

Оригинальная статья

УДК 669.018.2:536.425

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-2(48)-10-22

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СТЕКЛА ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ: СВОЙСТВА, ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

© 2024 г. П. Чжан¹, Ю. Ф. Иванов², А. П. Семин³, С. В. Боровский³,
В. Е. Громов³, В. В. Шляров³

¹Шанхайский университет инженерных наук (КНР, Сунцзян, Шанхай)

²Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томская область, Томск,
пр. Академический, 2/3)

³Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс,
Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) – это твердые растворы, содержащие пять или более основных элементов, находящихся в сплаве в равных или почти в равных пропорциях (ат. %). Концепция таких сплавов открывает новые пути для создания необычных металлических материалов с уникальными физическими и механическими свойствами, которые невозможно получить в известных сплавах, в составе которых обычно один основной элемент. В отдельную группу можно выделить металлические стекла (МС) на основе высокоэнтропийных сплавов (МС ВЭС). Металлические стекла – это материал, полученный резкой закалкой ВЭС из жидкого состояния и поэтому такие стекла имеют аморфную стеклоподобную структуру. Основными составляющими элементами МС ВЭС могут быть цирконий, медь, железо, никель, хром, иттрий, церий. Эти материалы весьма перспективны для применения в промышленности из-за их превосходных механических свойств, таких как высокая прочность (близка к теоретической прочности), износостойкость, твердость, исключительные магнитные свойства. Формирование, кристаллизация и кинетика этих материалов являются предметом пристального изучения. Металлические стекла ВЭС более устойчивы, по сравнению с обычными МС, за счет высокой конфигурационной энтропии. В настоящей работе представлен краткий обзор работ отечественных и зарубежных исследователей по различным аспектам металлических стекол. Показано, что изучение свойств МС ВЭС может обеспечить прорыв и новые подходы в формировании и изучении новых систем ВЭС, а также в возможности потенциального применения этих новых материалов.

Ключевые слова: металлические стекла, высокоэнтропийные сплавы, использование, свойства, спиннингование

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00145, <https://rscf.ru/project/23-29-00145/>.

Для цитирования: Чжан П., Иванов Ю.Ф., Семин А.П., Боровский С.В., Громов В.Е., Шляров В.В. Металлические стекла из высокоэнтропийных сплавов: свойства, особенности получения и использования. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;2(48):10–22. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-10-22](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-10-22)

Original article

METAL GLASSES MADE OF HIGH-ENTROPY ALLOYS: PROPERTIES, FEATURES OF PRODUCTION AND USE

© 2024 P. Zhang¹, Yu. F. Ivanov², A. P. Semin³, S. V. Borovskii³,
V. E. Gromov³, V. V. Shlyarov³

¹ Shanghai University of Engineering Sciences (PRC, Songjiang, Shanghai)

² Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskoy Ave., Tomsk, 634055, Russian Federation)

³ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. High-entropy alloys (HES) are solid solutions containing five or more basic elements in an alloy in equal or almost equal proportions (at. %). The concept of such alloys opens up new ways to create unusual metallic materials with unique physical and mechanical properties that cannot be obtained in known conditions alloys, which usually contain one main element. Metal glasses (MS) based on high-entropy alloys (MS WES) can be distinguished into a separate group. Metal glasses are a material obtained by sharp hardening of WPP from a liquid state and therefore such glasses have an amorphous glass-like structure. The main constituent elements of MS WPP can be zirconium, copper, iron, nickel, chromium, yttrium, cerium. These materials are very promising for industrial applications due to their superior mechanical properties, such as high strength (close to theoretical strength), wear resistance, hardness, and exceptional magnetic properties. The formation, crystallization and kinetics of these materials are the subject of close study. WPP metal glasses are more stable than conventional MS due to the high configuration entropy. This paper provides a brief overview of the work of domestic and foreign researchers on various aspects of metal glasses. It is shown that the study of the properties of MS WPP can provide a breakthrough and new approaches both in the formation and study of new WPP systems, as well as in the possibility of potential application of these new materials.

Keywords: metallic glasses, high-entropy alloys, use, properties, spinning

Funding: The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 23-29-00145, <https://rscf.ru/project/23-29-00145/>.

For citation: Zhang P., Ivanov Yu.F., Semin A.P., Borovskii S.V., Gromov V.E., Shlyarov V.V. Metal glasses made of high-entropy alloys: properties, features of production and use. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;2(48):10–22. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-10-22](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-10-22)

Введение

Одной из фундаментальных и практически важных задач материаловедения является разработка физических основ создания новых металлических материалов с комплексом необходимых физико-механических и эксплуатационных характеристик и технологий их получения. В самом конце XX века появились первые работы по созданию и комплексному исследованию новых, так называемых высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС), включающих до 5 – 6 основных элементов, каждый в большой концентрации (например, от 5 до 35 %) [1]. Данные материалы наряду с характеристиками, типичными для металлических сплавов, обладают уникальными и необычными свойствами, присущими, например, металлокерамике.

Многокомпонентные сплавы могут быть интересны тем, что они могут быть основой для других композиций, которые обладают лучшими свойствами, чем сплавы, основанные на одном элементе.

В отдельную группу можно выделить металлические стекла (МС) на основе высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) (рис. 1) из-за того, что этим материалам (МС ВЭС) присущи замечательные свойства составляющих: высокая твердость и эластичность МС и высокая пластичность при растяжении ВЭС [1].

Поэтому формирование, кристаллизация и кинетика таких материалов в настоящее время является предметом пристального изучения. Металлические стекла ВЭС более устойчивы по сравнению с обычными металлическими стеклами за счет высокой конфигурационной энтропии, также они обладают улучшенными механическими и магнитными свойствами. Кроме этого, в этих материалах интересны сопротивление износу, ползучесть, сопротивление окислению, высокая коррозионная стойкость и динамика релаксации [2 – 5]. Эти свойства меняются при добавлении различных химических элементов – хрома, железа, иттрия, церия [6 – 9].

