой обработке.

**Материалы и методы исследования.** Основой способа получения ультрамелкозернистой структуры материалов послужил метод ИПД кручением под высоким давлением [3]. Однако данный метод не позволяет получать протяженные образцы с однородными физико-механическими свойствами. Поэтому нами выбран способ интенсивной пластической деформации, называемый «tube high-pressure shearing (t-HPS)», при котором процесс сдвига обусловлен трением между инструментом и образцом под высоким гидростатическим давлением, при этом плоскость сдвига параллельна радиусу конического образца во время процесса [11; 12]. Принцип обработки металла при t-HPS деформировании заключается в том, что образец находится под высоким всесторонним давлением (рис. 1).

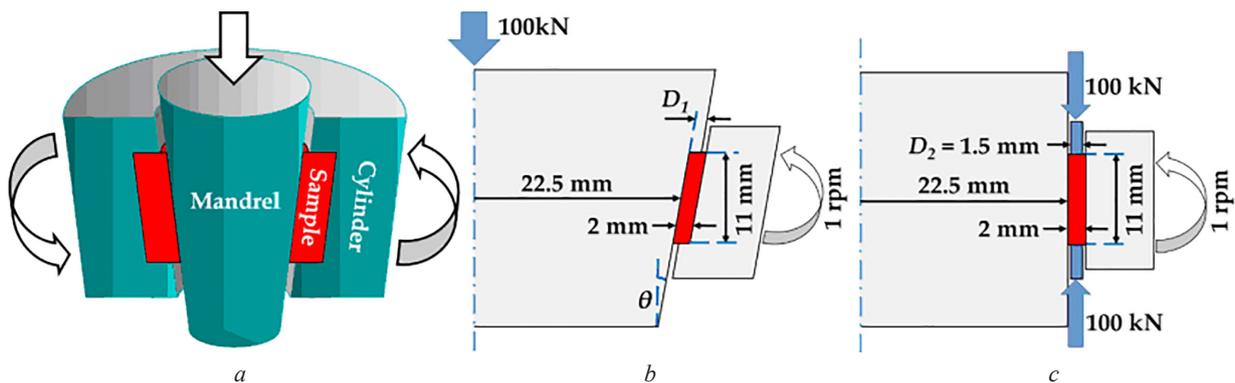


Рис. 1. Принципы и геометрия инструмента высокого давления (t-HPS): *a* – схема создания давления t-HPS с помощью эффекта клина; *b* – геометрия t-HPS давления с помощью клинового эффекта с углом в половину конуса  $\theta$  и глубиной вогнутости цилиндра  $D_1$ ; *c* – схема t-HPS устройства при герметизации концов образца кольцами  $D_2$  [11; 12]

Fig. 1. Principles and geometry of the high pressure tool (t-HPS): *a* – the scheme of creating the t-HPS pressure using the wedge effect; *b* – t-HPS pressure geometry using a wedge effect with a half-cone angle  $\theta$  and a cylinder concavity depth  $D_1$ ; *c* – scheme of the t-HPS device when sealing the ends of the sample with  $D_2$  rings [11; 12]

Трубчатый образец находится между оправкой и цилиндром (конусом) под высоким гидростатическим давлением, действующим на его боковые стенки, так что силы трения на границе между оправкой образца или цилиндром достаточно велики, чтобы предотвратить любое проскальзывание их относительно друг друга. Зафиксировав оправку и вращая цилиндр или наоборот оправку, в образце создается простой сдвиг. Оправка подвергается осевой нагрузке, которая преобразуется в нормальное усилие на контактных поверхностях между оправкой и цилиндром. При этом за счет действия клина в образце создается высокое гидростатическое давление.

Недостатком данного устройства является низкое качество поверхности получаемых изделий, а также возникновение микротрещин и разрывов в месте их контакта с кольцевыми прокладками. Это обусловлено как высокими силами трения между получаемым изделием и оснасткой (оправкой и основанием), так и пластическим течением обрабатываемого материала вблизи кольцевых прокладок. Контакт поверхности обрабатываемой заготовки с поверхностями устройства обработки в условиях высокого давления и сдвига приводит к схватыванию материала заготовки с материалом оснастки, что влечет возникновение задиров на поверхности полученного изделия. Сдвиг материала на поверхности заготовки в одном и том же направлении при увеличивающемся давлении приводит вначале к росту количества дислокаций в структуре материала заготовки, которые при дальнейшем сдвиге приводят к образованию границ раздела зерен и измельчению материала, и далее, вблизи кольцевых прокладок, вследствие наличия возможности пластического течения материала – к образованию микротрещин. Возникновению микротрещин и их дальнейшему росту также способствует неизменное направление действующих сил, поэтому любая возникшая микротрещина быстро расширяется. Все это приводит к необходимости дополнительной механической обработки получаемых изделий, обрезке краев и, соответственно, увеличенному расходу материала.

