

Влияние ультразвуковой обработки на структурные превращения и механическое поведение аморфных сплавов (ОБЗОР)

Пермякова Инга Евгеньевна^{*1}, доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник лаборатории физикохимии и механики металлических материалов

Дюжева-Мальцева Елена Вадимовна², аспирант

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва (Россия)

*E-mail: inga_perm@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1163-3888>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7199-487X>

Поступила в редакцию 17.03.2025

Пересмотрена 03.04.2025

Принята к публикации 27.05.2025

Аннотация: Широкое применение аморфных сплавов осложнено узким диапазоном их термической стабильности, охрупчиванием при повышенных температурах, труднообрабатываемостью, низкой пластичностью при растяжении. Ультразвуковая обработка является инновационным методом для решения этих проблем. Встраивание в технологическую цепочку ультразвуковой технологии может способствовать совершенствованию эксплуатационных характеристик аморфных сплавов, изготовлению из них деталей на разных масштабных уровнях, а также качественному соединению с другими материалами. Влияние ультразвуковых вибраций на структурные превращения и механическое поведение аморфных сплавов изучено не в полной мере. Отсутствие целостного научного обоснования физических процессов и сопутствующих эффектов в аморфных сплавах при ультразвуковом возбуждении препятствует развитию соответствующей технологии и оптимизации ее режимов. За последнее десятилетие исследователи предложили различные методики ультразвуковой обработки аморфных сплавов для улучшения их формовости, достижения баланса пластичности и прочности, консолидирования друг с другом и с металлами. Кроме того, развиты определенные представления об омоложении их структуры, о возможностях перевода в частично нанокристаллическое состояние под действием ультразвука. Чтобы подвести итог этим разработкам, приводится систематическое обсуждение особенностей, параметров и режимов ультразвуковой обработки применительно к ленточным и объемным аморфным сплавам для улучшения их структурочувствительных свойств. На этой основе рассматриваются ограничения текущих исследований. К наиболее перспективным применениям ультразвуковых технологий для быстрозакаленных сплавов в ближайшем будущем следует отнести: их аддитивное производство, создание гибридных композитов за счет ультразвуковой сварки, ультразвуковое формование для изготовления изделий сложных форм и геометрии, комплексную многоэтапную обработку для получения уникального сочетания свойств (например, закалка из расплава → лазерное облучение → ультразвуковое стимулирование). Настоящий обзор расширяет существующие знания об ультразвуковом управлении свойствами, структурой аморфных сплавов и облегчает исследователям быстрый поиск ссылок по данной тематике.

Ключевые слова: аморфный сплав; ультразвуковая обработка; структурные превращения; механическое поведение; нанокристалл; омоложение структуры; композит; пластичность; формование.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00319-25-00.

Для цитирования: Пермякова И.Е., Дюжева-Мальцева Е.В. Влияние ультразвуковой обработки на структурные превращения и механическое поведение аморфных сплавов (ОБЗОР) // Frontier Materials & Technologies. 2025. № 2. С. 53–71. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-2-72-5.

ВВЕДЕНИЕ

Аморфные сплавы (АС), полученные быстрой за-
калкой из расплава или литьем в медную изложницу
(в случае объемных АС), обладают уникальными физи-
ческими свойствами, что делает их весьма перспектив-
ными для многих применений в таких областях, как
энергетика, электроника, катализ, медицина, аэрокос-
мическая промышленность [1–3]. Благодаря необычной
структуре с отсутствием дальнего порядка и структур-
ных дефектов, таких как дислокации и межзеренные
границы, АС по сравнению с кристаллическими анало-
гами характеризуются повышенным пределом упру-
гости, высокой прочностью, твердостью, коррозион-
но- и износостойкостью, каталитической активностью,

а некоторые – биосовместимостью [4–6]. Однако, как
своего рода метастабильный материал, АС переходят
под действием приложенных напряжений, высоких тем-
ператур или даже в естественных условиях к более ста-
бильному энергетическому состоянию. Явление «старе-
ния» структуры может сопровождаться ухудшением
свойств. Кроме того, АС демонстрируют почти нулевую
пластичность при растяжении вследствие распростра-
нения магистральных сильнолокализованных полос сдвига,
что препятствует их использованию в качестве конст-
рукционного материала [7; 8]. В связи с этим присталь-
ное внимание ученых-материаловедов сконцентрировано
на разработке стратегий по структурному омоложе-
нию АС, которое будет способствовать большему

разупорядочению аморфной матрицы и тем самым эффективно размягчению [9]. С другой стороны, баланса прочности и пластичности возможно достичь за счет формирования в объеме АС оптимальной доли нанокристаллов, которые могут предотвратить распространение трещин и инициировать увеличение количества полос сдвига, за счет которых реализуется пластическая деформация в АС [10–12].

Для модификации структуры АС, преодоления охрупчивания, улучшения их термической стабильности используются многочисленные подходы: отжиг и термоциклирование [13–15], электростатическое сжатие [16; 17], ионное облучение [18; 19], холодная прокатка [20; 21], кручение под высоким давлением [22; 23]. Однако эти методы, как правило, требуют много экспериментального времени и высоких затрат, а некоторые имеют ограничения по размеру образцов, что делает их применение в производственных процессах весьма сложным. Следовательно, существует острая необходимость в формировании инновационного одноэтапного удобного подхода к обработке АС. Метод, основанный на использовании энергии ультразвуковых (УЗ) колебаний с частотой выше 20 кГц, является одним из перспективных методов обработки материалов, характеризуется простотой в управлении и быстрым временем отклика [24–27]. Он может напрямую вводить высокую энергию в стеклообразную матрицу, оказывая влияние на отклик свойств и сложные физические процессы, включая стеклование, структурную релаксацию, кристаллизацию, механизмы упрочнения и пластификации.

Цель работы – анализ мирового опыта применения УЗ обработки для управления структурой и совершенствования свойств АС, а также проведения технологических операций с ними.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поиск актуальных научных работ, касающихся темы обзора, охватывал период с момента первой публикации до наших дней. Выборка проводилась среди статей рецензируемых журналов, книг, конференционных материалов из авторитетных международных реферативно-библиографических баз данных Web of Science и Scopus. Кроме того, чтобы отследить текущие исследования, были использованы ресурсы Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), а также патентной базы РФ.

Ранжирование найденных материалов проводилось в зависимости от особенностей физических процессов и явлений, происходящих при УЗ обработке, а также достижения конкретных практических целей. В соответствии с этим были выделены три направления исследований АС при УЗ модифицировании:

- 1) изучение процессов омоложения их структуры для реализации формирования;
- 2) изучение процессов нанокристаллизации АС для наилучшего сочетания прочности и пластичности;
- 3) разработка методологии УЗ пайки/сварки для эффективного быстрого соединения АС друг с другом или с кристаллическими материалами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Ретроспективный анализ

Проводя анализ литературных источников в ретроспективе, следует отметить важный факт: первые публикации по применению УЗ возбуждения на АС появились в России. В 1992 г. ученые из ЦНИИчермет им. И.П. Бардина О.М. Смирнов и А.М. Глезер в статье [28], а годом позже в авторском свидетельстве [29] отметили эффективность УЗ обработки для улучшения механических свойств ленточных АС системы Fe–Cr–B. И только спустя почти десятилетие, в 2003 г., в Университетах Осаки и Кагавы были развернуты полномасштабные исследования в данной области [30; 31]. Сначала изучался отклик упругих и неупругих свойств объемных АС на основе циркония $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ при УЗ вибрациях, а эксперименты проводились в очень широком диапазоне частот 300–1500 кГц [30]. В 2005 г. были изучены особенности кристаллизации АС $Pd_{42,5}Ni_{7,5}Cu_{30}P_{20}$ при частотах 0,35 МГц [31]. Далее японские исследователи решили проверить возможность соединения АС друг с другом с помощью УЗ сварки и в 2008 г. сообщили об успешной консолидации $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ при сочетании УЗ сварки с небольшим нагревом (ниже температуры стеклования) [32]. Нескольких публикаций оказалось достаточно, чтобы в Китае заинтересовались и перехватили инициативу в проведении фундаментальных исследований влияния УЗ стимулирования на структуру и свойства АС. Сейчас именно китайские научные группы являются бесспорными лидерами в данном направлении. Попытки изучать УЗ технологии применительно к АС предпринимались также в США [33], Беларуси [34], Германии [35], Украине [36–39], но весьма эпизодически.

2. Структурное омоложение

2.1. Проблема охрупчивания и пути ее решения

Было обнаружено, что металлические материалы подвергаются значительному размягчению, сопровождающемуся снижением прочности под действием УЗ (эффект акустопластичности, или эффект Блахэ) [40; 41]. На основе этих характеристик была разработана технология формирования с помощью УЗ вибрации. Хрупкость остается одним из основных недостатков АС, препятствующих их более широкому применению. Во время трудоемких процессов (облучения, эластостатического нагружения, криотермического циклирования) при борьбе с потерей пластичности в АС неизбежно вмешивается обратная релаксация, что ослабляет эффект структурного омоложения. Кроме того, сам механизм омоложения до конца не ясен. Чтобы найти подходящие решения проблемы охрупчивания, в исследованиях последних лет объединены УЗ вибрации с процессом формирования АС.

В [42; 43] обнаружено значительное улучшение термопластической формруемости объемных АС $Zr_{35}Ti_{30}Be_{26,75}Cu_{8,25}$ при использовании УЗ колебаний и ее положительная корреляция с амплитудой ультразвука. В работе [44] предложен метод сжатия с помощью УЗ вибрации. На примере АС $Zr_{52,5}Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}Ti_5$ показано, что таким способом можно достичь его

быстрого (за 10 с) структурного омоложения, а сам сплав становится более гетерогенным с лучшей способностью к пластической деформации. Кроме того, при УЗ сжатии на поверхности излома АС возникает пластическая деформация, свидетельствующая о том, что по мере постепенного увеличения амплитуды ультразвука предел текучести сплава снижается, а пластичность повышается, что может существенно упростить формуемость АС при комнатной температуре.

2.2. Физические аспекты процесса омоложения и сопутствующий отклик механических свойств

На рис. 1 схематически представлен многоуровневый ландшафт потенциальной энергии, иллюстрирующий эволюцию возможных структурных состояний АС. Энергетические ямы и барьеры контролируют термодинамическую устойчивость материала. Самый глу-

бокий минимум энергии соответствует стабильным кристаллическим фазам, а другие минимумы энергии представляют некоторые метастабильные стеклообразные состояния (рис. 1 а).

Омоложение сопровождается увеличением потенциальной энергии и повышением концентрации свободного объема. В свою очередь, структурная релаксация приводит к понижению потенциальной энергии и более низкому содержанию свободного объема по сравнению с исходным состоянием АС (в условиях сверхбыстрого охлаждения при их получении) [45]. Аннигиляция областей свободного объема или рыхлой упаковки в процессе старения приводит к тому, что АС становятся еще более хрупкими. Однако, когда энергия вводится в АС с помощью УЗ колебаний при определенных значениях амплитуды и времени воздействия, они способны омолаживаться, так как приобретают дополнительный

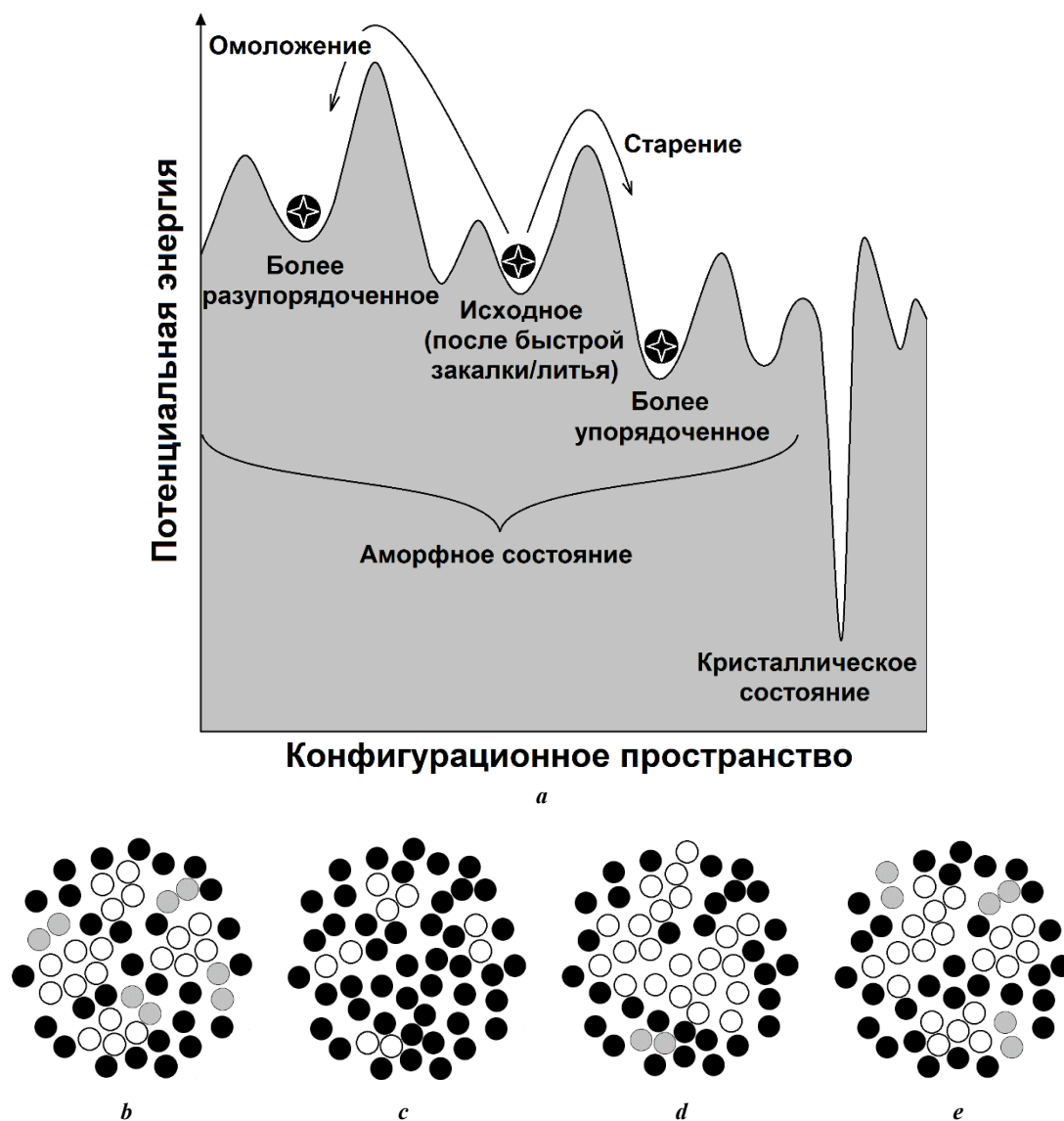


Рис. 1. Схематические иллюстрации энергетических состояний атомов в потенциальном ландшафте (а) и эволюции структуры аморфных сплавов в исходном состоянии (b), при старении (c), в процессе УЗ омоложения (d) и после него (e)

Fig. 1. Schematic illustrations of the energy states of atoms in the potential landscape (a) and the structure evolution of amorphous alloys in initial state (b), during aging (c), during ultrasonic rejuvenation (d) and afterwards (e)

свободный объем и большую пластичность. Во время УЗ обработки совместный эффект, возникающий в результате внешнего приложенного упругого напряжения, внутреннего преобразованного тепла и УЗ резонанса атомов, может стимулировать перемещение неплотно упакованных атомов в АС в высокоэнергетическое состояние, тем самым вызывая образование других областей со свободным объемом и реологическими единицами для улучшения способности к формованию [44; 46].