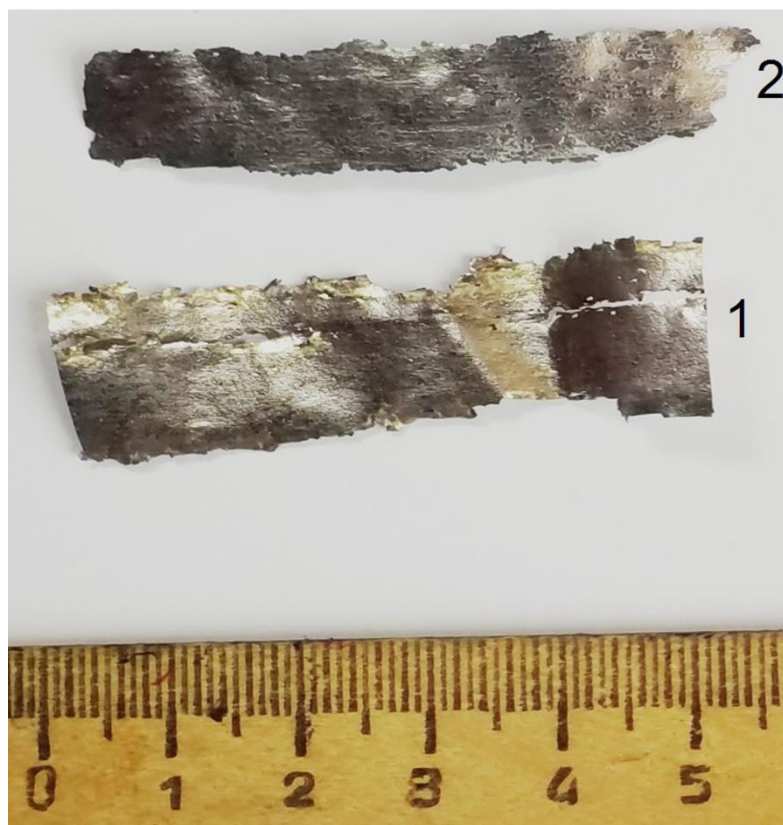


Рис. 1. Лента металлического стекла ВЭС CoCrFeNiMn после закалки (1) и после прокатки (2)
 Fig. 1. CoCrFeNiMn HEA MS tape after quenching (1) and after rolling (2)

Современные подходы к проблеме пластичности и вязкости являются важными в природе этих материалов. При этом необходимо иметь в виду и своевременно решать возникающие проблемы в технике и технологии металлургии при получении этих сплавов. Возможно, возникающая при смешении высокая энтропия не может быть условием возникновения микроструктуры типа твердого раствора. Современные исследования подчеркивают влияние размера образца на устойчивость развития полосы сдвига. Этому посвящены новые разработки и успехи в технологии получения пластичных МС [1, 2].

Превращения, вызванные напряжениями внутри дендритов пластичных фаз, могут быть другим перспективным методом получения достаточной пластичности при сохранении высокой прочности и твердости [10]. Это направление привлекало внимание исследователей, пока не появились новые методы получения и трансформирования МС ВЭС при жидкостно-твердом преобразовании.

Вопрос получения пластичных композитов МС ВЭС с оптимальной пластичностью продолжает оставаться важным направлением, которое привлекает внимание исследователей. В этом направлении больших успехов добились исследователи из США и Китая.

Для получения структур, обладающих оптимальными показателями по прочности, пластичности и другими полезными свойствами, необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение влияния легирующих элементов, деформационной обработки на свойства ВЭС. Рассмотрим некоторые основные направления анализа структуры и свойств МС.

Результаты работы и их обсуждение

Структура МС

Для понимания структуры МС необходимо разбираться и правильно применять знания и понятия в области физики конденсированного состояния для объяснения образования центров кристаллизации. Это поможет понять, каким образом образуется структура МС. Образование структуры – это главный процесс, определяющий свойства материалов.

Одной из первых попыток понять развитие центров кристаллизации было изучение природы стабильных переохлажденных жидкостей и МС. Понятно, что стеклообразование начинается только в случае, если расплав охладить ниже температуры стеклоперехода, когда не происходит зарождения центров кристаллизации. До недавнего времени считалось, что стеклообразование может происходить только при быстром охлаждении расплава. Дальнейшее изучение

этого вопроса показало, что на возможность стеклообразования [11, 12] может влиять метастабильность [14], легирующие элементы [12, 13, 15], а также температура и скорость охлаждения [11, 14, 15].

Недавние исследования показали, что для сплавов с эвтектикой возможно получение МС при медленном охлаждении. Поэтому термодинамические свойства метастабильных стекол и переохлажденных расплавов можно напрямую определять по температуре, соответственно, выше или ниже температуры стеклоперехода. Эти данные открывают новые перспективы для изучения стабильности переохлажденных жидкостей и природы стеклообразования МС.

Расстеклование МС ВЭС

Расстеклование – это явление, когда полностью аморфный (стекловидный) материал вдруг частично или полностью кристаллизуется. Это может произойти в результате нагрева или деформирования, а также при совместном действии этих факторов. Этим процессом можно управлять при помощи особых микроструктурных легирующих добавок [16]. При помощи добавок можно придать МС ВЭС специальные механические свойства, такие как самоупрочнение, поверхностную твердость, произвести модификацию поверхности, чтобы увеличить текучесть [17], коррозионную стойкость и термостойкость [18]. Расстеклование – очень важное свойство МС ВЭС, так как им можно регулировать размеры, распределение расстеклованных структур в каждом слое МС ВЭС, что поможет уточнить технологию послойной обработки объемных ВЭС.

Теория кристаллизации постоянно пересматривается, это позволяет получать значимые и полезные результаты. Без сомнения, МС формируются в результате распределения и замедления кристаллизации. Сходные явления вызывают проявления полиморфизма [19], образования кристаллов в тонких и сверхтонких фольгах [20]. Недавние исследования [21, 22] показывают точные механизмы и причины этих явлений. Применение сверхбыстрой калориметрии, управление фазовыми превращениями на стадии кристаллизации, расчет этих стадий и тайминг этих явлений обеспечивают точность расчетов и понимания механизмов протекания кристаллизации в стеклорасплавах.