Нами разработано устройство (рис. 2) для изготовления полых конических заготовок, которое содержит сопряженные по форме и выполненные с возможностью вращения друг относительно друга оправку и основание конической формы, снабженные верхней и нижней кольцевыми прокладками для предотвращения выдавливания заготовки, и расположенный соосно с ними гидропривод, соединенный с основанием<sup>1</sup>.

Разработанное устройство дополнительно содержит полый волновод резонансной длины, закрепленный на неподвижной опоре в узле ультразвуковых колебаний, соединенный последовательно с концентратором и ультразвуковым преобразователем, при этом верхняя кольцевая прокладка жестко соединена с основанием или выполнена с ним заодно в виде пояска, а нижняя кольцевая прокладка выполнена заодно с полым волноводом. Преимущество предложенного устройства заключается в постоянном изменении локального направления сдвига, что предупреждает зарождение и развитие микротрещин в материале обрабатываемой заготовки. Кроме того, дополнительная энергия, получаемая материалом заготовки за счет ультразвуковых колебаний, расходуется на измельчение его структуры и в результате повышает качество получаемого изделия.

Постоянное изменение направления сдвига приводит к невозможности образования микротрещин и их дальнейшему росту, так как разрушение отдельных зерен обрабатываемого материала фиксируется на стадии образования границ зерен, т. е. измельчения структуры материала. Микротрещины наиболее легко зарождаются на границе зерен в том случае, когда направление внешних сил является нормальным к этой границе, и они действуют в течение времени, достаточного для перестройки кристаллической структуры. Поэтому быстрое изменение направления сдвига при возбуждении ультразвуковых колебаний в заготовке предотвращает образование в ней микротрещин.

Кроме того, возбуждение ультразвуковых колебаний в заготовке предотвращает ее схватывание с материалом оснастки. Постоянная вибрация не позволяет сблизиться атомам контактирующих материалов на расстояние, необходимое для образования химической связи. Даже если такое схватывание происходит в силу наличия высокого давления, эти связи тут же разрушаются из-за постоянного изменения направления сдвига. Качество поверхности получаемой детали существенно возрастает.

Возбуждение в обрабатываемой заготовке колебаний в процессе обработки достигается за счет ее контакта с волноводом, соединенным с ультразвуковым преобразователем через концентратор. Наличие концентратора, выполнение волновода резонансной длины и его фиксация на неподвижной опоре в узле колебаний обеспечивают максимальный коэффициент передачи энергии ультразвуковых колебаний от источника материалу заготовки. Полая форма волновода обусловлена формой обрабатываемой заготовки и экономией материала волновода. Наилучшие экспериментальные результаты были получены в случае, когда верхняя кольцевая прокладка жестко соединялась с основанием или выполнялась с ним заодно в виде пояска, а нижняя кольцевая прокладка выполнялась заодно с полым волноводом. Именно такая конструкция исключает затухание ультразвука в обрабатываемой заготовке и повышает эффективность измельчения кристаллической структуры.