В литых и быстрозакаленных АС могут проходить обратимые и необратимые β -релаксации [47], о поведении которых можно судить по конфигурациям белых и серых атомов на рис. 1 б соответственно. С увеличением времени старения серые области постепенно становятся черными, а белые – в значительной степени сжимаются (рис. 1 с). При УЗ нагрузке структура снова становится рыхлоупакованной (рис. 1 д), поэтому совокупность высокоподвижных белых атомов увеличивается, а зоны с серыми атомами появляются вновь после воздействия ультразвука (рис. 1 е).

В работе [48] с помощью атомистического моделирования и оценки наномеханических характеристик объемных АС $\text{La}_{55}\text{Al}_{25}\text{Ni}_5\text{Cu}_{10}\text{Co}_5$, $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{P}_{20}\text{Ni}_{10}$ и $\text{Zr}_{35}\text{Ti}_{30}\text{Cu}_{8,25}\text{Be}_{26,75}$ предоставлены доказательства того, что их значительное пластическое течение ниже температуры стеклования при УЗ воздействии объясняется динамической неоднородностью и циклически индуцированными расширениями атомного масштаба (разжижением) в АС. Это приводит к значительному омоложению и окончательному «коллапсу» твердоподобной аморфной структуры.

В работах [36; 37] методом акустической эмиссии при одноосном сжатии исследовано влияние предварительного УЗ воздействия на механические свойства и особенности структуры объемных АС $\text{Zr}_{52,5}\text{Ti}_5\text{Cu}_{17,9}\text{Ni}_{14,6}\text{Al}_{10}$ и $\text{Zr}_{46,25}\text{Cu}_{45,25}\text{Al}_{7,5}\text{Er}_1$. Результаты исследований интерпретировались в рамках поликластерной модели структуры АС. Анализ полученных данных позволил обосновать механизм структурных изменений и снижение прочности АС в результате знакопеременного механического нагружения с УЗ частотой 20 кГц. Авторы обосновали, что сопротивление пластической деформации АС определяется прочностью межкластерных границ, которые реструктуризируются и «размягчаются» под действием УЗ механического нагружения.

В работах [49; 50] методом наноиндентирования исследовано механическое поведение АС $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{P}_{20}\text{Ni}_{10}$ и $\text{La}_{55}\text{Al}_{25}\text{Ni}_5\text{Cu}_{10}\text{Co}_5$ после УЗ колебаний. Заметное размягчение после УЗ обработки было выражено в снижении твердости и модуля упругости – на ~25 и 40 % соответственно. Обнаружено, что дефекты течения с более коротким характерным временем релаксации, активируемые при нагрузке с УЗ циклированием, способствуют быстрой диффузии атомов с низким энергетическим барьером. В конечном итоге это приводит к заметному смещению ползучести и, таким образом, к большей формовости при температуре окружающей среды.

Предложен способ получения АС, включающий расплавление металлической заготовки в тигле, закалку расплава на быстровращающемся диске, но нюанс заключался в том, что с целью увеличения температурного интервала пластичности сразу после снятия ленты ее дополнительно подвергали УЗ обработке с амплитудой

знакопеременных напряжений [29]. При этом отношение амплитуды знакопеременных напряжений к модулю Юнга обрабатываемого материала должно находиться в пределах $(0,135-0,48) \times 10^{-3}$. Данный диапазон выбран таким образом, чтобы прикладываемые знакопеременные напряжения УЗ частоты не превышали предел текучести исследуемых АС, не провоцировали их последующее разрушение, а способствовали эффективному сохранению пластичности и смещению порога охрупчивания в сторону более высоких температур.

В работе [28] на примере АС $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ показано, что в зависимости от параметров УЗ воздействия может происходить смещение критической температуры охрупчивания АС как в сторону возрастания, так и в сторону снижения в зависимости от используемой амплитуды УЗ колебаний.

Результаты дилатометрических исследований в работе [38] показывают повышение температуры кристаллизации АС $\text{Fe}_{76}\text{Ni}_4\text{Si}_{14}\text{B}_6$ на 30–50 К после разных режимов УЗ обработки, а микротвердость АС снижается на 15 %, что косвенно подтверждает тот факт, что процентное содержание кристаллической фазы в сплаве снижается за счет уменьшения размеров или растворения вморозенных центров кристаллизации в АС.

2.3. Ультразвуковая сдвиговая штамповка

Ма J. с соавторами использовали высокочастотные вибрации для сдвиговой штамповки шаблонов, изделий из объемных и ленточных АС следующих систем: Zr-Ti-Cu-Be , Fe-Si-B , La-Al-Ni-Cu-Co , La-Ni-Al , Cu-Zr [51–53]. На рис. 2 показано схематичное изображение экспериментальной установки для данной технологии.

Под действием УЗ вибрации пуансона пластиковый порошок расплавляется из-за фрикционного тепловыделения и вязкоупругого теплового эффекта и продолжает течь вниз под действием экструзии УЗ головки, пластически деформируя аморфную ленту или пластину. Неупорядоченная структура АС помогает им размягчаться в локализованной области во время высокочастотных вибраций, что приводит к деформациям с низким напряжением. Так, например, с использованием УЗ колебаний и расплавленной пластичной вязкой среды были изготовлены различные формы АС в виде букв “В”, “М”, “G” и китайских иероглифов 工, 大 на площади 5 мм^2 [51]. В работе [54] для повышения пластичности АС предложена методика их формирования с помощью УЗ колебаний в жидких средах (пресной и морской воде, спирте). В процессе данной обработки при низком напряжении (300 МПа) и температурах значительно ниже температуры стеклования T_g за 1 с успешно были изготовлены сложные конструкции, такие как решетки, шестерни и шестигранники из АС, размером около 5 мм.

Эти быстрые методы УЗ формования (от миллисекунд до нескольких секунд) помогают сохранить аморфную природу. Они в значительной степени позволяют избежать зависящие от времени процессы кристаллизации и окисления и тем самым миновать традиционную термическую обработку, а также риск роста кристаллов. Чтобы предотвратить релаксацию АС, можно отрегулировать УЗ тепловой эффект, контролируя амплитуду и время при сжатии с УЗ вибрацией, и тем самым эффективно улучшить механические свойства АС.

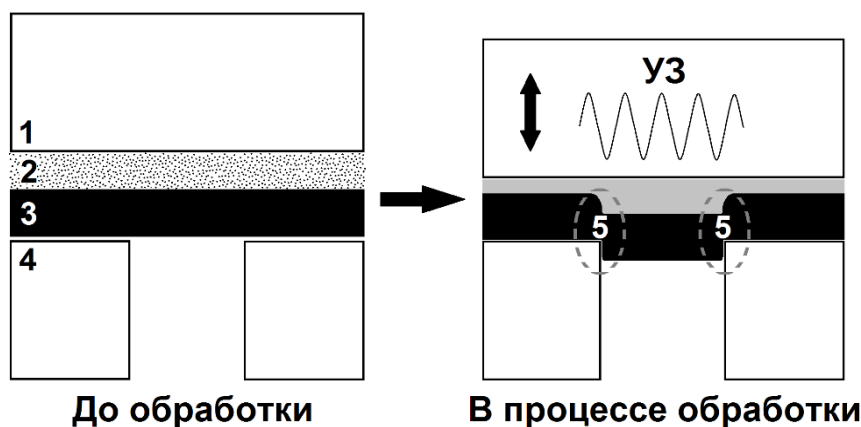


Рис. 2. Принципиальная схема установки для УЗ сдвиговой штамповки:

1 – пуансон; 2 – полимерный порошок (например, этиленвинилацетат);

3 – аморфный сплав; 4 – пресс-форма с полостью;

5 – зоны размягчения в аморфном сплаве (выделены пунктиром)

Fig. 2. Schematic diagram of the ultrasonic assisted micro-shear punching set-up:

1 – punch; 2 – polymer powder (e. g., ethylene vinyl acetate); 3 – amorphous alloy;

4 – mold cavity; 5 – softening zones in amorphous alloy (highlighted by dotted line)

Перспективные УЗ способы улучшить пластичность АС при комнатной температуре (УЗ сдвиговая штамповка и УЗ экструзионное формование) могут применяться при быстром изготовлении макро-, микро-, наноизделий и устройств из АС на поверхности металлических материалов. Формование АС в жидкостях открывает захватывающие возможности для применения в аэрокосмической, энергетической и морской технике: ремонт судов, контейнеров на месте, полярное строительство, глубоководная разведка, предоставляя ценную информацию и прокладывая путь для будущих достижений в методах подводной обработки.

3. Нанокристаллизация

3.1. Способы создания аморфно-нанокристаллического состояния

При растяжении АС демонстрируют плохую макроскопическую пластическую деформацию при температуре окружающей среды, это является результатом образования сильнолокализованных полос сдвига, а также поверхностного размягчения, что ограничивает их широкое применение в качестве конструкционных материалов [7; 8]. Для решения этой проблемы предложены способы, направленные на повышение гетерогенности АС или создание небольшого количества микрометровых [55; 56], а также наноразмерных кристаллов [57; 58], встроенных в аморфные матрицы: разработка состава [59], обработка отжигом [60], добавки азота [61] и интенсивная пластическая деформация [62]. Научная концепция перечисленных технологий заключается в том, чтобы активировать зарождение полос сдвига или препятствовать их распространению. Ультразвук вызывает сильное вынужденное вибрационное воздействие атомов и/или молекул, а также нелинейные эффекты, такие как акустическая кавитация и акустическое течение, которые изменяют микроструктуру и свойства различных материалов. В частности, введение УЗ энергии в АС может увеличить их гетероген-

ность в перегруппировке атомов и даже привести к образованию кристаллитов. УЗ резонанс может модулировать неоднородность АС и улучшать механические свойства омоложенных зон [63]. УЗ колебания частоты МГц приводят к частичной кристаллизации объемного АС на основе Pd, когда он отжигается ниже температуры стеклования [31]. В работе [33] использован метод УЗ модификации поверхности для обработки АС $Zr_{44}Ti_{11}Cu_{10}Ni_{10}Be_{10}$ и показано, что его прочность на излом и деформация были повышены в эксперименте по трехточечному изгибу.

3.2. Баланс прочности и пластичности

Возникает насущный вопрос: может ли ультразвук помочь найти компромисс между прочностью и пластичностью в АС? Введение за счет УЗ колебаний значительного количества свободного объема и небольшого количества диспергированных нанокристаллов в АС может эффективно предотвращать развитие и расширение трещин во время разрушения, тем самым улучшая их прочность и пластичность при комнатной температуре [64; 65]. Авторы [65] для регулировки поведения сдвиговой деформации и атомного расположения в объемном АС $Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$ применяли прерывистую высокочастотную вибрационную нагрузку. Установлено, что такой метод позволил весьма оперативно (за 4 с) повысить пластичность сплава (до 5,3 %) и его прочность (до 2240 МПа) посредством увеличения содержания свободного объема и образования нанокристаллов $CuZr_2$ в аморфной матрице. Однако было отмечено, что при избытке УЗ энергии существует риск перехода от пластичного состояния к хрупкому, если объемная доля нанокристаллов превысит критический предел.

В работе [64] аморфные композиты на основе Cu при комнатной температуре подвергались упругой предварительной нагрузке от 250 до 1000 Н и УЗ обработке с амплитудами ультразвука от 15 до 50 мкм. Показано, что при низких значениях амплитуд и предварительных нагрузок доминирует свободный объем,

и нанокристаллы не выделяются. При низких амплитудах / средних предварительных нагрузках или при средних амплитудах / низких предварительных нагрузках свободный объем и нанокристаллы сосуществуют вместе как составные части структуры. При высоких значениях амплитуд и нагрузок превалируют нанокристаллы, а содержание свободного объема резко уменьшается. Увеличение амплитуды и уменьшение предварительной нагрузки улучшают эффективность УЗ передачи.

В работе [66] к объемному АС $Zr_{46,75}Cu_{46,75}Al_{6,5}$ было приложено УЗ возбуждение 20 кГц и исследовано его влияние на эволюцию микроструктуры и механические свойства. Обнаружено, что после УЗ колебаний могут образовываться нанокристаллы $Cu_{10}Zr_7$. Эволюция нанокристаллических частиц приводит к увеличению пластичности в процессе сжатия при комнатной температуре в сочетании с увеличением предела текучести.

В настоящее время построение градиентных структур стало успешной стратегией при разработке современных металлических материалов с превосходными эксплуатационными свойствами. Посредством УЗ вибрационной обработки удалось сформировать градиентную аморфно-нанокристаллическую структуру в объемном АС $Zr_{46}Cu_{46}Al_8$ [67]. Применяя УЗ циклическую нагрузку частотой 20 кГц в упругом режиме, можно получить градиентные структуры с различными объемными долями кристаллизованного вещества менее чем за 2 с, регулируя входную УЗ энергию. Этот инновационный подход имеет явные преимущества: он исключительно быстрый, требует минимального напряжения и позволяет легко настраивать степень структурных градиентов посредством точной регулировки параметров обработки. Испытания на наноиндентирование показывают более высокую твердость вблизи ударной поверхности, что объясняется большей степенью образования нанокристаллов, которая постепенно уменьшается с глубиной. В результате градиентной дисперсии нанокристаллов после УЗ обработки была обнаружена повышенная пластичность АС $Zr_{46}Cu_{46}Al_8$, характеризующаяся образованием множественных полос сдвига. Микроструктурные исследования показывают, что нанокристаллизация, вызванная УЗ обработкой, возникает из-за локальных атомных перестроек в разделенных фазах областях, богатых Cu с высокой диффузионной подвижностью.

Проведенные авторами [34] исследования влияния УЗ механоактивации на структурно-фазовые превращения АС $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) показали, что такой способ воздействия влияет на параметры кристаллизации и мартенситные переходы. Температуры и энергии кристаллизации увеличиваются после обработки аморфных лент в волноводе продольных колебаний. В свою очередь, после обработки лент АС в УЗ наковальне температуры кристаллизации увеличиваются, а энергия кристаллизации уменьшается. Исследование мартенситных превращений показало, что обработка в УЗ наковальне приводит к снижению характеристических температур и величины тепловых эффектов, что может свидетельствовать об уменьшении размера зерна кристаллической фазы.

С помощью УЗ вибрации предложен способ изготовления серии композитов из АС на основе La [68]. Модулируя амплитуду и время УЗ воздействия, управляя входной энергией высокочастотных колебаний,

такие композиты с различной долей кристаллической фазы можно легко и точно получить за секунды при низком давлении и комнатной температуре. За счет варьирования степени кристалличности достигается пониженная твердость и лучшая пластичность композитов из АС по сравнению с образцами в литом состоянии.

Объединение двух технологий (УЗ обработки с многократной прокаткой) применительно к АС $Fe_{78}Si_{13}B_9$ и $Al_{87}Ni_8Gd_5$ способствует увеличению количества свободного объема в аморфной фазе и приводит к существенному ускорению процессов кристаллизации АС [69; 70].