Релаксация

Релаксацию можно рассматривать отдельно или можно выделить первичную [23], вторичную [24], структурную [25], динамическую [26], термическую [27], химическую релаксацию, зависящую от состава [28], α -релаксацию,

β -релаксацию [29], γ -релаксацию [27], а также релаксацию Джохари-Гольдштейна.

Каждый вид релаксации имеет свои особенности и может быть изучен с помощью спектроскопии [30 – 32], измерения молекулярной динамики, закалки [33], энтальпии, дилатометрии и плотности. В основном β -релаксация протекает в стеклах на основе La/Ce [25, 34, 35], это может наблюдаться во время отпуска [24], криогенной обработки [33], облучения ионными пучками, во время корректировки состава и во время деформаций [36 – 39].

Динамическая релаксация – это универсальное и присущее МС свойство, обладающее большим разнообразием проявлений. Это разнообразие влияет на поведение и эволюцию стекловидных систем. Механическая релаксация особенно сильно проявляется при добавках легирующих элементов [5, 26, 31], при отпуске [40], деформациях или при воздействии на материал двух или более различных видов релаксации.

Релаксация зависит от состава и протекает в разных формах: одноступенчатая, двухступенчатая [41], динамическая [26], динамико-механическая.

Деформационно-восстановительное упрочнение

Деформационно-восстановительное упрочнение (ДВУ) – это такое явление, при котором происходит перераспределение атомов в материале, что уменьшает упорядоченность и повышает энтропию системы [42]. Это увеличивает энергию системы и пластичность материала, при этом увеличиваются твердость и энтальпия. Однако высокие степени ДВУ наблюдаются только на микроуровне. Высокая степень деформационно-восстановительного упрочнения сравнима с закалкой при скорости 10^{10} К/с. Во многих случаях это явление является антагонистом релаксации и протекает совместно с пластическими деформациями.

Упорядочение

Упорядочение – это структурное регулирование, протекающее в МС таким образом, что способствует гомогенности и уменьшает энтропию [25, 43]. Это может проявляться в виде структурного упорядочения, упорядочения ближнего и среднего порядка [44, 45]. Явление может протекать совместно с разделением фаз (сепарацией фаз).

Явление сепарации фаз может протекать в МС и предшествовать упорядочению и кристаллизации. При этом жидкая фаза разделяется на две, кристаллизация в каждой фазе протекает независимо, в результате образуется кристаллический материал [46, 47]. Ранее считалось, что

явление разделения фаз может протекать только в жидкостях. Современные исследования на синхротроне показали глубинную природу этого явления, что способствует дальнейшему его изучению.

Жидкостно-жидкостный переход

Жидкостно-жидкостный переход – интересное явление, обнаруженное недавно при исследовании на синхротроне с целью глубже понять зарождение, рост и кристаллизацию в МС выше уровня ликвидуса [48, 49]. Хорошо известно, что никаких фаз выше ликвидуса не существует, и, стало быть, формирования фаз не ожидается. Однако жидкостно-жидкостный переход показывает, что преобразование фаз возможно, существует и наблюдается во многих жидких фазах, особенно при их твердении ниже T_L (температура ликвидуса). Во многих случаях эта температура наведенная и зависит от давления.

Деформационный сдвиг

Весьма интересно развитие так называемых полос (зон) деформационного сдвига, их появление, образование, распространение [48], механизмы и условия, при которых происходят структурные изменения (нагрев, охлаждение, действие давления). Изучение этих явлений представляет большой научный интерес. Деформации и разрушения в МС происходят по другим механизмам, а не из-за перемещения дислокаций, как в кристаллических материалах (рис. 2).

Зоны деформационного сдвига, их формирование, образование, рост, остановка распространения, текучесть и старение – предмет большого интереса и изучения, и, в общем, называется динамикой зон деформационного сдвига. Это, по сути, незначительное явление, но главная причина набора прочности при комнатной температуре,

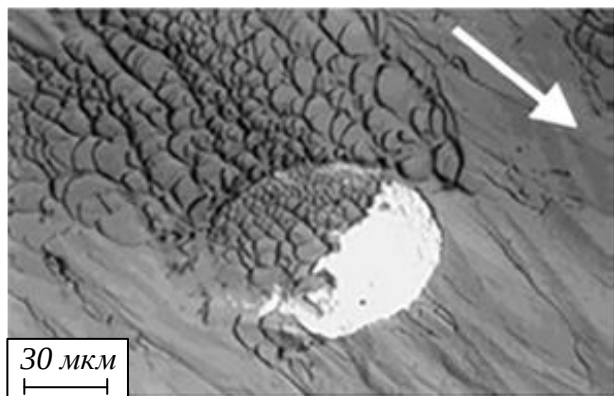


Рис. 2. Движение зоны сдвига в ВЭС (стрелкой указано направление движения) [48]

Fig. 2. Movement of the shear zone in the wind farm (the arrow indicates the direction of movement) [48]

что определяет жесткость материала, а при неблагоприятном стечении обстоятельств может служить причиной катастрофических разрушений. Эти явления управляются различными механизмами и факторами, такими как температура, уровень давления и внутренних напряжений. Это можно определить при помощи высокоскоростной оптической и инфракрасной диагностики.

«Зубцевание»

Явление зубцевания наблюдается во время пластических деформаций МС (деформационная кривая, полученная после испытания ленты ВЭС на одноосное растяжение, напоминает форму зубцов пилы) [50]. «Зубцевание» зависит от негетогенных деформаций, кавитации, локального нагрева (термоотпуск и β -релаксация) и образования линий среза. На возникновение и роль «зубцевания» в распространении зон сдвига, их динамику и развитие влияют различные факторы; наиболее значимые факторы – величина нагрузки и ее направление.