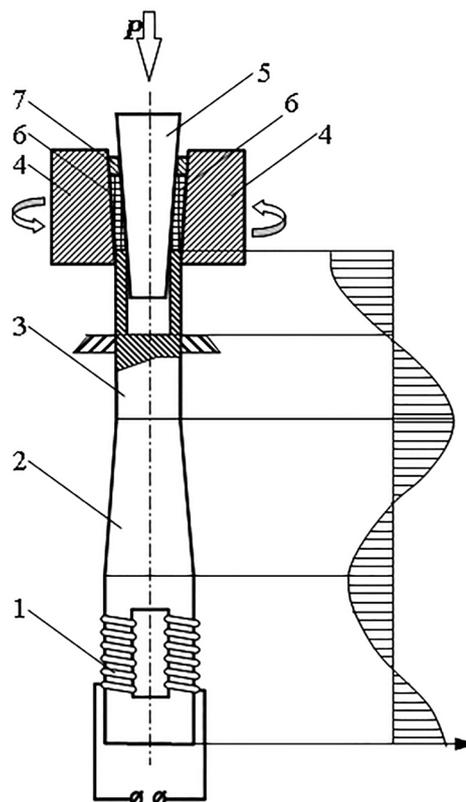


Рис. 2. Устройство для t-HPS обработки металлов с наложением ультразвука

Fig. 2. Device for t-HPS processing of metals with superposition of ultrasound

<sup>1</sup> Устройство для изготовления полых конических деталей: патент ВУ 12828 / В. В. Рубаник, Ю. В. Царенко, Цз. Т. Ван, Чж Ли. – Оpubл. 28.02.2022.

Устройство (рис. 2) состоит из ультразвукового преобразователя 1, концентратора ультразвуковых колебаний 2, соединенного с ним полого волновода 3 резонансной длины, закрепленного на неподвижной опоре в узле колебаний. Между вращающейся оправкой 4 и основанием 5 помещена обрабатываемая заготовка 6, кольцевая прокладка 7 жестко соединена с основанием 5. Полный волновод 3 составляет с нижней кольцевой прокладкой одно целое.

Процесс интенсивной пластической деформации металлической заготовки осуществляется следующим образом. Между оправкой 4 и основанием 5 помещают обрабатываемую заготовку 6 в форме трубки, которую поджимают к кольцевой прокладке 7 и торцу полого волновода 3. К основанию 5 прикладывают внешнее давление  $P$  от гидропривода и через привод осуществляют вращение оправки 4. Ультразвуковые колебания от преобразователя 1 посредством концентратора ультразвуковых колебаний 2 (трансформатора амплитуды) передаются на полный волновод 3 и далее на торцевую поверхность обрабатываемой заготовки 6, выполненной в форме кольца. Возбуждение ультразвуковых колебаний в полом волноводе 3 приводит к постоянному изменению направления сдвига на границах раздела обрабатываемой заготовки 6 с оправкой 4 и основанием 5, что облегчает измельчение структуры материала заготовки и препятствует возникновению дефектов на ее поверхности и в торцевых областях.

Данным способом интенсивной пластической деформации получены полосы наноструктурированного никеля и меди, из которых были вырезаны образцы размерами  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup> для последующей ультразвуковой обработки.

Для релаксации структуры образцов наноструктурных никеля и меди методом ультразвукового воздействия с точки зрения эффективности знакопеременного механического воздействия использован способ, в котором обработку образцов осуществляли в пучности механических напряжений стоячей волны волновода в закрепленном состоянии [13]. Для этого образец материала после ИПД закреплялся внутри полости волновода в пучности напряжений с помощью специального винта, обеспечивающего надежный акустический контакт между волноводом и обрабатываемым образцом. Питание преобразователя ПМС15А-18 осуществляли от ультразвукового генератора УЗГ2-4М. Обработка наноструктурных образцов выполнялась при различных усилиях их поджатия в пучности осциллирующих напряжений волновода. Амплитуду механических напряжений в образцах изменяли от 17,5 до 100 МПа.

В работе были исследованы физико-механические свойства образцов никеля и меди в наноструктурном состоянии до и после ультразвуковой обработки при различных значениях амплитуды знакопеременных напряжений.

Механические свойства образцов определяли на микротвердомере по методу микро-Виккерса типа HVS-1000Z (TIME Group Inc., Китай), который предназначен для проведения измерений на образцах малых размеров. Испытания производили путем вдавливания алмазного индентора пирамидальной формы в поверхность образца с испытательным усилием 0,98 Н. Встроенный микропроцессор HVS-1000 позволяет автоматически проводить испытание с отображением величины твердости на ЖКИ.

**Результаты и их обсуждение.** О прочностных свойствах образцов, полученных методом t-NPS интенсивной пластической деформации, судили по измерениям микротвердости по методу Виккерса (таблица).

Анализ результатов, представленных в таблице, показывает, что при малых амплитудах ультразвука (17,5 МПа) наблюдается заметный рост микротвердости наноструктурных образцов как меди, так и никеля. Дальнейшее увеличение интенсивности ультразвуковой обработки до 50 МПа приводит к снижению микротвердости исследованных нанометаллов до уровня образцов без УЗО. После обработки образцов при амплитуде УЗО 100 МПа наблюдается снижение микротвердости меди и никеля соответственно на 6 и 4,5 % по сравнению с образцами без ультразвуковой обработки.