В работе [39] исследованы изменения морфологии поверхности и структуры ленты АС $Fe_{73,6}Si_{15,8}B_{7,2}Cu_{1,0}Nb_{2,4}$ (Finemet) в результате интенсивной деформации с помощью ультразвуковой ударной обработки (УЗУО) при комнатной температуре на воздухе. Морфология поверхности АС после УЗУО является результатом локализованной пластической деформации, протекающей путем формирования большого количества полос сдвига. Эффект структурно-фазового превращения в объеме ленты Finemet при УЗУО обусловлен усилением атомной мобильности в процессе деформации, которая может быть достаточной для образования нанокристаллов по диффузионному механизму и их равномерному распределению в аморфной матрице.

4. Ультразвуковые технологии соединения материалов

4.1. Альтернативные способы консолидации

Одной из причин, ограничивающих масштабное применение ленточных и объемных АС, являются их геометрические размеры. Толщина коммерческих быстрозакаленных лент АС обычно варьируется в пределах от 20 до 30 мкм, а ширина – от 1 до 100 мм. Диаметр/толщина массивных аморфных металлических стержней или пластин может меняться от 1 до 50 мм, а их длина составляет, как правило, не более 80 мм. Кроме того, АС часто необходимо соединять с другими кристаллическими сплавами в технических приложениях. Поэтому разработка методов соединения АС/АС, АС/металл, АС/ кристаллический сплав привлекли большое внимание исследователей. АС могут стать хрупкими из-за кристаллизации при нагревании [1; 7]. С учетом этого факта температуры соединения должны поддерживаться ниже температуры стеклования АС. Были предприняты попытки использовать различные методы соединения АС/АС и АС/кристалл. В частности, для соединения АС $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ применяли искровую сварку и успешно избежали кристаллизации в соединении [71]. Результаты показали, что прочность на растяжение полученных соединений была равна прочности исходного АС. В похожих экспериментах использовали электронно-лучевую сварку для консолидации пластины АС $Zr_{41}Be_{23}Ti_{14}Cu_{12}Ni_{10}$ с металлическим никелем [72]. В работе [73] была апробирована сварка трением для соединения друг с другом $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ / $Pd_{40}Cu_{30}P_{20}Ni_{10}$, $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$ / $Zr_{41}Be_{23}Ti_{14}Cu_{12}Ni_{10}$. Показано, что АС можно соединять при температурах примерно на 50 К ниже температуры стеклования, не обнаруживая кристаллизации на границе раздела.

4.2. Ультразвуковая пайка

УЗ пайка представляет собой бесфлюсовый метод, который может работать на воздухе. УЗ вибрации способствуют улучшению первоначальных условий смачивания на границе «припой/подложка» [74; 75]. В контексте этого УЗ пайка может быть использована для соединения некоторых трудно смачиваемых материалов. Кроме того, данный вид пайки может реализовать соединение через низкотемпературную эвтектическую фазу припоя/подложки [75; 76]. Таким образом, УЗ пайка служит эффективным методом соединения АС при температуре существенно ниже их температуры кристаллизации.

Быстрозакаленные аморфные фольги на основе железа являются одними из самых превосходных магнитомягких материалов, применяемых в аморфных двигателях. Получение прочного соединения между ними относится к сложным техническим задачам при сборке аморфных статоров с алюминиевыми оболочками. Используя в процессе пайки ультразвук с резонансной частотой 27 кГц и амплитудой колебаний 15 мкм, удалось качественно соединить АС $\text{Fe}_{77}\text{Si}_{14}\text{B}_9$ с алюминиевым листом при температурах 250–350 °С в течение 10 с [77]. В качестве присадочного материала применялся наполнитель Sn–Zn. Было обнаружено соединение FeZn_{13} на границе раздела «присадочный металл / АС». Результаты показали, что начальное смачивание поверхности раздела и измельчение микроструктуры улучшались под действием УЗ колебаний.

Изучены особенности смачивания АС $\text{Zr}_{55}\text{Al}_{10}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_5$ с помощью припоя Sn–Cu–Ni с использованием УЗ колебаний 40 кГц на открытом воздухе при 528 К в течение 90 с [78]. Установлено, что смачивание в основном зависит от схлопывания кавитационных пузырьков на поверхности АС, инициирующих эрозию. Такая кавитационная эрозия эффективна для немедленного удаления пассивационной пленки с поверхности АС. Сонокапиллярный эффект, который также вызывается УЗ вибрацией, улучшает адгезионные свойства припоя.

В работе [79] исследовано поведение смачивания чистого олова по отношению к АС $\text{Zr}_{50,7}\text{Cu}_{28}\text{Ni}_9\text{Al}_{12,3}$ при УЗ обработке (20 кГц) и давлении 0,2 МПа. Нагрев до 300 °С без ультразвука показал несмачивающее состояние Sn для АС. УЗ вибрация способствовала смачиванию Sn. До УЗ обработки в течение 30 с на границе раздела Sn/АС наблюдалась только физическая адсорбция. Увеличение времени обработки ультразвуком приводило к изменению связи на границе раздела Sn/АС с точечного контакта на локальный поверхностный контакт и на диффузионный слой. На границе раздела Sn/АС были обнаружены два режима связи. При режиме связи «порядок – порядок» происходила небольшая кристаллизация внутри АС вблизи интерфейса. Присадочный металл связывался с АС через упорядоченную структуру. При режиме связывания «порядок – беспорядок» присадочный металл и АС сохраняли свои исходные структуры. Интерфейс характеризовался ступенчатыми слоями. Содержание Cu было выше, чем других элементов вблизи границы связывания. Более длинные расстояния диффузии Sn в АС были получены при высокой мощности ультразвука, высокой температуре (до 400 °С) и большой глубине погружения (до 3 мм).

4.3. Ультразвуковая порошковая консолидация

В работе [80] сообщается об успешном изготовлении с помощью УЗ порошковой консолидации при низких температурах и напряжениях двухфазных композитов из АС $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_5\text{Al}_{10}$ и алюминиевого сплава Al-6061. За счет оптимизации массовых соотношений порошков АС $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_5\text{Al}_{10}$ к Al-6061 был получен широкий спектр композитов с индивидуальной прочностью на сжатие и пластичностью. Механические испытания показали, что увеличение содержания алюминия улучшает пластичность при сохранении значительной прочности. В частности, композит с массовым соотношением 5:5 продемонстрировал наилучший баланс механических свойств, превосходное уплотнение, однородность без видимых дефектов и относительную плотность в диапазоне от 92 до 99 %. Микроструктурный анализ выявил образование прочно связанного интерфейса с диффузионным слоем. Это подтверждает, что качественное соединение было облегчено УЗ вибрацией. Кроме того, процесс УЗ порошковой консолидации позволил успешно изготавливать сложные формы из материалов (звездообразные, зубчатые). Данный инновационный подход является перспективным при разработке высококачественных легких композитов для удовлетворения требований передовых производственных приложений.

4.4. Ультразвуковая сварка

Имеются сообщения об успешном изготовлении «сэндвичных» композитов из лент АС $\text{Zr}_{35}\text{Ti}_{30}\text{Cu}_{8,25}\text{Be}_{26,75}$ и высокоэнтропийного сплава (ВЭС) $\text{Al}_{80}\text{Li}_5\text{Mg}_5\text{Zn}_5\text{Cu}_5$ [81], а также из АС $\text{La}_{55}\text{Al}_{25}\text{Ni}_5\text{Cu}_{10}\text{Co}_5$ и ВЭС $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Mn}_{20}$ [82] за счет УЗ возбуждения. Ленты сначала складывались вместе с помощью зажимного усилия, а затем подверглись высокочастотным (20 кГц) колебаниям УЗ сонотрода, которые длились несколько секунд. Во время этого процесса АС размягчались и связывались в объемную массу с лентами ВЭС. Такой низкотемпературный метод с низким напряжением позволяет создавать композиты, сочетающие в себе свойства как аморфных, так и кристаллических составляющих. Микроскопические исследования и проведение компьютерной томографии показывают хорошее качество склеивания без пор и трещин в композитах из АС и ВЭС. Благодаря уникальной структуре, сочетающей мягкую и жесткую фазы, композит обладает улучшенными механическими характеристиками по сравнению с теми, которые получаются из чистой одной фазы.

В процессе УЗ сварки при соединении АС друг с другом или с другими материалами кристаллизация аморфной структуры может быть предотвращена из-за слабого теплового эффекта и скорости процесса. Другие преимущества такой технологии включают энергоэффективность и отсутствие необходимости в расходных материалах для сварки. Важной особенностью является также возможность соединения материалов с различными температурами плавления, поскольку процесс происходит в твердом состоянии.

УЗ сварку применяли для соединения листа коммерческого кованого алюминиевого сплава (AA5754) толщиной 1 мм и полосы коммерческого объемного АС $\text{Zr}_{59,3}\text{Cu}_{28,8}\text{Al}_{10,4}\text{Nb}_{1,5}$ (AMZ4) толщиной 0,4 мм [35]. Были предложены следующие параметры процесса:

энергия сварки составляла 2000 Вт·с, амплитуда смещения – 41 мкм, усилие сварки – 740 Н. Результаты показали, что АС сохраняет свою аморфную структуру в соединении, а прочность соединения выше, чем прочность листа Al. В работе [83] рассмотрена технология, при которой, используя нормальное давление 80 Н, время вибраций 1 с и их частоту 20 кГц, успешно «сварили» объемные пластины АС $\text{Cu}_{54}\text{Zr}_{22}\text{Ti}_{18}\text{Ni}_6$ толщиной 1 мм без каких-либо признаков кристаллизации. В [32] аналогично показано, что УЗ сваркой можно консолидировать друг с другом АС $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_5\text{Al}_{10}$, сохраняя зону скрепления в аморфном состоянии. Площадь соединения можно увеличить, используя условие склеивания с внешним нагревом до температуры 423 К (ниже температуры стеклования).

С помощью УЗ сварки были изготовлены соединения объемных АС $\text{Zr}_{62}\text{Cu}_{33}\text{Al}_4\text{Ti}$ с доэвтектическим присадочным металлом Zn–3Al [84]. Толстый волнистый слой, состоящий из чередующихся подслоев $\text{Zn}_{50}\text{Al}_{25}\text{Zr}_{25}/\text{Zn}_{22}\text{Zr}$, был сформирован на поверхности подложки АС на основе Zr, что обеспечило прочность на сдвиг около 100 МПа для спаянных образцов.

Следует отдельно отметить, что разработан способ изготовления многослойных лент АС УЗ сваркой. Этот метод можно использовать в качестве УЗ аддитивного производственного процесса, такого как 3D-печать, при котором тонкие металлические полоски укладываются слой за слоем для получения более толстых металлических образцов. Можно представить, что в случае, если ленты АС можно бесконечно накладывать друг на дру-

га под действием УЗ колебаний, то ограничения стеклообразующей способности на размеры АС больше не будет. На рис. 3 схематично изображен принцип консолидирования образцов с помощью УЗ сварки.

Применяя технологию УЗ сварки, успешно и быстро (за 220 мс) соединили уложенные в слои по 4–5 штук ленты АС системы Fe–Si–B с площадью стыка до $8 \times 8 \text{ мм}^2$ (толщина каждого слоя 25 мкм) [85]. Рабочая частота, амплитуда ультразвука и максимальная выходная мощность УЗ сварочного оборудования составляли 20 кГц, 35 мкм и 4000 Вт соответственно. Аналогичным образом УЗ сваркой были скреплены многослойные ленты АС $\text{Ni}_{82,2}\text{Cr}_7\text{B}_3\text{Si}_{4,8}\text{Fe}_3$, которые укладывали по 3–4 слоя (толщина каждого слоя 40 мкм) [86]. Кроме того, УЗ сваркой были получены составные образцы, в которых две кристаллические ленты Al и Cu соединялись с лентами АС $\text{Ni}_{82,2}\text{Cr}_7\text{B}_3\text{Si}_{4,8}\text{Fe}_3$ [87]. Однако ламинатные АС и композиты из металлов и АС, изготовленные в вышеуказанных работах, могут быть сварены только в несколько слоев, а попеременная без ограничений укладка, как в 3D-печати, все еще пока не достигнута [88].

Необходимо отметить, что с учетом морфологии соединений и фазовой стабильности обработка УЗ сваркой демонстрирует мощные возможности для консолидирования АС не только на воздухе, но и в жидких средах. В работе [89] для УЗ соединения в пресной и морской воде, в спирте, а также в жидком азоте были выбраны объемные АС $\text{La}_{55}\text{Al}_{25}\text{Ni}_5\text{Cu}_{10}\text{Co}_5$, $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$ и высокоэнтропийный АС Ti–Zr–Hf–Be–Ni. Показано, что

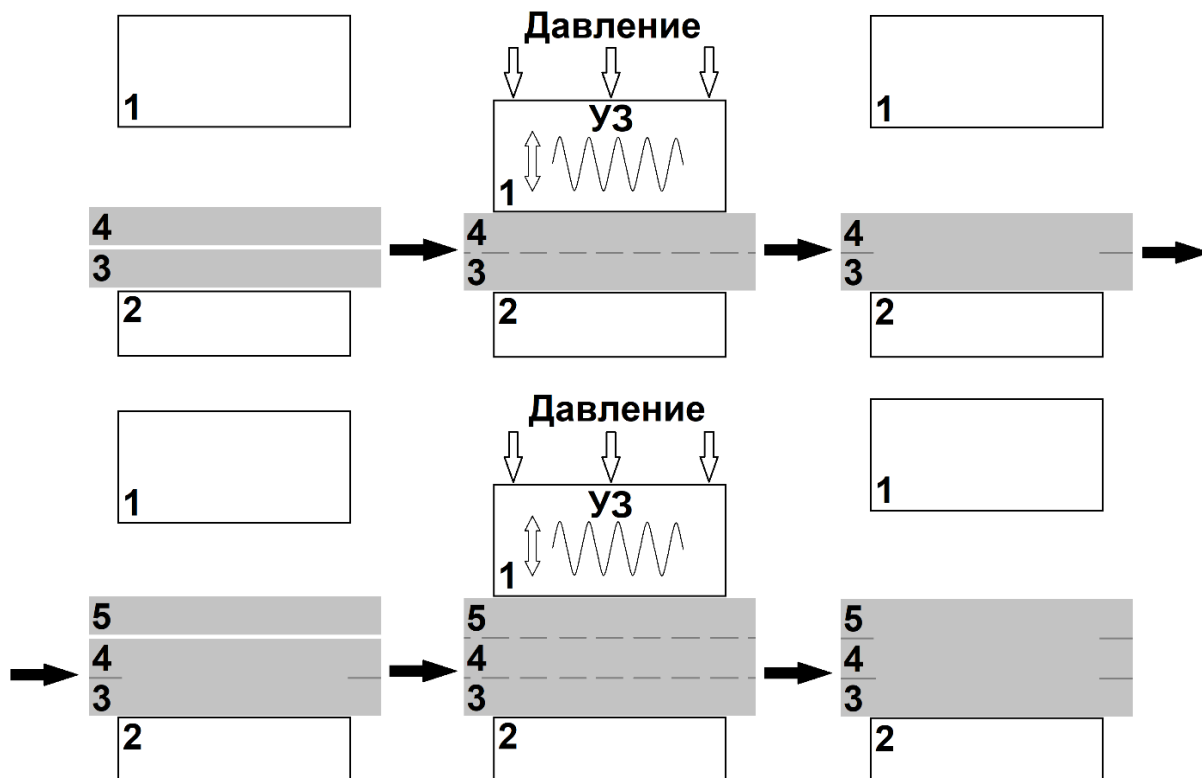


Рис. 3. Схема УЗ вибрационной сварки:

1 – соноотрод; 2 – установочная плита; 3, 4, 5 – слои аморфных сплавов

Fig. 3. Schematic diagram of ultrasonic vibration welding:

1 – sonotrode; 2 – fixture; 3, 4, 5 – layers of amorphous alloys

технология с применением УЗ вибрации исключает высокую температуру и проблемы, связанные с высоким током (как в случае обычных подводных методов соединения). Кроме того, образцы из исследованных АС не только не имели очевидных дефектов в соединенном интерфейсе, но и продемонстрировали превосходные механические свойства и коррозионную стойкость. Такой подход не только представляет собой эффективный способ соединения под водой для применения на шельфе и в море, но и обеспечивает осуществимую стратегию соединения в экстремальных условиях, таких как легко воспламеняющаяся среда в нефти, газе, органических растворителях и криогенных условиях в космосе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В большинстве публикаций по УЗ обработке объектом исследования являются именно массивные АС, получаемые в виде стержней, прутков, пластин. Повышенный интерес явно подразумевает расширение границ их использования в качестве не только функционального, но и конструкционного материала. В настоящее время объемные АС интегрируют в ювелирные изделия, спортивный инвентарь (например, в клюшки для гольфа и теннисные ракетки), изготавливают биосовместимые импланты, корпуса мобильных телефонов, используют для армирования [3; 5; 6]. УЗ формование имеет широкие перспективы в преодолении ограничений по размеру литых АС, синтезе новых композитов на их основе. Нано-, микро- и миниатюрные изделия сложных форм, получаемые сейчас в лабораторных условиях с помощью УЗ стимулирования объемных АС, позже смогут конкурировать с аналогичной продукцией из традиционных металлов и сплавов. Кроме того, в США и Японии ведутся разработки для оборонной промышленности, в частности по созданию легких и прочных композитных броневых плит на основе керамики и объемных АС, а также по замене материала сердечников в противотанковых броневых снарядах на композиты из АС из-за их схожей плотности и эксплуатационных свойств [90].