Наностекла

Наностекла – это новый вид нано-кристаллических материалов. Механические свойства этих материалов напрямую зависят от размера зерен, межфазных границ и размеров [51]. Пластичность зависит от распределения напряжений [52]. Поверхность раздела служит своеобразной армирующей прослойкой и увеличивает прочность материала. Наиболее распространенные изученные представители наностекол – системы Cu – Zr, N – Ti – Cu, Fe – Sc [53].

Отношение к коррозии

Коррозионные свойства МС усиленно изучаются, они зависят от таких параметров, как легирующие добавки [54], качество поверхности, обработка поверхности лазером, плакирование [55], магнетронная обработка.

Сплавы с памятью формы

Высокоэнтропийные сплавы с памятью формы – это особый вид сплавов, обладающих реверсивной мартенситной трансформацией от B2 до B19' [56, 57], которая используется как шаблон для управления эффектом памяти формы. Эти сплавы широко применяются на практике. Они производятся напылением, быстрой закалкой, отпуском, обработкой лазером.

Многие отрасли современной промышленности широко используют обыкновенные сплавы, но всегда существует потребность в материалах с новыми высокими свойствами, которыми могут обладать МС ВЭС (рис. 3). Можно выделить некоторые отрасли наукоемких технологий, в



Рис. 3. Вид изделий из ВЭС
(детали для трубопроводов) [58]
Fig. 3. Type of products from wind farms
(parts for pipelines) [58]

которых уже сейчас имеется и возрастает потребность в материалах с улучшенными технологическими свойствами:

- материалы для производства двигателей;
- материалы для использования в ядерных установках;
- материалы для производства инструментов и деталей машин с улучшенными свойствами;
- устройства, материалы и приспособления для работы с отходами и вредными веществами;
- легкие и прочные конструкционные материалы для строительства и машиностроения;
- высокорезистивные материалы для электро-технической промышленности;
- материалы для водородных энергоустановок и суперконденсаторов.

Несмотря на преимущества этих материалов, имеется ряд ограничений, препятствующих широкому использованию МС ВЭС. Эти ограничения связаны с производством МС (химия, физика, металлургия), с техникой и технологией (использование сплавов для инструментов, механизмов и т.д.), со структурой сплавов (идентификация фаз и их свойства), со свойствами сплавов (механическими, физическими и функциональными) [58]. Для решения этих задач необходим комплекс целенаправленных исследований в вышеуказанных направлениях методами современного физического материаловедения.

Выводы

Необходимо отметить, что высокоэнтروпийные сплавы имеют потенциальное применение в различных областях техники и, как предполагается, заменят известные металлы и сплавы во многих областях человеческой деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen Yu., Dai Z.-W., Jiang J.-Z. High entropy metallic glasses: Glass formation, crystallization and properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;866:158852. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158852>
2. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов. *Физика металлов и металловедение*. 2020;121(8):807–841. <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
3. Zhang M., Gong P., Li N., Zheng G., Deng L., Jin J., Li Q., Wang X. Oxidation behavior of a Ti16.7Zr16.7Hf16.7Cu16.7Ni16.7Be16.7 high-entropy bulk metallic glass. *Materials Letters*. 2019;236:135–138. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.10.056>
4. Gong P., Li F., Deng L., Wang X., Jin J. Research on nano-scratching behavior of TiZrHfBeCu(Ni) high entropy bulk metallic glasses. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;817:153240. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153240>
5. Zhang L.T., Duan Y.J., Wada T., Kato H., Pelletier J.M., Crespo D., Pineda E., Qiao J.C. Dynamic mechanical relaxation behavior of Zr35Hf17.5Ti5.5Al12.5Co7.5Ni12Cu10 high entropy bulk metallic glass. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021;83:248–255. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.074>
6. Li M., Guan H., Yang S., Ma X., Li Q. Minor Cr alloyed Fe–Co–Ni–P–B high entropy bulk metallic glass with excellent mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2021;805:140542. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140542>
7. Li N., Wu S., Ouyang D., Zhang J., Liu L. Fe-based metallic glass reinforced FeCoCrNiMn high entropy alloy through selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;822:153695. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153695>
8. Pang C.M., Yuan C.C., Chen L., Xu H., Guo K., He J.C., Li Y., Wei M.S., Wang X.M., Huo J.T., Shen B.L. Effect of Yttrium addition on magnetocaloric properties of Gd-Co-Al-Ho high entropy metallic glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2020;549:120354. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120354>
9. Zhao Y., Zhao P., Li W., Kou S., Jiang J., Mao X., Yang Z. The microalloying effect of Ce on the mechanical properties of medium entropy bulk metallic glass composites. *Crystals*. 2019;9(9):483. <https://doi.org/10.3390/cryst9090483>
10. Yang Y., Liu C.T. Size effect on stability of shear-band propagation in bulk metallic glasses: an overview. *Journal of Materials Science*.