Результаты механических испытаний образцов наномеди и наноникеля на растяжение (рис. 3 и 4) показали, что относительное удлинение образцов, испытанных растяжением после УЗО, имеет более высокие значения до 16 %. Кривая 3 на графике характеризует образцы после отжига, т. е. находящиеся в крупнозернистом состоянии. Относительное удлинение отожженных образцов меди превышает 50 %, предел прочности при этом не достигает 250 МПа.

**Микротвердость образцов наномеди и наноникеля**

**Microhardness of nickel and copper samples**

Режим обработки образца Sample processing mode	Амплитуда УЗО, МПа Amplitude of ultrasonic treatment, MPa	HV, МПа
Nano-Cu	без УЗО	1514
Nano-Cu + УЗО	17,5	1653
Nano-Cu + УЗО	35	1580
Nano-Cu + УЗО	50	1532
Nano-Cu + УЗО	70	1503
Nano-Cu + УЗО	100	1413
Nano-Ni	без УЗО	4370
Nano-Ni + УЗО	17,5	4927
Nano-Ni + УЗО	35	4730
Nano-Ni + УЗО	50	4327
Nano-Ni + УЗО	70	4205
Nano-Ni + УЗО	100	4170

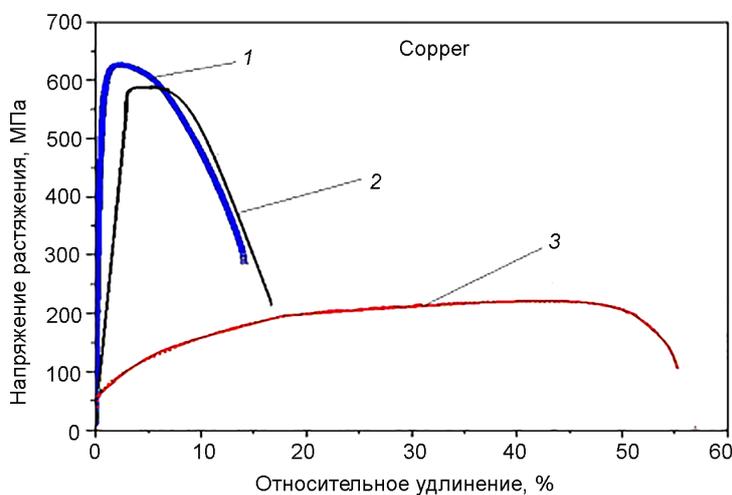


Рис. 3. Кривые растяжения образцов наномеди: 1 – исходный (без УЗО); 2 – после УЗО 70 МПа; 3 – после отжига

Fig. 3. Curves stretching samples of nanocopper: 1 – source (without UST); 2 – after UST 70 MPa; 3 – after annealing

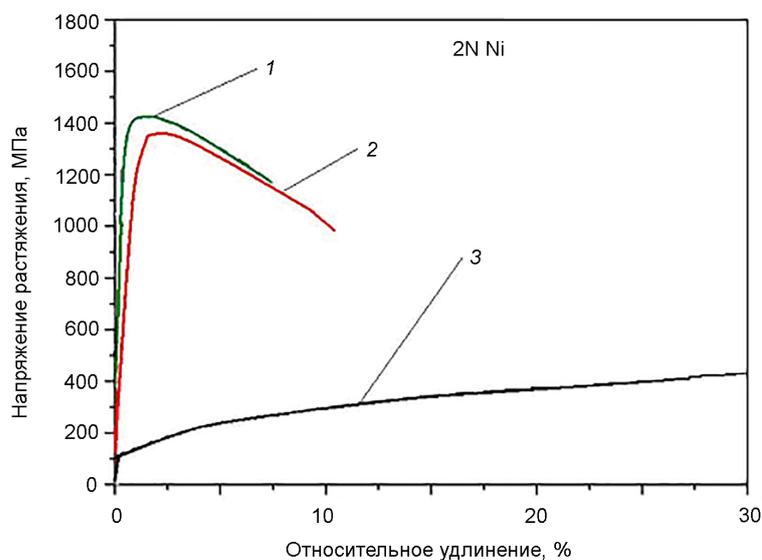


Рис. 4. Кривые растяжения образцов наноникеля: 1 – без УЗО; 2 – после УЗО 70 МПа; 3 – после отжига

Fig. 4. Nanonickel samples stretching curves: 1 – without UST; 2 – after UST 70 MPa; 3 – after annealing

Как видно из рис. 3, предел прочности образцов наномеди без УЗО несколько выше, чем после УЗО с амплитудой знакопеременных напряжений 70 МПа, что, скорее всего, связано с эффектом релаксации дислокационных и неравновесных границ зерен, который зависит от интенсивности ультразвука.