Однако в России объемные АС пока не нашли своего масштабного применения в связи с труднообрабатываемостью, их отливают исключительно в исследовательских целях для фундаментальной науки. Поэтому накопленный мировой опыт применения УЗ технологии разумно перенять. Являясь эффективным и удобным методом последующей обработки для улучшения конечной пластичности объемных АС, УЗ модифицирование будет иметь большое значение для их дальнейших разработок и коммерциализации в России.

В свою очередь, в промышленных масштабах в России изготавливают аморфные, аморфно-нанокристаллические ленты и микропровода. Наиболее крупными и известными производителями на рынке являются ПАО «Ашинский метзавод» (г. Аша), ПАО «М-СТАТОР» (г. Боровичи), НПП «ГАММАМЕТ» (г. Екатеринбург). Их быстрозакаленные ленты отличаются в первую очередь высоким уровнем магнитных, коррозионных свойств и используются в электротехнических изделиях, трансформаторах, магнитных экранах в качестве составляющих для защитных покрытий. В связи с этим крайне важно продолжить изучение влияния ультразвука на АС с акцентом на поведение их магнитных и хи-

мических свойств. Именно здесь, судя по литературным данным, замечен явный пробел. Большинство проведенных исследований было сфокусировано на улучшении механического отклика АС после УЗ вибраций, а изучению стойкости к коррозии, магнитному поведению, каталитической активности совершенно не уделялось должного внимания. Между тем использование УЗ энергии сможет обеспечить намагниченность насыщения значительно выше той, которая достигается при обычном отжиге, наряду с низкой коэрцитивной силой. Для производимых АС на основе железа применение УЗ вибраций может способствовать сбалансированному образованию равномерно распределенных ферромагнитных нанокластеров, которые уменьшат анизотропию и, таким образом, повысят магнитомягкие свойства лент. Кроме того, воздействие УЗ колебаний вполне способно улучшить коррозионную стойкость АС в агрессивных средах. Надо понимать, что сопротивление к коррозии АС не только зависит от легирующих элементов, но и тесно связано с их метастабильной аморфной структурой. Как показала практика, УЗ обработкой АС можно получить аморфно-нанокристаллическое состояние [64; 65; 67], которое характеризуется уменьшением среднего атомного расстояния. Более стабильная структура приведет к некоторому снижению химического потенциала и будет способствовать повышению коррозионной стойкости. Таким образом, научные исследования восприимчивости АС к химическому воздействию после УЗ модифицирования целесообразно инициировать.

Селективное УЗ стимулирование имеет большой потенциал для адаптации локальной нано-, микроструктуры и свойств АС: возможно одновременно добиться омоложения в областях плотной упаковки атомов со снижением модуля упругости и релаксации в областях рыхлой упаковки, подавляющих зарождение первых полос сдвига. Помимо этого, размер, протяженность и рисунок омоложенных зон можно будет настраивать по мере необходимости.

Введение свободного объема и небольшого количества диспергированных нанокристаллов в АС за счет УЗ обработки позволяет улучшить их комплексные характеристики (повысить пластичность и прочность). Однако важно научиться контролируемо получать оптимальное соотношение аморфной и кристаллической составляющих, регулируя эффективность УЗ передачи и избегая перехода от пластичности к хрупкости, за счет управления амплитудой ультразвука и предварительными нагрузками. Природа охрупчивания и затухания УЗ волн в таком структурном состоянии до конца не ясна.

На сегодняшний день опубликованные данные по режимам УЗ возбуждения применительно к АС не отличаются полнотой, немногочисленны и разрознены. Требуется накопление и расширение этих экспериментальных знаний для разных химических составов как объемных, так и в большей степени ленточных АС. Тем не менее мы предприняли попытку собрать интересующую информацию об основных параметрах, распределив ее в соответствии с конечной целью УЗ обработки, которую ставили исследователи в своих экспериментах: омоложение и формование АС, нанокристаллизация из аморфного состояния или соединение материала УЗ сваркой/пайкой (таблица 1). Анализируя полученные сведения, можно заключить следующее.

Таблица 1. Режимы УЗ обработки для ленточных и объемных аморфных сплавов
 Table 1. Modes of ultrasonic treatment for ribbon and bulk amorphous alloys

Химический состав аморфных сплавов, ат. %	Параметры УЗ обработки					Источник
	<i>f</i> , кГц	<i>A</i> , мкм	<i>t</i> , с	<i>E</i> , Дж	<i>W</i> , Вт	
Структурное омоложение и формование						
La ₆₀ Ni ₁₅ Al ₂₅	20	40	–	–	–	[45]
La ₅₅ Al ₂₅ Ni ₅ Cu ₁₀ Co ₅ Al ₈₆ Ni ₉ La ₅ La ₆₀ Al ₂₀ Ni ₂₀ Cu ₅₀ Zr ₅₀ Pd ₄₀ Cu ₃₀ P ₂₀ Ni ₁₀ Zr ₃₅ Ti ₃₀ Cu _{8,25} Be _{26,75} Ленты Fe ₇₈ Si ₉ B ₁₃	20	40–44,4	1	–	–	[51] [52] [48]
La ₅₅ Al ₂₅ Ni ₅ Cu ₁₀ Co ₅	20	–	0,08–0,24	5–30	–	[91]
Zr _{52,5} Cu _{17,9} Ni _{14,6} Al ₁₀ Ti ₅	20	19–36	–	–	–	[44]
Zr ₄₆ Cu ₄₆ Al ₈	20	40	0,6–0,95	50–400	83–205	[67]
Частичная нанокристаллизация						
Аморфный композит Cu _{52,71} Ti _{28,06} Zr _{11,59} Ni _{7,54} – ZnB	20	15–50	–	–	–	[64]
Zr ₄₄ Ti ₁₁ Cu ₁₀ Ni ₁₀ Be ₂₅	20	24	–	–	–	[33]
Zr _{46,75} Cu _{46,75} Al _{6,5}	20	15	7200	–	–	[66]
Ленты Ti ₅₀ Ni ₂₅ Cu ₂₅	22	10	720–1800	–	–	[34]
La ₆₄ Al ₁₄ Cu ₂₂	20	4–14	–	100–700	–	[68]
Ленты Fe ₇₈ Si ₁₃ B ₉ Ленты Al ₈₇ Ni ₈ Gd ₅	37	–	720–1800	–	100	[69] [70]
Ленты Fe _{73,6} Si _{15,8} B _{7,2} Cu _{1,0} Nb _{2,4}	21	25	10–60	–	600	[39]
Соединение УЗ сваркой/пайкой						
La ₅₅ Al ₂₅ Ni ₅ Cu ₁₀ Co ₅ / Zr ₅₅ Cu ₃₀ Al ₁₀ Ni ₅ / TiZrHfBeNi	20	44,4	–	300–700	2500	[89]
Алюминиевый сплав AA5754 / Zr _{59,3} Cu _{28,8} Al _{10,4} Nb _{1,5}	20	41	–	2000	–	[82]
Al / Ленты Fe ₇₇ Si ₁₄ B ₉	27	15	10	–	–	[77]
Sn–Cu–Ni / Zr ₅₅ Al ₁₀ Cu ₃₀ Ni ₅	40	5,1–7,4	90	–	–	[78]
Sn / Zr _{50,7} Cu ₂₈ Ni ₉ Al _{12,3}	20	–	5–3600	–	–	[79]
Ленты Fe ₇₈ Si ₉ B ₁₃ друг с другом	20	35	0,22	–	4000	[85]
Al / Cu / Ленты Ni _{82,2} Cr ₇ B ₃ Si _{4,8} Fe ₃	35	–	–	–	800	[86]

Примечание. A – амплитуда УЗ колебаний;

f – частота УЗ колебаний;

t – время УЗ воздействия;

W – мощность УЗ установки;

E – ее энергия.

Note. A is the amplitude of ultrasonic vibrations;

f is the frequency of ultrasonic vibrations;

t is the ultrasonic exposure time;

W is the power;

E is the energy of ultrasonic equipment.

1. Объемные АС изучаются интенсивнее, чем ленточные, и логично, что информации по основным параметрам их УЗ возбуждения больше.

2. Существуют две обобщенные методики УЗ модифицирования АС: бесконтактный способ, когда передача высокочастотных колебаний осуществляется через жидкую среду в УЗ ванне, и контактный способ, т. е. с применением УЗ сонотрода, непосредственно прилегающего к АС. В большинстве случаев исследователи пользуются вторым способом, поскольку именно он зарекомендовал себя как более быстрый и эффективный по своему влиянию на структуру АС.

3. Для реализации размягчения и структурного обновения АС используемая частота УЗ обработки f составляет 20 кГц, временной интервал воздействия t очень короткий – от 80 до 950 мс, амплитуда A варьируется от 19 до 44,4 мкм. При меньших амплитудах АС обычно переходят в состояние с более низкой потенциальной энергией, аналогичное эффекту старения.

4. Для перевода АС в частично нанокристаллическое состояние требуется более длительная УЗ обработка, чем при омоложении (от 10 с до 2 ч). При этом частотный диапазон расширен ($f=20\text{--}37$ кГц) наряду с интервалом амплитуд ($A=4\text{--}50$ мкм).

5. При УЗ сварке/пайке АС можно отметить следующие интервалы УЗ характеристик: $f=20\text{--}40$ кГц, $A=5,1\text{--}44,4$ мкм. Что касается времени УЗ воздействия, то для соединения микронных лент АС между собой или с другим материалом необходимо от 220 мс до 10 с, а для объемных АС толщиной в несколько сантиметров требуется до 1 ч.

6. Наибольшие значения энергии E и мощности W УЗ установок отмечены при проведении УЗ сварки ($E=300\text{--}2000$ Дж, $W=800\text{--}4000$ Вт), средние значения – при частичной нанокристаллизации ($E=100\text{--}700$ Дж, $W=100\text{--}600$ Вт), а наименьшие – при структурном омоложении и формировании АС ($E=5\text{--}400$ Дж, $W=83\text{--}205$ Вт).

Интересной и привлекательной является идея выстроить экстремальные воздействия, в том числе УЗ модифицирование, в одну целую технологическую цепочку [1]. Это может привести к качественным изменениям характера конечной структуры и, следовательно, к возможности получать уникальные свойства металлических материалов, подвергнутых комплексному воздействию. Применительно к АС отдельные звенья цепочки уже успешно реализуются: например, закалка из расплава (ЗР), в ходе которой создаются АС, и последующая их интенсивная пластическая деформация (ИПД) в камере Бриджмена, или ЗР + лазерное облучение (ЛО), или ЗР + УЗ обработка, или ЗР + криогенная деформация (КД). Для успешной реализации системной многоэтапной обработки, например ЗР → ИПД → КД → ЛО → УЗ, необходимо «синхронизировать» параметры на материал для получения новых структур и структурочувствительных свойств. Такая постановка исследований оригинальна, но еще не нашла достаточного отражения в научной литературе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработка АС в желаемые формы и структуры является предпосылкой и основой для их успешного коммерческого применения. Перспективным как с фундаментальной, так и с практической точки зрения спосо-

бом воздействия на АС (неразрушающим, экологичным и недорогим) является использование высокочастотных УЗ колебаний. Однако до настоящего времени остаются невыясненными многие аспекты, касающиеся физической природы структурообразования в АС, механизмов их пластической деформации, кристаллизации, отклика физико-химических свойств при УЗ обработке.

Важно продолжить детализированно выявлять взаимосвязи между последовательностью структурно-фазовых превращений в АС и параметрами УЗ обработки. Это расширит существующие научные знания в физике неупорядоченных и неравновесных систем, а также позволит комплексно сформулировать условия и безошибочно определять режимы, способствующие:

- омоложению структуры с размягчением и улучшением термической стойкости при сохранении аморфности;
- частичной девитрификации АС с оптимальным сочетанием доли аморфной и нанокристаллической фаз, компромиссным балансом прочности и пластичности, а также сохранением магнитомягких свойств;
- холодной сварке слоев разных по составу и свойствам АС с качественной адгезией, т. е. созданию гибридных материалов.

Понимание научных принципов данных процессов с использованием ультразвука является чрезвычайно важным для эффективного управления свойствами АС и создания инновационных многофункциональных материалов на их базе.

Изучение влияния УЗ обработки на термическую стабильность АС позволит расширить температурные интервалы их эксплуатации без охрупчивания.

Сдвиговая штамповка АС под воздействием высокочастотных вибраций является инновационным способом их формирования. Метод не ограничивается профилем пуансона, и можно изготавливать больше целевых продуктов с различными формами. Такие преимущества, как низкая стоимость, быстрое действие и хорошее качество продукции, делают процесс формирования АС энергосберегающей и экономичной технологией с широкими перспективами применения.

Исследование влияния УЗ механоактивации на структуру поможет разобраться в механизмах структурных перестроек, активации дефектов в АС под действием УЗ колебаний. Это, в частности, способствует выявлению физических причин сверхпластического течения в стеклообразной системе с помощью холодной обработки ультразвуком. УЗ формирование с использованием явления сверхпластичности АС в переохлажденном жидком состоянии может стать передовым методом изготовления схем, рельефных изображений, деталей из АС размером от нанометров до сантиметров. Это открывает заманчивые перспективы в инженерных приложениях, например в микроэлектронике и нанотехнике, для создания комплектующих элементов, интегральных микросхем, чипов, печатных плат.