- 2012;47:55–67.
<https://doi.org/10.1007/s10853-011-5915-8>
11. Rashidi R., Malekan M., Gholamipour R. Crystallization kinetics of Cu₄₇Zr₄₇Al₆ and (Cu₄₇Zr₄₇Al₆)₉₉Sn₁ bulk metallic glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018;498:272–280.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.06.042>
 12. Shao L., Xue L., Wang Q., Ma K., Huang J., Shen B. Effects of Si addition on glass-forming ability and crystallization behavior of DyCoAl bulk metallic glass. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;874:159964.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159964>
 13. Lu S., Sun S., Li K., Li H., Huang X., Tu G. The effect of Y addition on the crystallization behaviors of Zr-Cu-Ni-Al bulk metallic glasses. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;799:501–512.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.05.219>
 14. Rahvard M.M., Tamizifar M., Boutorabi S.M.A. The effect of Ag addition on the non-isothermal crystallization kinetics and fragility of Zr₅₆Co₂₈Al₁₆ bulk metallic glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018;481:74–84.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.10.026>
 15. Sohrabi S., Gholamipour R. Effect of Nb minor addition on the crystallization kinetics of Zr-Cu-Al-Ni metallic glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021;560:120731.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120731>
 16. Liu H., Jiang Q., Huo J., Zhang Y., Yang W., Li X. Crystallization in additive manufacturing of metallic glasses: A review. *Additive Manufacturing*. 2020;36:101568.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101568>
 17. Pogatscher S., Leutenegger D., Schawe J.E.K., Maris P., Schäublin R., Uggowitzer P.J., Löffler J.F. Monotropic polymorphism in a glass-forming metallic alloy. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2018;30:234002.
<https://doi.org/10.1088/1361-648X/aac054>
 18. Kumar A., Nayak S.K., Bijalwan P., Dutta Mo., Banerjee A., Laha T. Optimization of mechanical and corrosion properties of plasma sprayed low-chromium containing Fe-based amorphous/nanocrystalline composite coating. *Surface and Coatings Technology*. 2019;370:255–268.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.010>
 19. Schawe J.E.K., Pogatscher S., Löffler J.F. Thermodynamics of polymorphism in a bulk metallic glass: Heat capacity measurements by fast differential scanning calorimetry. *Thermochimica Acta*. 2020;685:178518.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178518>
 20. Ketov S.V., Ivanov Yu.P., Şopu D., Louzguine-Luzgin D.V., Suryanarayana C., Rodin A.O., Schöberl T., Greer A.L., Eckert J. High-resolution transmission electron microscopy investigation of diffusion in metallic glass multilayer films. *Materials Today Advances*. 2019;1:100004.
<https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2019.01.003>
 21. Li Z., Huang Z., Sun F., Li X., Ma J. Forming of metallic glasses: mechanisms and processes. *Materials Today Advances*. 2020;7:100077.
<https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100077>
 22. Hu Z., Lei X., Wang Y., Zhang K. Oxidation feature and diffusion mechanism of Zr-based metallic glasses near the glass transition point. *Materials Research Express*. 2018;5:036511.
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab309>
 23. Liu B.B., Hu L., Wang Z.Y., Ye F. Viscosity, relaxation and fragility of the Ca₆₅Mg₁₅Zn₂₀ bulk metallic glass. *Intermetallics*. 2019;109:8–15.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.03.002>
 24. He N., Song L., Xu W., Huo J., Wang J.-Q., Li R.-W. The evolution of relaxation modes during isothermal annealing and its influence on properties of Fe-based metallic glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2019;509:95–98.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.12.035>
 25. Louzguine-Luzgin D.V., Zadorozhnyy M.Yu., Ketov S.V., Jiang J., Golovin I.S., Aronin A.S. Influence of cyclic loading on the structure and double-stage structure relaxation behavior of a Zr-Cu-Fe-Al metallic glass. *Materials Science and Engineering: A*. 2019;742:526–531.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.031>
 26. Wang W.H. Dynamic relaxations and relaxation-property relationships in metallic glasses. *Progress in Materials Science*. 2019;106:100561.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.03.006>
 27. Das A., Derlet P.M., Liu C., Dufresne E.M., Maaß R. Stress breaks universal aging behavior in a metallic glass. *Nature Communications*. 2019;10:5006.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-12892-1>
 28. Zhang L.T., Duan Y.J., Wada T., Kato H., Pelletier J.M., Crespo D., Pineda E., Qiao J.C. Dynamic mechanical relaxation behavior of Zr₃₅Hf_{17.5}Ti_{5.5}Al_{12.5}Co_{7.5}Ni₁₂Cu₁₀ high entropy bulk metallic glass. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021;83:248–255.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.074>
 29. Zhang Y.R., Zhang W., Xiang Q.C., Li Q.F., Ren Y.L., Qiu K.Q. Relating activation of brittle-to-ductile transition to β relaxation in Cu₄₆Zr₄₄Al₇Y₃ metallic glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2020;544:120189.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120189>
 30. Cheng Y.T., Hao Q., Qiao J.C., Crespo D., Pineda E., Pelletier J.M. Effect of minor addi-