Воздействие ультразвука с амплитудой, значительно превышающей предел текучести материала, способно разрушать дислокационные границы и приводит к генерации новых дислокаций, их накоплению в границах зерен, приводя тем самым не к снижению, а к росту внутренних напряжений. Амплитуда знакопеременных напряжений 70 МПа существенно ниже предела текучести наноматериала, поэтому происходит усовершенствование структуры [7; 10].

Исследования показали, что предел прочности образцов наноникеля (рис. 4) без УЗО несколько выше, чем после обработки ультразвуком, что вызвано снижением внутренних напряжений под действием ультразвука путем релаксации дислокационных границ и неравновесных границ зерен.

Следует отметить, что уровень прочностных свойств для никеля выше 1200 МПа является высоким результатом для этого металла. Относительное удлинение при этом образцов, испытанных растяжением после УЗО, имеет более высокие значения, достигая значения 11 %. В то время как у образцов без УЗО эта величина составляет около 7,5 %.

Представляет интерес поведение обработанного ультразвуком наноструктурного никеля при последующем отжиге. Известно, что степень неравновесности поликристалла оказывает значительное влияние на его термическую стабильность. Ввиду этого, УМЗ и НС металлы, полученные ИПД и характеризующиеся неравновесной структурой границ зерен, обладают низкой термостабильностью структуры и свойств. Снижение избыточной энергии границ зерен, их кривизны замедляют рост зерен.

На рис. 5 видно, что нагрев до 120–150 °С незначительно снижает значение микротвердости образцов наномеди независимо от вида обработки, что может быть связано с процессами возврата.

После отжига при 180–220 °С микротвердость образцов снижается существенно, более чем на 30 % по сравнению с микротвердостью исходных образцов меди с ультрамелкозернистой структурой. Такое резкое снижение величины микротвердости свидетельствует о протекании процесса рекристаллизации, что подтверждается ранее проведенными структурными исследованиями на УМЗ никеле [7; 14]. Повышение температуры отжига до 270 °С приводит к дальнейшему снижению микротвердости и к приближению ее до значений, характерных для отожженной меди. Из графика видно, что наибольшая термическая устойчивость образцов наномеди наблюдается после ультразвуковой обработки при амплитуде механических напряжений 17,5 МПа.

В данном случае, поскольку УЗО привела к релаксации внутренних напряжений, наблюдается определенное повышение термостабильности: начало аномального роста зерен при отжиге

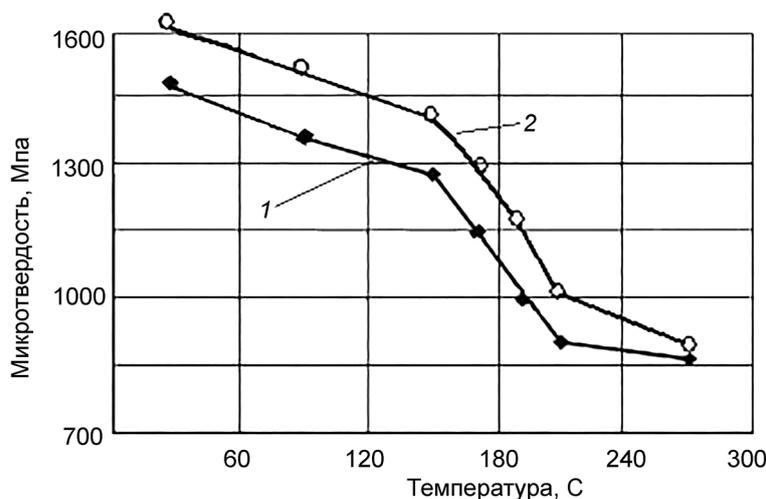


Рис. 5. Изменение микротвердости образцов наномеди после нагрева: 1 – без УЗО; 2 – после УЗО 17,5 МПа

Fig. 5. Changes in the microhardness of the nanomed samples after heating: 1 – without UST; 2 – after UST 17.5 MPa