Результаты по холодной сварке разнородных АС стимулируют дальнейшее развитие высокотехнологичного ручного проектирования и изготовления интеллектуальных материалов, содержащих несколько фаз и составов. УЗ формирование АС обеспечит новый способ изготовления структур и крупногабаритных АС, обладающих большим потенциалом для будущих разработок. УЗ обработка может быть использована при создании

быстродействующих устройств, планарных механизмов, например для создания исполнительных механизмов в микроэлектромеханических системах на основе кристаллизации с помощью УЗ колебаний аморфных тонких пленок с памятью формы TiNi. Преимущество этого метода заключается в том, что свойства памяти формы могут быть пространственно распределены с учетом заданных требований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Glezer A.M., Permyakova I.E. Melt-quenched nanocrystals. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. 369 p. DOI: [10.1201/b15028](https://doi.org/10.1201/b15028).
- Greer A.L., Costa M.B., Houghton O.S. Metallic glasses // MRS Bulletin. 2023. Vol. 48. P. 1054–1061. DOI: [10.1557/s43577-023-00586-5](https://doi.org/10.1557/s43577-023-00586-5).
- Gao K., Zhu X.G., Chen L. et al. Recent development in the application of bulk metallic glasses // Journal of Materials Science and Technology. 2022. Vol. 131. P. 115–121. DOI: [10.1016/j.jmst.2022.05.028](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.05.028).
- Khan M.M., Nemati A., Rahman Z.U., Shah U.H., Asgar H., Haider W. Recent advancements in bulk metallic glasses and their applications: a review // Critical Reviews in Solid State and Material Sciences. 2018. Vol. 43. № 3. P. 233–268. DOI: [10.1080/10408436.2017.1358149](https://doi.org/10.1080/10408436.2017.1358149).
- Amorphous and nanocrystalline materials: preparation, properties, and applications / eds. A. Inoue, K. Hashimoto. Berlin: Springer, 2001. 206 p. DOI: [10.1007/978-3-662-04426-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04426-1).
- Trexler M.M., Thadhani N.N. Mechanical properties of bulk metallic glasses // Progress in Materials Science. 2010. Vol. 55. № 8. P. 759–839. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2010.04.002](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.04.002).
- Глезер А.М., Пермякова И.Е., Громов В.Е., Коваленко В.В. Механическое поведение аморфных сплавов. Новокузнецк: СибГИУ, 2006. 416 с.
- Dong Quan, Tan Jun, Li Caiju, Sarac B., Eckert J. Room-temperature plasticity of metallic glass composites: a review // Composites Part B: Engineering. 2024. Vol. 280. Article number 111453. DOI: [10.1016/j.compositesb.2024.111453](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111453).
- Zhang M., Chen Y., Li W. On the origin of softening in the plastic deformation of metallic glasses // International Journal of Plasticity. 2019. Vol. 116. P. 24–38. DOI: [10.1016/j.iijplas.2018.12.004](https://doi.org/10.1016/j.iijplas.2018.12.004).
- Hufnagel T.C., Schuh C.A., Falk M.L. Deformation of metallic glasses: recent developments in theory, simulations, and experiments // Acta Materialia. 2016. Vol. 109. P. 375–393. DOI: [10.1016/j.actamat.2016.01.049](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.049).
- Permyakova I., Glezer A. Mechanical behavior of Fe- and Co-based amorphous alloys after thermal action // Metals. 2022. Vol. 12. № 2. Article number 297. DOI: [10.3390/met12020297](https://doi.org/10.3390/met12020297).
- Maaß R., Löffler J.F. Shear-band dynamics in metallic glasses // Advanced Functional Materials. 2015. Vol. 25. № 16. P. 2353–2368. DOI: [10.1002/adfm.201404223](https://doi.org/10.1002/adfm.201404223).
- Shelyakov A., Sitnikov N., Zaletova I., Borodako K., Tabachkova N. Study of structure and phase transformations in rejuvenated rapidly quenched TiNiCu alloys // Metals. 2023. Vol. 13. № 7. Article number 1175. DOI: [10.3390/met13071175](https://doi.org/10.3390/met13071175).
- Priejzjev N.V. The effect of thermal history on the atomic structure and mechanical properties of amorphous alloys // Computational Materials Science. 2020. Vol. 174. Article number 109477. DOI: [10.1016/j.commatsci.2019.109477](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2019.109477).
- Di Siyi, Zhou Jing, Cai Mingjuan, Cui Jingxian, Li Xuesong, Shen Baolong, Ke Haibo, Wang Qianqian. Improved ductility of annealed Fe-based metallic glass with good soft magnetic property by cryogenic thermal cycling // Journal of Alloys and Compounds. 2023. Vol. 960. Article number 170686. DOI: [10.1016/j.jallcom.2023.170686](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170686).
- Sohrabi S., Sun B.Y., Mahmoodan M., Sun Y.H., Gholamipour R., Wang W.H. Rejuvenation by compressive elasto-static loading: the role of static stress on a Zr-based metallic glass // Journal of Alloys and Compounds. 2023. Vol. 933. Article number 167715. DOI: [10.1016/j.jallcom.2022.167715](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167715).
- Zhang Sailong, Shi Bo, Wang Jinhui, Xu Yuanli, Jin Peipeng. Rejuvenation of a naturally aged bulk metallic glass by elastostatic loading // Materials Science and Engineering: A. 2021. Vol. 806. Article number 140843. DOI: [10.1016/j.msea.2021.140843](https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140843).
- Khademorezaian S., Tomut M., Peterlechner M., da Silva Pinto M.W., Rösner H., Divinski S., Wilde G. Extreme rejuvenation of a bulk metallic glass at the nanoscale by swift heavy ion irradiation // Journal of Alloys and Compounds. 2024. Vol. 980. Article number 173571. DOI: [10.1016/j.jallcom.2024.173571](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.173571).
- Boukhemkhem W., Izerrouken M., Ghidelli M., Pardoën T., Sari A., Khereddine A.Y., Meftah A. Swift heavy ion irradiation effect on structural, morphological and mechanical properties of Zr₇₀Ni₃₀ metallic glass // Physica Scripta. 2023. Vol. 98. № 8. Article number 085311. DOI: [10.1088/1402-4896/ace387](https://doi.org/10.1088/1402-4896/ace387).
- Zhang C.Y., Zhu Z.W., Li S.T., Wang Y.Y., Li Z.K., Li H., Yuan G., Zhang H.F. Shear band evolution and mechanical behavior of cold-rolled Zr-based amorphous alloy sheets: an in-situ study // Journal of Materials Science and Technology. 2024. Vol. 181. P. 115–127. DOI: [10.1016/j.jmst.2023.09.022](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.09.022).
- Stolpe M., Kruzic J.J., Busch R. Evolution of shear bands, free volume and hardness during cold rolling of a Zr-based bulk metallic glass // Acta Materialia. 2014. Vol. 64. P. 231–240. DOI: [10.1016/j.actamat.2013.10.035](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.10.035).
- Permyakova I., Glezer A. Amorphous-nanocrystalline composites prepared by high-pressure torsion // Metals. 2020. Vol. 10. № 4. Article number 511. DOI: [10.3390/met10040511](https://doi.org/10.3390/met10040511).
- Bazlov A.I., Parkhomenko M.S., Ubyivovk E.V., Zanaeva E.N., Bazlova T.A., Gunderov D.V. Severe plastic deformation influence on the structure transformation of the amorphous Zr_{62.5}Cu_{22.5}Al₁₀Fe₅ alloy // Intermetallics. 2023. Vol. 152. Article number 107777. DOI: [10.1016/j.intermet.2022.107777](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107777).
- Yang Zhichao, Zhu Lida, Zhang Guixiang, Ni Chenbing, Lin Bin. Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2020. Vol. 156. Article number 103594. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2020.103594](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103594).
- Behal J., Maru M.S., Katwal R., Pathak D., Kumar V. Ultrasonic assisted green synthesis approach for nanotechnological materials // Journal of Alloys and

- Compounds Communications. 2024. Vol. 3. Article number 100013. DOI: [10.1016/j.jacomc.2024.100013](https://doi.org/10.1016/j.jacomc.2024.100013).
26. Yang Jingwei, Xie Chuhao, Zhang Jie, Qiao Jian. Design strategies for enhancing strength and toughness in ultrasonic welding of dissimilar metals: a review // *Materials Today Communications*. 2025. Vol. 42. Article number 111502. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2025.111502](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111502).
 27. Power ultrasonics: Applications of high-intensity ultrasound / eds. J.A. Gallego-Juárez, K.F. Graff. Oxford: Woodhead Publishing, 2023. 946 p. DOI: [10.1016/C2019-0-00783-2](https://doi.org/10.1016/C2019-0-00783-2).
 28. Смирнов О.М., Глезер А.М. Влияние ультразвуковой обработки на охрупчивание аморфных сплавов при термообработке // *Физика и химия обработки материалов*. 1992. № 3. С. 131–134.
 29. Смирнов О.М., Глезер А.М., Овчаров В.П., Худякова Е.В. Способ получения аморфных сплавов: описание изобретения к авторскому свидетельству № SU 1787665 A1, 1993. 3 с. EDN: [PGXVAV](https://www.edn.net/PGXVAV).
 30. Ichitsubo T., Kai S., Ogi H., Hirao M., Tanaka K. Elastic and anelastic behavior of $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ bulk metallic glass around the glass transition temperature under ultrasonic excitation. // *Scripta Materialia*. 2003. Vol. 49. № 4. P. 267–271. DOI: [10.1016/S1359-6462\(03\)00294-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00294-X).
 31. Ichitsubo T., Matsubara E., Yamamoto T., Chen H.S., Nishiyama N., Saida J., Anazawa K. Microstructure of fragile metallic glasses inferred from ultrasound-accelerated crystallization in Pd-based metallic glasses // *Physical Review Letters*. 2005. Vol. 95. Article number 245501. DOI: [10.1103/PhysRevLett.95.245501](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.245501).
 32. Maeda M., Takahashi Y., Fukuhara M., Xinmin Wang, Inoue A. Ultrasonic bonding of $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ metallic glass // *Materials Science and Engineering: B*. 2008. Vol. 148. № 1–3. P. 141–144. DOI: [10.1016/j.mseb.2007.09.028](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.09.028).
 33. Ma Chi, Qin Haifeng, Ren Zhencheng, O'Keeffe S.C., Stevick J., Doll G.L., Dong Yalin, Winiarski B., Ye Chang. Increasing fracture strength in bulk metallic glasses using ultrasonic nanocrystal surface modification // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 718. P. 246–253. DOI: [10.1016/j.jallcom.2017.05.056](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.05.056).
 34. Непомнящая В.В., Рубаник В.В. Влияние ультразвуковой механоактивации на кинетику кристаллизации и мартенситные превращения аморфного сплава на основе TiNi // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2017. № 3. С. 90–96. DOI: [10.18323/2073-5073-2017-3-90-96](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2017-3-90-96).
 35. Becker M., Kuball A., Ghavimi A., Adam B., Busch R., Gallino I., Balle F. Solid state joining of a cold rolled Zr-based bulk metallic glass to a wrought aluminum alloy by power ultrasonics // *Materials*. 2022. Vol. 15. № 21. Article number 7673. DOI: [10.3390/ma15217673](https://doi.org/10.3390/ma15217673).
 36. Бакай С.А., Волчок О.И., Стоев П.И., Камышанченко Н.В., Кунгурцев Е.С. Влияние ультразвукового воздействия на акустическую эмиссию и механические свойства объемных металлических стекол на основе циркония // *Акустический журнал*. 2012. Т. 58. № 3. С. 304–307. EDN: [OXXVET](https://www.edn.net/OXXVET).
 37. Бакай С.А., Булатов А.С., Ключко В.С., Корниец А.В., Фатеев М.П. О низкотемпературном поглощении продольного ультразвука в объемном металлическом стекле $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ // *Физика низких температур*. 2012. Т. 38. № 10. С. 1197–1201. EDN: [PCRCYT](https://www.edn.net/PCRCYT).
 38. Tsaregradskaya T.L., Kozachenko V.V., Kuryliuk A.M., Turkov O.V., Saenko G.V. Effect of ultrasonic treatment on phase formation processes in amorphous alloy $Fe_{76}Ni_4Si_{14}B_6$ // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2019. Vol. 11. № 3. Article number 03031. DOI: [10.12172/jnep.11\(3\).03031](https://doi.org/10.12172/jnep.11(3).03031).
 39. Васильев М.А., Тиньков В.А., Петров Ю.Н., Волошко С.М., Галстян Г.Г., Черепин В.Т., Ходаковский А.С. Нанокристаллизация аморфного сплава $Fe_{73.6}Si_{15.8}B_{7.2}Cu_{1.0}Nb_{2.4}$ (Finemet) под действием ультразвуковой ударной обработки // *Металлофизика и новейшие технологии*. 2013. Т. 35. № 5. С. 667–675.
 40. Blaha F., Langenecker B. Dehnung von zink-kristallen unter ultraschalleinwirkung // *Naturwissenschaften*. 1955. Vol. 42. № 20. P. 556–557. DOI: [10.1007/BF00623773](https://doi.org/10.1007/BF00623773).
 41. Langenecker B. Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals // *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*. 1966. Vol. 13. № 1. P. 1–8. DOI: [10.1109/T-SU.1966.29367](https://doi.org/10.1109/T-SU.1966.29367).
 42. Li Ning, Xu Xiaona, Zheng Zhizhen, Liu Lin. Enhanced formability of a Zr-based bulk metallic glass in a supercooled liquid state by vibrational loading // *Acta Materialia*. 2014. Vol. 65. P. 400–411. DOI: [10.1016/j.actamat.2013.11.009](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.11.009).
 43. Han Guangchao, Peng Zhuo, Xu Linhong, Li Ning. Ultrasonic vibration facilitates the micro-formability of a Zr-based metallic glass // *Materials*. 2018. Vol. 11. № 12. Article number 2568. DOI: [10.3390/ma11122568](https://doi.org/10.3390/ma11122568).
 44. Lou Yan, Liu Xiao, Yang Xiaole, Ge Yang, Zhao Dandan, Wang Hao, Zhang Lai-Chang, Liu Zhiyuan. Fast rejuvenation in bulk metallic glass induced by ultrasonic vibration precompression // *Intermetallics*. 2020. Vol. 118. № 5. Article number 106687. DOI: [10.1016/j.intermet.2019.106687](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.106687).
 45. Chen Zhe, Ren Shuai, Zhao Rui et al. Plasticity and rejuvenation of aged metallic glasses by ultrasonic vibrations // *Journal of Materials Science and Technology*. 2024. Vol. 181. P. 231–239. DOI: [10.1016/j.jmst.2023.09.029](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.09.029).
 46. Li Ning, Chen Wen, Liu Lin. Thermoplastic micro-forming of bulk metallic glasses: a review // *JOM*. 2016. Vol. 68. № 4. P. 1246–1261. DOI: [10.1007/s11837-016-1844-y](https://doi.org/10.1007/s11837-016-1844-y).
 47. Zhao R., Jiang H.Y., Luo P., Shen L.Q., Wen P., Sun Y.H., Bai H.Y., Wang W.H. Reversible and irreversible β -relaxations in metallic glasses // *Physical Review B*. 2020. Vol. 101. № 9. Article number 094203. DOI: [10.1103/PhysRevB.101.094203](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.094203).
 48. Li X., Wei D., Zhang J.Y. et al. Ultrasonic plasticity of metallic glass near room temperature // *Applied Materials Today*. 2020. Vol. 21. № 3. Article number 100866. DOI: [10.1016/j.apmt.2020.100866](https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100866).
 49. Yuan Chenchen, Liu Rui, Lv Zhuwei, Li Xin, Pang Changmeng, Yang Can, Ma Jiang, Wang Weihua. Softening in an ultrasonic-vibrated Pd-based metallic glass // *Intermetallics*. 2022. Vol. 144. Article number 107527. DOI: [10.1016/j.intermet.2022.107527](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107527).
 50. Yuan C.C., Lv Z.W., Li X. et al. Ultrasonic-promoted defect activation and structural rejuvenation in a La-based metallic glass // *Intermetallics*. 2023. Vol. 153. Article number 107803. DOI: [10.1016/j.intermet.2022.107803](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107803).