- tion on dynamic mechanical relaxation in ZrCu-based metallic glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021;553:120496. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120496>
31. Qiao J.C., Cong J., Wang Q., Pelletier J.M., Yao Y. Effects of iron addition on the dynamic mechanical relaxation of Zr₅₅Cu₃₀Ni₅Al₁₀ bulk metallic glasses. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;749:262–267. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.285>
 32. Qiao J., Pelletier J.-M., Casalini R. Relaxation of bulk metallic glasses studied by mechanical spectroscopy. *Journal of Physical Chemistry B*. 2013;117(43):13658–13666. <https://doi.org/10.1021/jp4067179>
 33. Zhang W., Xiang Q.C., Ma C.Y., Ren Y.L., Qiu K.Q. Relaxation-to-rejuvenation transition of a Ce-based metallic glass by quenching/cryogenic treatment performed at sub-T_g. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;825:153997. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153997>
 34. Qiao J.C., Chen Y.H., Casalini R., Pelletier J.M., Yao Y. Main α relaxation and slow β relaxation processes in a La₃₀Ce₃₀Al₁₅Co₂₅ metallic glass. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019; 35(6):982–986. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.12.003>
 35. Zhai W., Wang C.H., Qiao J.C., Pelletier J.M., Dai F.P., Wei B. Distinctive slow β relaxation and structural heterogeneity in (LaCe)-based metallic glass. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;742:536–541. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.237>
 36. Michalik S., Michalikova J., Pavlovic M., Sovak P., Liermann H.-P., Miglierini M. Structural modifications of swift-ion-bombarded metallic glasses studied by high-energy X-ray synchrotron radiation. *Acta Materialia*. 2014;80:309–316. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.07.072>
 37. Lu Z., Zhang Y., Li W., Wang J., Liu X., Wu Y., Wang H., Ma D., Lu Z. Materials genome strategy for metallic glasses. *Journal of Materials Science & Technology*. 2023;166:173–199. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.04.074>
 38. Lv Z., Yuan C., Ke H., Shen B. Defects activation in CoFe-based metallic glasses during creep deformation. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021;69:42–47. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.08.012>
 39. Wang T., Ma X., Chen Y., Qiao J., Xie L., Li Q. Structural heterogeneity originated plasticity in Zr–Cu–Al bulk metallic glasses. *Intermetallics*. 2020;121:106790. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106790>
 40. Cui X., Qiao J.C., Li J.J., Meng L.Z., Guo J., Zu F.Q., Zhang X.F., Bian B.C., Zhang Q.D., Ma Y.B. Room temperature activated slow β relaxation and large compressive plasticity in a LaCe-based bulk metallic glass. *Intermetallics*. 2020;122:106793. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106793>
 41. Song L., Xu W., Huo J., Wang J.-Q., Wang X., Li R. Two-step relaxations in metallic glasses during isothermal annealing. *Intermetallics*. 2018;93:101–105. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2017.11.016>
 42. Pan J., Wang Y.X., Guo Q., Zhang D., Greer A.L., Li Y. Extreme rejuvenation and softening in a bulk metallic glass. *Nature Communications*. 2018; 9:560. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-02943-4>
 43. Zhu Y., Wang H., Wu L., Li M. Development of one-dimensional periodic packing in metallic glass spheres. *Scripta Materialia*. 2020;177:132–136. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.10.026>
 44. Lou H., Zeng Z., Zhang F., Chen S., Luo P., Chen X., Ren Y., Prakapenka V.B., Prescher C., Zuo X., Li T., Wen J., Wang W.-H., Sheng H., Zeng Q. Two-way tuning of structural order in metallic glasses. *Nature Communications*. 2020;11:314. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14129-7>
 45. Michalik Š., Jóvári P., Saksl K., Ďurišin M., Balga D., Darpentigny J., Drakopoulos M. Short range order and crystallization of Cu–Hf metallic glasses. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;853:156775. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156775>
 46. Feng S., Fu H., Zhou H., Wu Y., Lu Z., Dong H. A general and transferable deep learning framework for predicting phase formation in materials. *Computational Materials*. 2021;7:10. <https://doi.org/10.1038/s41524-020-00488-z>
 47. Zheng J., Zhang H., Miao Y., Chen S., Vlassak J.J. Temperature-resistance sensor arrays for combinatorial study of phase transitions in shape memory alloys and metallic glasses. *Scripta Materialia*. 2019;168:144–148. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.04.027>
 48. Cao C.R., Huang K.Q., Shi J.A., Zheng D.N., Wang W.H., Gu L., Bai H.Y. Liquid-like behaviours of metallic glassy nanoparticles at room temperature. *Nature Communications*. 2019;1966. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09895-3>
 49. Chen E.-Y., Peng S.-X., Peng L., Michiel M.D., Vaughan G.B.M., Yu Y., Yu H.-B., Ruta B., Wei S., Liu L. Glass-forming ability correlated with the liquid-liquid transition in Pd_{42.5}Ni_{42.5}P₁₅ alloy. *Scripta Materialia*. 2021;193:117–121. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.10.042>

50. Xie X., Lo Y.-C., Tong Y., Qiao J., Wang G., Ogata S., Qi H., Dahmen K.A., Gao Y., Liaw P.K. Origin of serrated flow in bulk metallic glasses. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2019;124:634–642.
<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.11.015>
51. Adjaoud O., Albe K. Microstructure formation of metallic nanoglasses: Insights from molecular dynamics simulations. *Acta Materialia*. 2018;145:322–330.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.12.014>
52. Adjaoud O., Albe K. Influence of microstructural features on the plastic deformation behavior of metallic nanoglasses. *Acta Materialia*. 2019;168:393–400.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.02.033>
53. Wang C., Mu X., Chellali M.R., Kilmametov A., Ivanisenko Yu., Gleiter H., Hahn H. Tuning the Curie temperature of Fe₉₀Sc₁₀ nanoglasses by varying the volume fraction and the composition of the interfaces. *Scripta Materialia*. 2019;159:109–112.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.09.025>
54. Maaß R. Beyond serrated flow in bulk metallic glasses: what comes next? *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2020;51:5597–5605.
<https://doi.org/10.1007/s11661-020-05985-w>
55. Ibrahim M.Z., Sarhan A.A.D., Kuo T.Y., Yusof F., Hamdi M. Characterization and hardness enhancement of amorphous Fe-based metallic glass laser cladded on nickel-free stainless steel for biomedical implant application. *Materials Chemistry and Physics*. 2019;235:121745.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121745>
56. Escher B., Kaban I., Kühn U., Eckert J., Pauly S. Stability of the B2 CuZr phase in Cu-Zr-Al-Sc bulk metallic glass matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;790:657–665.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.139>
57. Schultz L.E., Afflerbach B., Szlufarska I., Morgan D. Molecular dynamic characteristic temperatures for predicting metallic glass forming ability. *Computational Materials Science*. 2022;201:110877.
<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110877>
58. Ali Rafique M.M. Bulk Metallic Glasses and Their Composites: Additive Manufacturing and Modeling and Simulation. Berlin. Boston: De Gruyter. 2021.
<https://doi.org/10.1515/9783110747232>
1. Chen Yu., Dai Z.-W., Jiang J.-Z. High entropy metallic glasses: Glass formation, crystallization and properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;866:158852.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158852>
2. Rogachev A.S. Structure, stability and properties of high-entropy alloys. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2020;121(8):807–841. (In Russ.). EDN:REFBUL.
<https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
3. Zhang M., Gong P., Li N., Zheng G., Deng L., Jin J., Li Q., Wang X. Oxidation behavior of a Ti_{16.7}Zr_{16.7}Hf_{16.7}Cu_{16.7}Ni_{16.7}Be_{16.7} high-entropy bulk metallic glass. *Materials Letters*. 2019;236:135–138.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.10.056>
4. Gong P., Li F., Deng L., Wang X., Jin J. Research on nano-scratching behavior of TiZrHfBeCu(Ni) high entropy bulk metallic glasses. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;817:153240.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153240>
5. Zhang L.T., Duan Y.J., Wada T., Kato H., Pelletier J.M., Crespo D., Pineda E., Qiao J.C. Dynamic mechanical relaxation behavior of Zr₃₅Hf_{17.5}Ti_{5.5}Al_{12.5}Co_{7.5}Ni₁₂Cu₁₀ high entropy bulk metallic glass. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021;83:248–255.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.074>
6. Li M., Guan H., Yang S., Ma X., Li Q. Minor Cr alloyed Fe–Co–Ni–P–B high entropy bulk metallic glass with excellent mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2021;805:140542.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140542>
7. Li N., Wu S., Ouyang D., Zhang J., Liu L. Fe-based metallic glass reinforced FeCoCrNiMn high entropy alloy through selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;822:153695.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153695>
8. Pang C.M., Yuan C.C., Chen L., Xu H., Guo K., He J.C., Li Y., Wei M.S., Wang X.M., Huo J.T., Shen B.L. Effect of Yttrium addition on magnetocaloric properties of Gd-Co-Al-Ho high entropy metallic glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2020;549:120354.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120354>
9. Zhao Y., Zhao P., Li W., Kou S., Jiang J., Mao X., Yang Z. The microalloying effect of Ce on the mechanical properties of medium entropy bulk metallic glass composites. *Crystals*. 2019;9(9):483.
<https://doi.org/10.3390/cryst9090483>
10. Yang Y., Liu C.T. Size effect on stability of shear-band propagation in bulk metallic glasses: an overview. *Journal of Materials Science*. 2012;47:55–67.
<https://doi.org/10.1007/s10853-011-5915-8>