смещается примерно на 30–40 °С в сторону более высоких температур. Наиболее значительным в этом отношении является влияние обработки с амплитудой 40 МПа. Однако видно, что этот результат не коррелирует с зависимостью эффекта снижения внутренних напряжений от амплитуды. В противном случае следовало бы ожидать максимального увеличения термостабильности после УЗО с амплитудой 140 МПа. Поэтому нельзя утверждать, что единственным фактором, оказывающим влияние на термостабильность УМЗ никеля, является степень неравновесности границ зерен и наличие дальнедействующих напряжений, создаваемых ими. Возможно, необходимо учитывать образование вакансий при воздействии ультразвука на материал. Повышение числа вакансий и их кластеров, очевидно, вносит свой вклад в изменение термостабильности УМЗ материала.

**Заключение.** Разработано устройство для получения наноструктурных материалов с наложением ультразвуковых колебаний методом t-NPS, содержащее вращающуюся оправку и конус, находящийся под внешним давлением, между которыми располагается трубчатая заготовка, кольцевые прокладки, установленные с верхнего и нижнего концов заготовки, при этом кольцевая прокладка выполнена в виде полого волновода резонансной длины, закрепленного на неподвижной опоре в узле смещений, соединенного с концентратором и ультразвуковым преобразователем, при этом верхняя кольцевая прокладка жестко соединена с конусом. Предложенное устройство позволяет повысить качество поверхности получаемых изделий, а также устранить возникновение микротрещин и разрывов в месте их контакта с кольцевыми прокладками, устраняется необходимость дополнительной механической обработки получаемых изделий, обрезка краев и, соответственно, увеличенный расход материала.

Результаты исследований физико-механических свойств наноструктурных образцов никеля и меди после ультразвуковой обработки показали, что после такой обработки наблюдается повышение пластических свойств и незначительное снижение предела прочности. Показано, что при малых амплитудах напряжений ультразвука до 17,5 МПа наблюдается заметный рост микротвердости наноструктурных образцов как меди, так и никеля, а дальнейшее увеличение интенсивности ультразвуковой обработки до 100 МПа приводит к снижению микротвердости.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Т19КИТГ-003).

**Acknowledgement.** The work has been financially supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant T19KITG-003).

#### Список использованных источников

1. Valiev, R. Z. Structure and properties of ultra fine-grained materials produced by severe plastic deformation / R. Z. Valiev, A. V. Korznikov, R. R. Mulyukov // *Materials Science and Engineering*. – 1993. – Vol. A168, N 2. – P. 141–148. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(93\)90717-s](https://doi.org/10.1016/0921-5093(93)90717-s)
2. Носкова, Н. И. Субмикроструктурные и нано-кристаллические металлы и сплавы / Н. И. Носкова, Р. Р. Мухомов. – Екатеринбург, 2003. – 279 с.
3. Бриджмен, П. В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва / П. В. Бриджмен. – М., 1955. – 444 с.
4. Zhilyaev, A. P. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications / A. P. Zhilyaev, T. G. Langdon // *Progr. Mater. Sci.* – 2008. – Vol. 53, N 6. – P. 893–979. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.03.002>
5. 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>
6. Hanges in the Microstructure and Mechanical Properties of Nanomaterials under an Ultrasonic Wave Effect / A. A. Nazarov [et al.] // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2014. – Vol. 43, N 2. – P. 153–159. <https://doi.org/10.3103/s1052618814020113>
7. 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>
8. Blaha, F. Dehnung von Zink-Kristallen unter Ultraschalleinwirkung / F. Blaha, B. Langenecker // *Naturwissenschaften*. – 1955. – Vol. 42, N 20. – P. 556. <https://doi.org/10.1007/bf00623773>
9. Ultrasonic assisted – ECAP / F. Djevanroodi [et al.] // *Ultrasonics*. – 2013. – Vol. 53, N 6. – P. 1089–1096. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.02.003>
10. Effect of Ultrasonic Treatment on the Strength and Ductility of Bulk Nanostructured Nickel Processed by Equal-Channel Angular Pressing / A. A. Samigullina [et al.] // *Rev. on Advanced Materials Science*. – 2014. – Vol. 39, N 1. – P. 48–53.
11. Investigation on the Strain Distribution in Tube High-Pressure Shearing / J. Meng [et al.] // *Metals*. – 2019. – Vol. 9, N 10. – Art. 1117. <https://doi.org/10.3390/met9101117>
12. Principles of severe plastic deformation using tube high-pressure shearing / J. T. Wang [et al.] // *Scr. Mater.* – 2012. – Vol. 67, N 10. – P. 810–813. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.07.028>

13. Ультразвуковая обработка нанометаллов, полученных деформационными методами / Ю. В. Царенко [и др.] // Актуальные проблемы прочности: материалы Междунар. науч. конф., Витебск, 25–29 мая 2020 г. / под ред. В. В. Рубаника. – Молодечно, 2020. – С. 366–368.