51. Li Hongzhen, Yan Yuqiang, Sun Fei, Li Kangsen, Luo Feng, Ma Jiang. Shear punching of amorphous alloys under high-frequency vibrations // *Metals*. 2019. Vol. 9. № 11. Article number 1158. DOI: [10.3390/met9111158](https://doi.org/10.3390/met9111158).
52. Ma Jiang, Liang Xiong, Wu Xiaoyu, Liu Zhiyuan, Gong Feng. Sub-second thermoplastic forming of bulk metallic glasses by ultrasonic beating // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. Article number 17844. DOI: [10.1038/srep17844](https://doi.org/10.1038/srep17844).
53. Luo Feng, Sun Fei, Li Kangsen, Gong Feng, Liang Xiong, Wu Xiaoyu, Ma Jiang. Ultrasonic assisted micro-shear punching of amorphous alloy // *Materials Research Letters*. 2018. Vol. 6. № 10. P. 545–551. DOI: [10.1080/21663831.2018.1500399](https://doi.org/10.1080/21663831.2018.1500399).
54. Li Xin, Li Luyao, Sohrabi S. et al. Ultrasonic vibration enabled under-liquid forming of metallic glasses // *Science Bulletin*. 2024. Vol. 69. № 2. P. 163–166. DOI: [10.1016/j.scib.2023.11.049](https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.11.049).
55. González S., Sort J., Louzguine-Luzgin D.V., Perepezko J.H., Baró M.D., Inoue A. Tuning the microstructure and mechanical properties of Al-based amorphous/crystalline composites by addition of Pd // *Intermetallics*. 2010. Vol. 18. № 12. P. 2377–2384. DOI: [10.1016/j.intermet.2010.08.036](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.08.036).
56. Song Wenli, Wu Yuan, Wang Hui, Liu Xiongjun, Chen Houwen, Guo Zhenxi, Lu Zhaoping. Microstructural control via copious nucleation manipulated by in situ formed nucleants: large-sized and ductile metallic glass composites // *Advanced Materials*. 2016. Vol. 28. № 37. P. 8156–8161. DOI: [10.1002/adma.201601954](https://doi.org/10.1002/adma.201601954).
57. Khademian N., Gholamipour R., Shahri F., Tamizifar M. Effect of vanadium substitution for zirconium on the glass forming ability and mechanical properties of a $Zr_{65}Cu_{17.5}Ni_{10}Al_{7.5}$ bulk metallic glass // *Journal of Alloys and Compounds*. 2013. Vol. 546. P. 41–47. DOI: [10.1016/j.jallcom.2012.08.035](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.08.035).
58. Jang J.S.C., Wu K.C., Jian S.R., Hsieh P.J., Huang J.C., Liu C.T. A Ni-free Zr-based bulk metallic glass with remarkable plasticity // *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. Vol. 509. P. S109–S114. DOI: [10.1016/j.jallcom.2011.01.209](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.01.209).
59. Wu Y., Wang H., Liu X.J., Chen X.H., Hui X.D., Zhang Y., Lu Z.P. Designing bulk metallic glass composites with enhanced formability and plasticity // *Journal of Materials Science and Technology*. 2014. Vol. 30. № 6. P. 566–575. DOI: [10.1016/j.jmst.2014.03.028](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.03.028).
60. Zhao Yan Chun, Ma Wen Long, Yuan Xiao Peng, Zhao Zhi Ping, Huang Ming Yuan, Kou Sheng Zhong, Li Chun Yan. Influence of annealing treatment on microstructure and mechanical properties of Fe-Cu-Si-Al amorphous composites // *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 849. P. 71–75. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.849.71](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.849.71).
61. Lee J.I., Kim S.Y., Park E.S. In-situ synthesis and mechanical properties of Zr-based bulk metallic glass matrix composites manipulated by nitrogen additions // *Intermetallics*. 2017. Vol. 91. P. 70–77. DOI: [10.1016/j.intermet.2017.08.005](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2017.08.005).
62. Wang Tuo, Wu Yidong, Si Jiajia, Liu Yanhui, Hui Xidong. Plasticizing and work hardening in phase separated Cu-Zr-Al-Nb bulk metallic glasses by deformation induced nanocrystallization // *Materials and Design*. 2018. Vol. 142. P. 74–82. DOI: [10.1016/j.matdes.2018.01.003](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.003).
63. Wang D.P., Yang Y., Niu X.R., Lu J., Yang G.N., Wang W.H., Liu C.T. Resonance ultrasonic actuation and local structural rejuvenation in metallic glasses // *Physical Review B*. 2017. Vol. 95. Article number 235407. DOI: [10.1103/PhysRevB.95.235407](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.235407).
64. Yu Jiangtao, Lou Yan, Wang Zhaoyi, Yang Lingyun, Huang Guijian, Ma Jiang. Revealing the mechanical responses and accommodation mechanisms of Cu-based amorphous composites under elastic preload and ultrasonic vibration treatment // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2024. Vol. 629. Article number 122875. DOI: [10.1016/j.jnoncrysol.2024.122875](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2024.122875).
65. Lou Yan, Yang Lingyun, Xu Shengpeng, Ma Jiang. Fast increase in ductility and strength of Zr-based bulk amorphous alloys induced by intermittent high-frequency vibration loading // *Intermetallics*. 2022. Vol. 142. Article number 107467. DOI: [10.1016/j.intermet.2022.107467](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107467).
66. Zhai W., Nie L.H., Hui X.D., Xiao Y., Wang T., Wei B. Ultrasonic excitation induced nanocrystallization and toughening of $Zr_{46.75}Cu_{46.75}Al_{6.5}$ bulk metallic glass // *Journal of Materials Science and Technology*. 2020. Vol. 45. P. 157–161. DOI: [10.1016/j.jmst.2019.10.035](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.10.035).
67. Zhang Yu, Sohrabi Sajad, Li Xin, Ren Shuai, Ma Jiang. Tailored gradient nanocrystallization in bulk metallic glass via ultrasonic vibrations // *Journal of Materials Science and Technology*. 2025. Vol. 210. P. 109–120. DOI: [10.1016/j.jmst.2024.05.027](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.05.027).
68. Zhang Y., Zhao H., Yan Y.Q., Tong X., Ma Jiang, Ke Haibo, Wang Weihua. Ultrasonic-assisted fabrication of metallic glass composites // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2022. Vol. 597. Article number 121894. DOI: [10.2139/ssrn.4039426](https://doi.org/10.2139/ssrn.4039426).
69. Чиркова В.В., Абросимова Г.Е., Першина Е.А., Волков Н.А., Аронин А.С. Влияние покрытия танталом на кристаллизацию деформированных аморфных сплавов $Fe_{78}Si_{13}B_9$ и $Al_{87}Ni_8Gd_5$ // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2023. № 11. С. 16–23. DOI: [10.31857/S1028096023110080](https://doi.org/10.31857/S1028096023110080).
70. Abrosimova G., Chirkova V., Matveev D., Pershina E., Volkov N., Aronin A. Influence of a protective coating on the crystallization of an amorphous $Fe_{78}Si_{13}B_9$ alloy // *Metals*. 2023. Vol. 13. № 6. Article number 1090. DOI: [10.3390/met13061090](https://doi.org/10.3390/met13061090).
71. Kawamura Y., Ohno Y. Spark welding of $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ bulk metallic glass // *Scripta Materialia*. 2001. Vol. 45. № 2. P. 127–132. DOI: [10.1016/S1359-6462\(01\)01003-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)01003-X).
72. Kim J., Kawamura Y. Electron beam welding of Zr-based BMG/Ni joints: effect of beam irradiation position on mechanical and microstructural properties // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 207. № 1–3. P. 112–117. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2007.12.090](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.090).
73. Shoji T., Kawamura Y., Ohno Y. Friction welding of bulk metallic glasses to different ones // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 375–377. P. 394–398. DOI: [10.1016/j.msea.2003.10.183](https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.183).
74. Xu Z., Ma L., Yang J., Zhang J., Yan J. Ultrasonic-induced rising and wetting of a Sn-Zn filler in an aluminum joint // *Welding Journal*. 2016. Vol. 95. P. 264–272.
75. Xu Zhiwu, Ma Lin, Yan Jiuchun, Yang Shiqin, Du Shanyi. Wetting and oxidation during ultrasonic soldering of an alumina reinforced aluminum–copper–magnesium (2024 Al) matrix composite //

- Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2012. Vol. 43. № 3. P. 407–414. DOI: [10.1016/j.compositesa.2011.12.006](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.12.006).
76. Lai Zhiwei, Xie Ruishan, Pan Chuan, Chen Xiaoguang, Liu Lei, Wang Wenxian, Zou Guisheng. Ultrasound-assisted transient liquid phase bonding of magnesium alloy using brass interlayer in air // Journal of Materials Science and Technology. 2017. Vol. 33. № 6. P. 567–572. DOI: [10.1016/j.jmst.2016.11.002](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.11.002).
 77. Ji Hongjun, Li Long, Wang Lijie, Li Mingyu. Microstructures and properties of the Fe-based amorphous foil/aluminum dissimilar joint by ultrasonic-assisted soldering // Welding in the World. 2015. Vol. 59. P. 623–628. DOI: [10.1007/s40194-015-0237-0](https://doi.org/10.1007/s40194-015-0237-0).
 78. Tamura S., Tsunekawa Y., Okumiya M., Hatakeyama M. Ultrasonic cavitation treatment for soldering on Zr-based bulk metallic glass // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 206. № 1-3. P. 322–327. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2007.12.032](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.032).
 79. Xu Zhiwu, Li Zhengwei, Zhong Shijiang, Ma Zhipeng, Yan Jiuchun. Wetting mechanism of Sn to $Zr_{50.7}Cu_{28}Ni_9Al_{12.3}$ bulk metallic glass assisted by ultrasonic treatment // Ultrasonics Sonochemistry. 2018. Vol. 48. № 1. P. 207–217. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2018.05.036](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.036).
 80. Wang Jiahao, Liu Senji, Huang Pengyu, Liu Junsheng, Zhang Yu, Liang Xiong, Sohrabi Sajad, Ma Jiang. Ultrasonic powder consolidation of metallic glass/Al-6061 composites // Intermetallics. 2024. Vol. 174. Article number 108462. DOI: [10.1016/j.intermet.2024.108462](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2024.108462).
 81. Liang Xiong, Zhu XiaoLong, Li Xin, Mo RuoDong, Liu YongJing, Wu Kai, Ma Jiang. High-entropy alloy and amorphous alloy composites fabricated by ultrasonic vibrations // Science China: Physics, Mechanics and Astronomy. 2020. Vol. 63. № 11. Article number 116111. DOI: [10.1007/s11433-020-1560-4](https://doi.org/10.1007/s11433-020-1560-4).
 82. Liang Xiong, Wu Kai, Fu Jianan et al. Fabrication of amorphous and high-entropy biphasic composites using high-frequency ultrasonic vibration // Journal of Non-Crystalline Solids. 2022. Vol. 582. Article number 121458. DOI: [10.1016/j.jnoncrysol.2022.121458](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.121458).
 83. Kim J. Weld ability of $Cu_{54}Zr_{22}Ti_{18}Ni_6$ bulk metallic glass by ultrasonic welding processing // Materials Letters. 2014. Vol. 130. P. 160–163. DOI: [10.1016/j.matlet.2014.05.056](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.056).
 84. Zhang Xingyi, Xiao Yong, Wang Ling, Wan Chao, Wang Qiwei, Sheng Hongchao, Li Mingyu. Ultrasound-induced liquid/solid interfacial reaction between Zn-3Al alloy and Zr-based bulk metallic glasses // Ultrasonics Sonochemistry. 2018. Vol. 45. P. 86–94. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2018.03.006](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.03.006).
 85. Song Xiao Cun, Zhu Zheng Qiang, Chen Yan Fei. Ultrasonic welding of $Fe_{78}Si_9B_{13}$ metallic glass // Materials Science Forum. 2014. Vol. 809. P. 348–353. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.809-810.348](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.809-810.348).
 86. Wu Wenzheng, Jiang Jili, Li Guiwei, Fuh Jerry Ying His, Jiang Hao, Gou Pengwei, Zhang Longjian, Liu Wei, Zhao Ji. Ultrasonic additive manufacturing of bulk Ni-based metallic glass // Journal of Non-Crystalline Solids. 2019. Vol. 506. P. 1–5. DOI: [10.1016/j.jnoncrysol.2018.12.008](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.12.008).
 87. Li Guiwei, Zhao Ji, Fuh Jerry Ying His, Wu Wenzheng, Jiang Jili, Wang Tianqi, Chang Shuai. Experiments on the ultrasonic bonding manufacturing of metallic glass and crystalline metal composite // Materials. 2019. Vol. 12. № 18. Article number 2975. DOI: [10.3390/ma12182975](https://doi.org/10.3390/ma12182975).
 88. Li Z., Huang Z., Sun F., Li X., Ma J. Forming of metallic glasses: mechanisms and processes // Materials Today Advances. 2020. Vol. 7. Article number 100077. DOI: [10.1016/j.mtadv.2020.100077](https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100077).
 89. Li Luyao, Li Xin, Huang Zhiyuan et al. Joining of metallic glasses in liquid via ultrasonic vibrations // Nature Communications. 2023. Vol. 14. № 1. Article number 6305. DOI: [10.1038/s41467-023-42014-x](https://doi.org/10.1038/s41467-023-42014-x).
 90. Telford M. The case for bulk metallic glass // Materials Today. 2004. Vol. 7. № 3. P. 36–43. DOI: [10.1016/S1369-7021\(04\)00124-5](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(04)00124-5).
 91. Li W., Wang C., Li L.Y. et al. Manipulating defects in metallic glasses via ultrasonic treatment // International Journal of Mechanical Sciences. 2025. Vol. 287. Article number 109960. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2025.109960](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2025.109960).