REFERENCES

1. Chen Yu., Dai Z.-W., Jiang J.-Z. High entropy metallic glasses: Glass formation, crystalliza-

11. Rashidi R., Malekan M., Gholamipour R. Crystallization kinetics of Cu₄₇Zr₄₇Al₆ and (Cu₄₇Zr₄₇Al₆)₉₉Sn₁ bulk metallic glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018;498:272–280.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.06.042>
12. Shao L., Xue L., Wang Q., Ma K., Huang J., Shen B. Effects of Si addition on glass-forming ability and crystallization behavior of DyCoAl bulk metallic glass. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;874:159964.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159964>
13. Lu S., Sun S., Li K., Li H., Huang X., Tu G. The effect of Y addition on the crystallization behaviors of Zr-Cu-Ni-Al bulk metallic glasses. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;799:501–512.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.05.219>
14. Rahvard M.M., Tamizifar M., Boutorabi S.M.A. The effect of Ag addition on the non-isothermal crystallization kinetics and fragility of Zr₅₆Co₂₈Al₁₆ bulk metallic glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018;481:74–84.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.10.026>
15. Sohrabi S., Gholamipour R. Effect of Nb minor addition on the crystallization kinetics of Zr-Cu-Al-Ni metallic glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021;560:120731.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120731>
16. Liu H., Jiang Q., Huo J., Zhang Y., Yang W., Li X. Crystallization in additive manufacturing of metallic glasses: A review. *Additive Manufacturing*. 2020;36:101568.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101568>
17. Pogatscher S., Leutenegger D., Schawe J.E.K., Maris P., Schäublin R., Uggowitzer P.J., Löffler J.F. Monotropic polymorphism in a glass-forming metallic alloy. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2018;30:234002.
<https://doi.org/10.1088/1361-648X/aac054>
18. Kumar A., Nayak S.K., Bijalwan P., Dutta Mo., Banerjee A., Laha T. Optimization of mechanical and corrosion properties of plasma sprayed low-chromium containing Fe-based amorphous/nanocrystalline composite coating. *Surface and Coatings Technology*. 2019;370:255–268.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.010>
19. Schawe J.E.K., Pogatscher S., Löffler J.F. Thermodynamics of polymorphism in a bulk metallic glass: Heat capacity measurements by fast differential scanning calorimetry. *Thermochimica Acta*. 2020;685:178518.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178518>
20. Ketov S.V., Ivanov Yu.P., Şopu D., Louzguine-Luzgin D.V., Suryanarayana C., Rodin A.O., Schöberl T., Greer A.L., Eckert J. High-resolution transmission electron microscopy investigation of diffusion in metallic glass multilayer films. *Materials Today Advances*. 2019;1:100004.
<https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2019.01.003>
21. Li Z., Huang Z., Sun F., Li X., Ma J. Forming of metallic glasses: mechanisms and processes. *Materials Today Advances*. 2020;7:100077.
<https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100077>
22. Hu Z., Lei X., Wang Y., Zhang K. Oxidation feature and diffusion mechanism of Zr-based metallic glasses near the glass transition point. *Materials Research Express*. 2018;5:036511.
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab309>
23. Liu B.B., Hu L., Wang Z.Y., Ye F. Viscosity, relaxation and fragility of the Ca₆₅Mg₁₅Zn₂₀ bulk metallic glass. *Intermetallics*. 2019;109:8–15.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.03.002>
24. He N., Song L., Xu W., Huo J., Wang J.-Q., Li R.-W. The evolution of relaxation modes during isothermal annealing and its influence on properties of Fe-based metallic glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2019;509:95–98.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.12.035>
25. Louzguine-Luzgin D.V., Zadorozhnyy M.Yu., Ketov S.V., Jiang J., Golovin I.S., Aronin A.S. Influence of cyclic loading on the structure and double-stage structure relaxation behavior of a Zr–Cu–Fe–Al metallic glass. *Materials Science and Engineering: A*. 2019;742:526–531.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.031>
26. Wang W.H. Dynamic relaxations and relaxation-property relationships in metallic glasses. *Progress in Materials Science*. 2019;106:100561.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.03.006>
27. Das A., Derlet P.M., Liu C., Dufresne E.M., Maaß R. Stress breaks universal aging behavior in a metallic glass. *Nature Communications*. 2019;10:5006.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-12892-1>
28. Zhang L.T., Duan Y.J., Wada T., Kato H., Pelletier J.M., Crespo D., Pineda E., Qiao J.C. Dynamic mechanical relaxation behavior of Zr₃₅Hf_{17.5}Ti_{5.5}Al_{12.5}Co_{7.5}Ni₁₂Cu₁₀ high entropy bulk metallic glass. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021;83:248–255.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.074>
29. Zhang Y.R., Zhang W., Xiang Q.C., Li Q.F., Ren Y.L., Qiu K.Q. Relating activation of brittle-to-ductile transition to β relaxation in Cu₄₆Zr₄₄Al₇Y₃ metallic glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2020;544:120189.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120189>
30. Cheng Y.T., Hao Q., Qiao J.C., Crespo D., Pineda E., Pelletier J.M. Effect of minor addition