14. 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>

## References

1. Valiev R. Z., Korznikov A. V., Mulyukov R. R. Structure and properties of ultra fine-grained materials produced by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering*, 1993, vol. A168, no. 2, pp. 141–148. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(93\)90717-s](https://doi.org/10.1016/0921-5093(93)90717-s)
2. Noskova N. I., Mulyukov R. R. *Submicrocrystalline and nanocrystalline metals and alloys*. Yekaterinburg, 2003. 279 p. (in Russian).
3. Bridgman P. W. *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*. New York; London, McGraw-Hill, 1952. 362 p.
4. Zhilyaev A. P., Langdon T. G. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science*, 2008, vol. 53, no. 6, pp. 893–979. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.03.002>
5. 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>
6. 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>
7. Samigullina A. A., Mukhametgalina A. A., Sergeev 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>
8. Blaha F., Langenecker B. Dehnung von Zink-Kristallen unter Ultraschalleinwirkung. *Naturwissenschaften*, 1955, vol. 42, no. 20, p. 556 (in German). <https://doi.org/10.1007/bf00623773>
9. Djavanroodi F., Ahmadian H., Koohkan K., Naseri R. Ultrasonic assisted-ECAP. *Ultrasonics*, 2013, vol. 53, no. 6, pp. 1089–1096. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.02.003>
10. Samigullina A. A., Nazarov A. A., Mulyukov R. R., Tsarenko Yu. V., Rubanik V. V. Effect of Ultrasonic Treatment on the Strength and Ductility of Bulk Nanostructured Nickel Processed by Equal-Channel Angular Pressing. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2014, vol. 39, no. 1, pp. 48–53.
11. Meng J., Li Z., Liu Y., Zhu Y. B., Wang S., Lin K., Tao J. Q., Wang J. T. Investigation on the Strain Distribution in Tube High-Pressure Shearing. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 10, art. 1117. <https://doi.org/10.3390/met9101117>
12. Wang J. T., Li Z., Wang J., Langdon T. G. Principles of severe plastic deformation using tube high-pressure shearing. *Scripta Materialia*, 2012, vol. 67, no. 10, pp. 810–813. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.07.028>
13. Tsarenko Yu. V., Rubanik V. V., Lutsko V. F., Samoletov V. G., Wang J. T., Liu Yu. Ultrasonic treatment of nanometals obtained by deformation methods. *Aktual'nye problemy prochnosti: materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Vitebsk, 25–29 maya 2020 goda* [Actual problems of strength: materials of the International Scientific Conference, Vitebsk, May 25–29, 2020]. Molodechno, 2020, pp. 366–368 (in Russian).
14. 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>

## 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 по научно-инновационной работе. Институт технической акустики НАН Беларуси (пр. Генерала Людникова, 13, 210009, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: labpt@vitebsk.by.

Ванг Джинг Тао – профессор обработки материалов, заместитель директора. Институт Герберта Глейтера, Нанкинский университет науки и технологии (163, Xianlin Road, Qixia District, Nanjing, Jiangsu Province, 210023). E-mail: jtwangcn@163.com.

Лио Ювель – научный сотрудник. Факультет материаловедения и инженерии. Нанкинский университет науки и технологии (163, Xianlin Road, Qixia District, Nanjing, Jiangsu Province, 210023). E-mail: liuyw\_working@163.com.

## 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 Yury V. – Ph. D. (Engineering), Deputy Director for Research and Innovation. 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.

Wang Jing Tao – Professor of Materials Processing, SMSE Vice Director. Herbert Gleiter Institut, Nanjing University of Science & Technology (163, Xianlin Road, Qixia District, Nanjing, Jiangsu Province, 210023). E-mail: jtwangcn@163.com.

Liu Yu Weil – Research associate. School of Materials Science and Engineering. Nanjing University of Science & Technology (163, Xianlin Road, Qixia District, Nanjing, Jiangsu Province, 210023). E-mail: liuyw\_working@163.com.