REFERENCES

1. Glezer A.M., Permyakova I.E. *Melt-quenched nanocrystals*. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group Publ., 2013. 369 p. DOI: [10.1201/b15028](https://doi.org/10.1201/b15028).
2. Greer A.L., Costa M.B., Houghton O.S. Metallic glasses. *MRS Bulletin*, 2023, vol. 48, pp. 1054–1061. DOI: [10.1557/s43577-023-00586-5](https://doi.org/10.1557/s43577-023-00586-5).
3. Gao K., Zhu X.G., Chen L. et al. Recent development in the application of bulk metallic glasses. *Journal of Materials Science and Technology*, 2022, vol. 131, pp. 115–121. DOI: [10.1016/j.jmst.2022.05.028](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.05.028).
4. Khan M.M., Nemati A., Rahman Z.U., Shah U.H., Asgar H., Haider W. Recent advancements in bulk metallic glasses and their applications: a review. *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*, 2018, vol. 43, no. 3, pp. 233–268. DOI: [10.1080/10408436.2017.1358149](https://doi.org/10.1080/10408436.2017.1358149).
5. Inoue A., Hashimoto K., eds. *Amorphous and nanocrystalline materials: preparation, properties, and applications*. Berlin, Springer Publ., 2001. 206 p. DOI: [10.1007/978-3-662-04426-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04426-1).
6. Trexler M.M., Thadhani N.N. Mechanical properties of bulk metallic glasses. *Progress in Materials Science*, 2010, vol. 55, no. 8, pp. 759–839. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2010.04.002](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.04.002).
7. Glezer A.M., Permyakova I.E., Gromov V.E., Kovalenko V.V. *Mekhanicheskoe povedenie amorfnykh splavov* [Mechanical behavior of amorphous alloys]. Novokuznetsk, SibGIU Publ., 2006. 416 p.
8. Dong Quan, Tan Jun, Li Caiju, Sarac B., Eckert J. Room-temperature plasticity of metallic glass composites: a review. *Composites Part B: Engineering*, 2024, vol. 280, article number 111453. DOI: [10.1016/j.compositesb.2024.111453](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111453).
9. Zhang M., Chen Y., Li W. On the origin of softening in the plastic deformation of metallic glasses. *International Journal of Plasticity*, 2019, vol. 116, pp. 24–38. DOI: [10.1016/j.ijplas.2018.12.004](https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2018.12.004).
10. Hufnagel T.C., Schuh C.A., Falk M.L. Deformation of metallic glasses: recent developments in theory, simulations, and experiments. *Acta Materialia*, 2016, vol. 109, pp. 375–393. DOI: [10.1016/j.actamat.2016.01.049](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.049).
11. Permyakova I., Glezer A. Mechanical behavior of Fe- and Co-based amorphous alloys after thermal action.

- Metals*, 2022, vol. 12, no. 2, article number 297. DOI: [10.3390/met12020297](https://doi.org/10.3390/met12020297).
12. Maaß R., Löffler J.F. Shear-band dynamics in metallic glasses. *Advanced Functional Materials*, 2015, vol. 25, no. 16, pp. 2353–2368. DOI: [10.1002/adfm.201404223](https://doi.org/10.1002/adfm.201404223).
13. Shelyakov A., Sitnikov N., Zaletova I., Borodako K., Tabachkova N. Study of structure and phase transformations in rejuvenated rapidly quenched TiNiCu alloys. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 7, article number 1175. DOI: [10.3390/met13071175](https://doi.org/10.3390/met13071175).
14. Priezjev N.V. The effect of thermal history on the atomic structure and mechanical properties of amorphous alloys. *Computational Materials Science*, 2020, vol. 174, article number 109477. DOI: [10.1016/j.commatsci.2019.109477](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2019.109477).
15. Di Siyi, Zhou Jing, Cai Mingjuan, Cui Jingxian, Li Xuesong, Shen Baolong, Ke Haibo, Wang Qianqian. Improved ductility of annealed Fe-based metallic glass with good soft magnetic property by cryogenic thermal cycling. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 960, article number 170686. DOI: [10.1016/j.jallcom.2023.170686](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170686).
16. Sohrabi S., Sun B.Y., Mahmoodan M., Sun Y.H., Gholamipour R., Wang W.H. Rejuvenation by compressive elasto-static loading: the role of static stress on a Zr-based metallic glass. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 933, article number 167715. DOI: [10.1016/j.jallcom.2022.167715](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167715).
17. Zhang Sailong, Shi Bo, Wang Jinhui, Xu Yuanli, Jin Peipeng. Rejuvenation of a naturally aged bulk metallic glass by elastostatic loading. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, vol. 806, article number 140843. DOI: [10.1016/j.msea.2021.140843](https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140843).
18. Khademorezaian S., Tomut M., Peterlechner M., da Silva Pinto M.W., Rösner H., Divinski S., Wilde G. Extreme rejuvenation of a bulk metallic glass at the nanoscale by swift heavy ion irradiation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, vol. 980, article number 173571. DOI: [10.1016/j.jallcom.2024.173571](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.173571).
19. Boukhemkhem W., Izerrouken M., Ghidelli M., Pardoën T., Sari A., Khereddine A.Y., Meftah A. Swift heavy ion irradiation effect on structural, morphological and mechanical properties of Zr₇₀Ni₃₀ metallic glass. *Physica Scripta*, 2023, vol. 98, no. 8, article number 085311. DOI: [10.1088/1402-4896/ace387](https://doi.org/10.1088/1402-4896/ace387).
20. Zhang C.Y., Zhu Z.W., Li S.T., Wang Y.Y., Li Z.K., Li H., Yuan G., Zhang H.F. Shear band evolution and mechanical behavior of cold-rolled Zr-based amorphous alloy sheets: an in-situ study. *Journal of Materials Science and Technology*, 2024, vol. 181, pp. 115–127. DOI: [10.1016/j.jmst.2023.09.022](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.09.022).
21. Stolpe M., Kruzic J.J., Busch R. Evolution of shear bands, free volume and hardness during cold rolling of a Zr-based bulk metallic glass. *Acta Materialia*, 2014, vol. 64, pp. 231–240. DOI: [10.1016/j.actamat.2013.10.035](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.10.035).
22. Permyakova I., Glezer A. Amorphous-nanocrystalline composites prepared by high-pressure torsion. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 4, article number 511. DOI: [10.3390/met10040511](https://doi.org/10.3390/met10040511).
23. Bazlov A.I., Parkhomenko M.S., Ubyivovk E.V., Zanaeva E.N., Bazlova T.A., Gunderov D.V. Severe plastic deformation influence on the structure transformation of the amorphous Zr_{62.5}Cu_{22.5}Al₁₀Fe₅ alloy. *Intermetallics*, 2023, vol. 152, article number 107777. DOI: [10.1016/j.intermet.2022.107777](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107777).
24. Yang Zhichao, Zhu Lida, Zhang Guixiang, Ni Chenbing, Lin Bin. Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, vol. 156, article number 103594. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2020.103594](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103594).
25. Behal J., Maru M.S., Katwal R., Pathak D., Kumar V. Ultrasonic assisted green synthesis approach for nanotechnological materials. *Journal of Alloys and Compounds Communications*, 2024, vol. 3, article number 100013. DOI: [10.1016/j.jacomc.2024.100013](https://doi.org/10.1016/j.jacomc.2024.100013).
26. Yang Jingwei, Xie Chuhaio, Zhang Jie, Qiao Jian. Design strategies for enhancing strength and toughness in ultrasonic welding of dissimilar metals: a review. *Materials Today Communications*, 2025, vol. 42, article number 111502. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2025.111502](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111502).
27. Gallego-Juárez J.A., Graff K.F., eds. *Power ultrasonics: Applications of high-intensity ultrasound*. Oxford, Woodhead Publ., 2023. 946 p. DOI: [10.1016/C2019-0-00783-2](https://doi.org/10.1016/C2019-0-00783-2).
28. Smirnov O.M., Glezer A.M. Effect of ultrasonic treatment on embrittlement of amorphous alloys during heat treatment. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 1992, no. 3, pp. 131–134.
29. Smirnov O.M., Glezer A.M., Ovcharov V.P., Khudyakova E.V. *Sposob polucheniya amorfnykh splavov* [Method for the producing amorphous alloys], opisaniye izobreteniya k avtorskomu svidetelstvu no. SU 1787665 A1, 1993, 3 p. EDN: [PGXVAV](https://patents.google.com/patent/SU1787665A1).
30. Ichitsubo T., Kai S., Ogi H., Hirao M., Tanaka K. Elastic and anelastic behavior of Zr₅₅Al₁₀Ni₅Cu₃₀ bulk metallic glass around the glass transition temperature under ultrasonic excitation. *Scripta Materialia*, 2003, vol. 49, no. 4, pp. 267–271. DOI: [10.1016/S1359-6462\(03\)00294-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00294-X).
31. Ichitsubo T., Matsubara E., Yamamoto T., Chen H.S., Nishiyama N., Saida J., Anazawa K. Microstructure of fragile metallic glasses inferred from ultrasound-accelerated crystallization in Pd-based metallic glasses. *Physical Review Letters*, 2005, vol. 95, article number 245501. DOI: [10.1103/PhysRevLett.95.245501](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.245501).
32. Maeda M., Takahashi Y., Fukuhara M., Xinmin Wang, Inoue A. Ultrasonic bonding of Zr₅₅Cu₃₀Ni₅Al₁₀ metallic glass. *Materials Science and Engineering: B*, 2008, vol. 148, no. 1–3, pp. 141–144. DOI: [10.1016/j.mseb.2007.09.028](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.09.028).
33. Ma Chi, Qin Haifeng, Ren Zhencheng, O'Keeffe S.C., Stevick J., Doll G.L., Dong Yalin, Winiarski B., Ye Chang. Increasing fracture strength in bulk metallic glasses using ultrasonic nanocrystal surface modification. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 718, pp. 246–253. DOI: [10.1016/j.jallcom.2017.05.056](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.05.056).
34. Nepomnyashchaya V.V., Rubanik V.V. The influence of ultrasonic mechanical activation on crystallization kinetics and martensitic transformations of TiNi-based amorphous alloys. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 90–96. DOI: [10.18323/2073-5073-2017-3-90-96](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2017-3-90-96).
35. Becker M., Kuball A., Ghavimi A., Adam B., Busch R., Gallino I., Balle F. Solid state joining of a cold rolled Zr-based bulk metallic glass to a wrought aluminum alloy by power ultrasonics. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 21, article number 7673. DOI: [10.3390/ma15217673](https://doi.org/10.3390/ma15217673).

36. Bakai S.A., Volchok O.I., Stoev P.I., Kamyshanchenko N.V., Kungurtsev E.S. Effect of the ultrasound action on the acoustic emission and mechanical properties of zirconium-based bulk metallic glasses. *Acoustical Physics*, 2012, vol. 58, no. 3, pp. 277–280. DOI: [10.1134/S10637771012020029](https://doi.org/10.1134/S10637771012020029).
37. Bakai S.A., Bulatov A.S., Klochko V.S., Korniets A.V., Fateev M.P. On the low-temperature absorption of longitudinal ultrasound in $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ bulk metallic glass. *Low Temperature Physics*, 2012, vol. 38, no. 10, pp. 948–951. DOI: [10.1063/1.4758778](https://doi.org/10.1063/1.4758778).
38. Tsaregradskaya T.L., Kozachenko V.V., Kuryliuk A.M., Turkov O.V., Saenko G.V. Effect of ultrasonic treatment on phase formation processes in amorphous alloy $Fe_{76}Ni_{14}Si_{14}B_6$. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2019, vol. 11, no. 3, article number 03031. DOI: [10.21272/jnep.11\(3\).03031](https://doi.org/10.21272/jnep.11(3).03031).
39. Vasilev M.A., Tinkov V.A., Petrov Yu.N., Voloshko S.M., Galstyan G.G., Cherepin V.T., Khodakovskiy A.S. Nanocrystallization of amorphous alloy $Fe_{73.6}Si_{15.8}B_{7.2}Cu_{1.0}Nb_{2.4}$ (Finemet) under ultrasonic impact treatment. *Metallofizika i noveychie tekhnologii*, 2013, vol. 35, no. 5, pp. 667–675.
40. Blaha F., Langenecker B. Dehnung von zink-kristallen unter ultraschalleinwirkung. *Naturwissenschaften*, 1955, vol. 42, no. 20, pp. 556–557. DOI: [10.1007/BF00623773](https://doi.org/10.1007/BF00623773).
41. Langenecker B. Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1966, vol. 13, no. 1, pp. 1–8. DOI: [10.1109/T-SU.1966.29367](https://doi.org/10.1109/T-SU.1966.29367).
42. Li Ning, Xu Xiaona, Zheng Zhizhen, Liu Lin. Enhanced formability of a Zr-based bulk metallic glass in a supercooled liquid state by vibrational loading. *Acta Materialia*, 2014, vol. 65, pp. 400–411. DOI: [10.1016/j.actamat.2013.11.009](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.11.009).
43. Han Guangchao, Peng Zhuo, Xu Linhong, Li Ning. Ultrasonic vibration facilitates the micro-formability of a Zr-based metallic glass. *Materials*, 2018, vol. 11, no. 12, article number 2568. DOI: [10.3390/ma11122568](https://doi.org/10.3390/ma11122568).
44. Lou Yan, Liu Xiao, Yang Xiaole, Ge Yang, Zhao Dandan, Wang Hao, Zhang Lai-Chang, Liu Zhiyuan. Fast rejuvenation in bulk metallic glass induced by ultrasonic vibration precompression. *Intermetallics*, 2020, vol. 118, no. 5, article number 106687. DOI: [10.1016/j.intermet.2019.106687](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.106687).
45. Chen Zhe, Ren Shuai, Zhao Rui et al. Plasticity and rejuvenation of aged metallic glasses by ultrasonic vibrations. *Journal of Materials Science and Technology*, 2024, vol. 181, pp. 231–239. DOI: [10.1016/j.jmst.2023.09.029](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.09.029).
46. Li Ning, Chen Wen, Liu Lin. Thermoplastic micro-forming of bulk metallic glasses: a review. *JOM*, 2016, vol. 68, no. 4, pp. 1246–1261. DOI: [10.1007/s11837-016-1844-y](https://doi.org/10.1007/s11837-016-1844-y).
47. Zhao R., Jiang H.Y., Luo P., Shen L.Q., Wen P., Sun Y.H., Bai H.Y., Wang W.H. Reversible and irreversible β -relaxations in metallic glasses. *Physical Review B*, 2020, vol. 101, no. 9, article number 094203. DOI: [10.1103/PhysRevB.101.094203](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.094203).
48. Li X., Wei D., Zhang J.Y. et al. Ultrasonic plasticity of metallic glass near room temperature. *Applied Materials Today*, 2020, vol. 21, no. 3, article number 100866. DOI: [10.1016/j.apmt.2020.100866](https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100866).
49. Yuan Chenchen, Liu Rui, Lv Zhuwei, Li Xin, Pang Changmeng, Yang Can, Ma Jiang, Wang Weihua. Softening in an ultrasonic-vibrated Pd-based metallic glass. *Intermetallics*, 2022, vol. 144, article number 107527. DOI: [10.1016/j.intermet.2022.107527](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107527).
50. Yuan C.C., Lv Z.W., Li X. et al. Ultrasonic-promoted defect activation and structural rejuvenation in a La-based metallic glass. *Intermetallics*, 2023, vol. 153, article number 107803. DOI: [10.1016/j.intermet.2022.107803](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107803).
51. Li Hongzhen, Yan Yuqiang, Sun Fei, Li Kangsen, Luo Feng, Ma Jiang. Shear punching of amorphous alloys under high-frequency vibrations. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 11, article number 1158. DOI: [10.3390/met9111158](https://doi.org/10.3390/met9111158).
52. Ma Jiang, Liang Xiong, Wu Xiaoyu, Liu Zhiyuan, Gong Feng. Sub-second thermoplastic forming of bulk metallic glasses by ultrasonic beating. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, article number 17844. DOI: [10.1038/srep17844](https://doi.org/10.1038/srep17844).
53. Luo Feng, Sun Fei, Li Kangsen, Gong Feng, Liang Xiong, Wu Xiaoyu, Ma Jiang. Ultrasonic assisted micro-shear punching of amorphous alloy. *Materials Research Letters*, 2018, vol. 6, no. 10, pp. 545–551. DOI: [10.1080/21663831.2018.1500399](https://doi.org/10.1080/21663831.2018.1500399).
54. Li Xin, Li Luyao, Sohrabi S. et al. Ultrasonic vibration enabled under-liquid forming of metallic glasses. *Science Bulletin*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 163–166. DOI: [10.1016/j.scib.2023.11.049](https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.11.049).
55. González S., Sort J., Louzguine-Luzgin D.V., Perepezko J.H., Baró M.D., Inoue A. Tuning the microstructure and mechanical properties of Al-based amorphous/crystalline composites by addition of Pd. *Intermetallics*, 2010, vol. 18, no. 12, pp. 2377–2384. DOI: [10.1016/j.intermet.2010.08.036](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.08.036).
56. Song Wenli, Wu Yuan, Wang Hui, Liu Xiongjun, Chen Houwen, Guo Zhenxi, Lu Zhaoping. Microstructural control via copious nucleation manipulated by in situ formed nucleants: large-sized and ductile metallic glass composites. *Advanced Materials*, 2016, vol. 28, no. 37, pp. 8156–8161. DOI: [10.1002/adma.201601954](https://doi.org/10.1002/adma.201601954).
57. Khademian N., Gholamipour R., Shahri F., Tamizifar M. Effect of vanadium substitution for zirconium on the glass forming ability and mechanical properties of a $Zr_{65}Cu_{17.5}Ni_{10}Al_{7.5}$ bulk metallic glass. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 546, pp. 41–47. DOI: [10.1016/j.jallcom.2012.08.035](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.08.035).
58. Jiang J.S.C., Wu K.C., Jian S.R., Hsieh P.J., Huang J.C., Liu C.T. A Ni-free Zr-based bulk metallic glass with remarkable plasticity. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, pp. S109–S114. DOI: [10.1016/j.jallcom.2011.01.209](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.01.209).
59. Wu Y., Wang H., Liu X.J., Chen X.H., Hui X.D., Zhang Y., Lu Z.P. Designing bulk metallic glass composites with enhanced formability and plasticity. *Journal of Materials Science and Technology*, 2014, vol. 30, no. 6, pp. 566–575. DOI: [10.1016/j.jmst.2014.03.028](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.03.028).
60. Zhao Yan Chun, Ma Wen Long, Yuan Xiao Peng, Zhao Zhi Ping, Huang Ming Yuan, Kou Sheng Zhong, Li Chun Yan. Influence of annealing treatment on microstructure and mechanical properties of Fe-Cu-Si-Al amorphous composites. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 849, pp. 71–75. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.849.71](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.849.71).
61. Lee J.I., Kim S.Y., Park E.S. In-situ synthesis and mechanical properties of Zr-based bulk metallic glass matrix composites manipulated by nitrogen ad-

- ditions. *Intermetallics*, 2017, vol. 91, pp. 70–77. DOI: [10.1016/j.intermet.2017.08.005](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2017.08.005).
62. Wang Tuo, Wu Yidong, Si Jiajia, Liu Yanhui, Hui Xidong. Plasticizing and work hardening in phase separated Cu-Zr-Al-Nb bulk metallic glasses by deformation induced nanocrystallization. *Materials and Design*, 2018, vol. 142, pp. 74–82. DOI: [10.1016/j.matdes.2018.01.003](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.003).
63. Wang D.P., Yang Y., Niu X.R., Lu J., Yang G.N., Wang W.H., Liu C.T. Resonance ultrasonic actuation and local structural rejuvenation in metallic glasses. *Physical Review B*, 2017, vol. 95, article number 235407. DOI: [10.1103/PhysRevB.95.235407](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.235407).
64. Yu Jiangtao, Lou Yan, Wang Zhaoyi, Yang Lingyun, Huang Guijian, Ma Jiang. Revealing the mechanical responses and accommodation mechanisms of Cu-based amorphous composites under elastic preload and ultrasonic vibration treatment. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2024, vol. 629, article number 122875. DOI: [10.1016/j.jnoncrysol.2024.122875](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2024.122875).
65. Lou Yan, Yang Lingyun, Xv Shenpeng, Ma Jiang. Fast increase in ductility and strength of Zr-based bulk amorphous alloys induced by intermittent high-frequency vibration loading. *Intermetallics*, 2022, vol. 142, article number 107467. DOI: [10.1016/j.intermet.2022.107467](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107467).
66. Zhai W., Nie L.H., Hui X.D., Xiao Y., Wang T., Wei B. Ultrasonic excitation induced nanocrystallization and toughening of $Zr_{46.75}Cu_{46.75}Al_{6.5}$ bulk metallic glass. *Journal of Materials Science and Technology*, 2020, vol. 45, pp. 157–161. DOI: [10.1016/j.jmst.2019.10.035](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.10.035).
67. Zhang Yu, Sohrabi Sajad, Li Xin, Ren Shuai, Ma Jiang. Tailored gradient nanocrystallization in bulk metallic glass via ultrasonic vibrations. *Journal of Materials Science and Technology*, 2025, vol. 210, pp. 109–120. DOI: [10.1016/j.jmst.2024.05.027](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.05.027).
68. Zhang Y., Zhao H., Yan Y.Q., Tong X., Ma Jiang, Ke Haibo, Wang Weihua. Ultrasonic-assisted fabrication of metallic glass composites. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2022, vol. 597, article number 121894. DOI: [10.2139/ssrn.4039426](https://doi.org/10.2139/ssrn.4039426).
69. Chirkova V.V., Abrosimova G.E., Pershina E.A., Volkov N.A., Aronin A.S. Influence of a Ta Coating on the Crystallization of Deformed Amorphous Alloys $Fe_{78}Si_{13}B_9$ and $Al_{87}Ni_8Gd_5$. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2023, vol. 17, pp. 1192–1198. DOI: [10.1134/S1027451023060083](https://doi.org/10.1134/S1027451023060083).
70. Abrosimova G., Chirkova V., Matveev D., Pershina E., Volkov N., Aronin A. Influence of a protective coating on the crystallization of an amorphous $Fe_{78}Si_{13}B_9$ alloy. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 6, article number 1090. DOI: [10.3390/met13061090](https://doi.org/10.3390/met13061090).
71. Kawamura Y., Ohno Y. Spark welding of $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ bulk metallic glass. *Scripta Materialia*, 2001, vol. 45, no. 2, pp. 127–132. DOI: [10.1016/S1359-6462\(01\)01003-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)01003-X).
72. Kim J., Kawamura Y. Electron beam welding of Zr-based BMG/Ni joints: effect of beam irradiation position on mechanical and microstructural properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 207, no. 1-3, pp. 112–117. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2007.12.090](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.090).
73. Shoji T., Kawamura Y., Ohno Y. Friction welding of bulk metallic glasses to different ones. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 375–377, pp. 394–398. DOI: [10.1016/j.msea.2003.10.183](https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.183).
74. Xu Z., Ma L., Yang J., Zhang J., Yan J. Ultrasonic-induced rising and wetting of a Sn-Zn filler in an aluminum joint. *Welding Journal*, 2016, vol. 95, pp. 264–272.
75. Xu Zhiwu, Ma Lin, Yan Jiuchun, Yang Shiqin, Du Shanyi. Wetting and oxidation during ultrasonic soldering of an alumina reinforced aluminum–copper–magnesium (2024 Al) matrix composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, vol. 43, no. 3, pp. 407–414. DOI: [10.1016/j.compositesa.2011.12.006](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.12.006).
76. Lai Zhiwei, Xie Ruishan, Pan Chuan, Chen Xiaoguang, Liu Lei, Wang Wenxian, Zou Guisheng. Ultrasound-assisted transient liquid phase bonding of magnesium alloy using brass interlayer in air. *Journal of Materials Science and Technology*, 2017, vol. 33, no. 6, pp. 567–572. DOI: [10.1016/j.jmst.2016.11.002](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.11.002).
77. Ji Hongjun, Li Long, Wang Lijie, Li Mingyu. Microstructures and properties of the Fe-based amorphous foil/aluminum dissimilar joint by ultrasonic-assisted soldering. *Welding in the World*, 2015, vol. 59, pp. 623–628. DOI: [10.1007/s40194-015-0237-0](https://doi.org/10.1007/s40194-015-0237-0).
78. Tamura S., Tsunekawa Y., Okumiya M., Hatakeyama M. Ultrasonic cavitation treatment for soldering on Zr-based bulk metallic glass. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 206, no. 1-3, pp. 322–327. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2007.12.032](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.032).
79. Xu Zhiwu, Li Zhengwei, Zhong Shijiang, Ma Zhipeng, Yan Jiuchun. Wetting mechanism of Sn to $Zr_{50.7}Cu_{28}Ni_9Al_{12.3}$ bulk metallic glass assisted by ultrasonic treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, vol. 48, no. 1, pp. 207–217. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2018.05.036](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.036).
80. Wang Jiahao, Liu Senji, Huang Pengyu, Liu Junsheng, Zhang Yu, Liang Xiong, Sohrabi Sajad, Ma Jiang. Ultrasonic powder consolidation of metallic glass/Al-6061 composites. *Intermetallics*, 2024, vol. 174, article number 108462. DOI: [10.1016/j.intermet.2024.108462](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2024.108462).
81. Liang Xiong, Zhu XiaoLong, Li Xin, Mo RuoDong, Liu YongJing, Wu Kai, Ma Jiang. High-entropy alloy and amorphous alloy composites fabricated by ultrasonic vibrations. *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2020, vol. 63, no. 11, article number 116111. DOI: [10.1007/s11433-020-1560-4](https://doi.org/10.1007/s11433-020-1560-4).
82. Liang Xiong, Wu Kai, Fu Jianan et al. Fabrication of amorphous and high-entropy biphasic composites using high-frequency ultrasonic vibration. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2022, vol. 582, article number 121458. DOI: [10.1016/j.jnoncrysol.2022.121458](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.121458).
83. Kim J. Weld ability of $Cu_{54}Zr_{22}Ti_{18}Ni_6$ bulk metallic glass by ultrasonic welding processing. *Materials Letters*, 2014, vol. 130, pp. 160–163. DOI: [10.1016/j.matlet.2014.05.056](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.056).
84. Zhang Xingyi, Xiao Yong, Wang Ling, Wan Chao, Wang Qiwei, Sheng Hongchao, Li Mingyu. Ultrasound-induced liquid/solid interfacial reaction between Zn-3Al alloy and Zr-based bulk metallic glasses. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, vol. 45, pp. 86–94. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2018.03.006](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.03.006).
85. Song Xiao Cun, Zhu Zheng Qiang, Chen Yan Fei. Ultrasonic welding of $Fe_{78}Si_9B_{13}$ metallic glass. *Materials*

- Science Forum*, 2014, vol. 809, pp. 348–353. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.809-810.348](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.809-810.348).
86. Wu Wenzheng, Jiang Jili, Li Guiwei, Fuh Jerry Ying His, Jiang Hao, Gou Pengwei, Zhang Longjian, Liu Wei, Zhao Ji. Ultrasonic additive manufacturing of bulk Ni-based metallic glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, vol. 506, pp. 1–5. DOI: [10.1016/j.jnoncrsol.2018.12.008](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2018.12.008).
87. Li Guiwei, Zhao Ji, Fuh Jerry Ying His, Wu Wenzheng, Jiang Jili, Wang Tianqi, Chang Shuai. Experiments on the ultrasonic bonding manufacturing of metallic glass and crystalline metal composite. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 18, article number 2975. DOI: [10.3390/ma12182975](https://doi.org/10.3390/ma12182975).
88. Li Z., Huang Z., Sun F., Li X., Ma J. Forming of metallic glasses: mechanisms and processes. *Materials Today Advances*, 2020, vol. 7, article number 100077. DOI: [10.1016/j.mtadv.2020.100077](https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100077).
89. Li Luyao, Li Xin, Huang Zhiyuan et al. Joining of metallic glasses in liquid via ultrasonic vibrations. *Nature Communications*, 2023, vol. 14, no. 1, article number 6305. DOI: [10.1038/s41467-023-42014-x](https://doi.org/10.1038/s41467-023-42014-x).
90. Telford M. The case for bulk metallic glass. *Materials Today*, 2004, vol. 7, no. 3, pp. 36–43. DOI: [10.1016/S1369-7021\(04\)00124-5](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(04)00124-5).
91. Li W., Wang C., Li L.Y. et al. Manipulating defects in metallic glasses via ultrasonic treatment. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2025, vol. 287, article number 109960. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2025.109960](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2025.109960).

Effect of ultrasonic treatment on structural transformations and mechanical behaviour of amorphous alloys (REVIEW)

Inga E. Permyakova^{*1}, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, senior researcher of the Laboratory of Physicochemistry and Mechanics of Metallic Materials

Elena V. Dyuzheva-Maltseva², postgraduate student

Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow (Russia)

*E-mail: inga_perm@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1163-3888>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7199-487X>

Received 17.03.2025

Revised 03.04.2025

Accepted 27.05.2025

Abstract: The wide application of amorphous alloys is complicated by a narrow range of their thermal stability, embrittlement at elevated temperatures, difficult machinability, and low tensile plasticity. Ultrasonic treatment is an innovative method for solving these problems. Integration of ultrasonic technology into the technological chain can contribute to the improvement of the operational property of amorphous alloys, the manufacture of parts from them at different scale levels, and high-quality joining with other materials. The effect of ultrasonic vibrations on structural transformations and mechanical behaviour of amorphous alloys is not completely understood. The lack of an integrated scientific basis for the physical processes and accompanying effects in amorphous alloys under ultrasonic excitation prevents the development of the corresponding technology and optimization of its modes. Over the past decade, researchers have proposed various methods of ultrasonic treatment of amorphous alloys to improve their formability, achieve a balance of plasticity and strength, and consolidate with each other and with metals. In addition, certain ideas have been developed about their structure rejuvenation and the possibilities of transformation them to a partially nanocrystalline state under the action of ultrasound. To summarise these developments, the systematic discussion on features, parameters, and modes of ultrasonic treatment applied to ribbon and bulk amorphous alloys to improve their structure-sensitive properties are provided in this review. On this basis, the limitations of current study are discussed. The most promising applications of ultrasonic technologies for rapidly melt-quenched alloys in the near future include: their additive manufacturing, creation of hybrid composites by ultrasonic welding, ultrasonic forming for manufacturing products of complex shapes and geometries, complex multi-stage processing to obtain a unique combination of properties (e.g., melt quenching → laser irradiation → ultrasonic stimulation). This review enhances the existing knowledge on ultrasonic control of the properties and structure of amorphous alloys and facilitates a fast references on this topic for researchers.

Keywords: amorphous alloy; ultrasonic treatment; structural transformations; mechanical behaviour; nanocrystal; structure rejuvenation; composite; plasticity; forming.

Acknowledgements: The study was supported by the State Assignment No. 075-00319-25-00.

For citation: Permyakova I.E., Dyuzheva-Maltseva E.V. Effect of ultrasonic treatment on structural transformations and mechanical behaviour of amorphous alloys (REVIEW). *Frontier Materials & Technologies*, 2025, no. 2, pp. 53–71. DOI: [10.18323/2782-4039-2025-2-72-5](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2025-2-72-5).