- on dynamic mechanical relaxation in ZrCu-based metallic glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021;553:120496.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120496>
31. Qiao J.C., Cong J., Wang Q., Pelletier J.M., Yao Y. Effects of iron addition on the dynamic mechanical relaxation of Zr₅₅Cu₃₀Ni₅Al₁₀ bulk metallic glasses. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;749:262–267.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.285>
 32. Qiao J., Pelletier J.-M., Casalini R. Relaxation of bulk metallic glasses studied by mechanical spectroscopy. *Journal of Physical Chemistry B*. 2013;117(43):13658–13666.
<https://doi.org/10.1021/jp4067179>
 33. Zhang W., Xiang Q.C., Ma C.Y., Ren Y.L., Qiu K.Q. Relaxation-to-rejuvenation transition of a Ce-based metallic glass by quenching/cryogenic treatment performed at sub-T_g. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;825:153997.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153997>
 34. Qiao J.C., Chen Y.H., Casalini R., Pelletier J.M., Yao Y. Main α relaxation and slow β relaxation processes in a La₃₀Ce₃₀Al₁₅Co₂₅ metallic glass. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019; 35(6):982–986.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.12.003>
 35. Zhai W., Wang C.H., Qiao J.C., Pelletier J.M., Dai F.P., Wei B. Distinctive slow β relaxation and structural heterogeneity in (LaCe)-based metallic glass. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;742:536–541.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.237>
 36. Michalik S., Michalikova J., Pavlovic M., Sovak P., Liermann H.-P., Miglierini M. Structural modifications of swift-ion-bombarded metallic glasses studied by high-energy X-ray synchrotron radiation. *Acta Materialia*. 2014;80:309–316.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.07.072>
 37. Lu Z., Zhang Y., Li W., Wang J., Liu X., Wu Y., Wang H., Ma D., Lu Z. Materials genome strategy for metallic glasses. *Journal of Materials Science & Technology*. 2023;166:173–199. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.04.074>
 38. Lv Z., Yuan C., Ke H., Shen B. Defects activation in CoFe-based metallic glasses during creep deformation. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021;69:42–47.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.08.012>
 39. Wang T., Ma X., Chen Y., Qiao J., Xie L., Li Q. Structural heterogeneity originated plasticity in Zr–Cu–Al bulk metallic glasses. *Intermetallics*. 2020;121:106790.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106790>
 40. Cui X., Qiao J.C., Li J.J., Meng L.Z., Guo J., Zu F.Q., Zhang X.F., Bian B.C., Zhang Q.D., Ma Y.B. Room temperature activated slow β relaxation and large compressive plasticity in a LaCe-based bulk metallic glass. *Intermetallics*. 2020;122:106793.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106793>
 41. Song L., Xu W., Huo J., Wang J.-Q., Wang X., Li R. Two-step relaxations in metallic glasses during isothermal annealing. *Intermetallics*. 2018;93:101–105.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2017.11.016>
 42. Pan J., Wang Y.X., Guo Q., Zhang D., Greer A.L., Li Y. Extreme rejuvenation and softening in a bulk metallic glass. *Nature Communications*. 2018; 9:560.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-02943-4>
 43. Zhu Y., Wang H., Wu L., Li M. Development of one-dimensional periodic packing in metallic glass spheres. *Scripta Materialia*. 2020;177:132–136.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.10.026>
 44. Lou H., Zeng Z., Zhang F., Chen S., Luo P., Chen X., Ren Y., Prakapenka V.B., Prescher C., Zuo X., Li T., Wen J., Wang W.-H., Sheng H., Zeng Q. Two-way tuning of structural order in metallic glasses. *Nature Communications*. 2020;11:314.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-14129-7>
 45. Michalik Š., Jóvári P., Saksl K., Ďurišin M., Balga D., Darpentigny J., Drakopoulos M. Short range order and crystallization of Cu–Hf metallic glasses. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;853:156775.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156775>
 46. Feng S., Fu H., Zhou H., Wu Y., Lu Z., Dong H. A general and transferable deep learning framework for predicting phase formation in materials. *Computational Materials*. 2021;7:10.
<https://doi.org/10.1038/s41524-020-00488-z>
 47. Zheng J., Zhang H., Miao Y., Chen S., Vlassak J.J. Temperature-resistance sensor arrays for combinatorial study of phase transitions in shape memory alloys and metallic glasses. *Scripta Materialia*. 2019;168:144–148.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.04.027>
 48. Cao C.R., Huang K.Q., Shi J.A., Zheng D.N., Wang W.H., Gu L., Bai H.Y. Liquid-like behaviours of metallic glassy nanoparticles at room temperature. *Nature Communications*. 2019;1966. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09895-3>
 49. Chen E.-Y., Peng S.-X., Peng L., Michiel M.D., Vaughan G.B.M., Yu Y., Yu H.-B., Ruta B., Wei S., Liu L. Glass-forming ability correlated with the liquid-liquid transition in Pd_{42.5}Ni_{42.5}P₁₅ alloy. *Scripta Materialia*. 2021;193:117–121.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.10.042>

50. Xie X., Lo Y.-C., Tong Y., Qiao J., Wang G., Ogata S., Qi H., Dahmen K.A., Gao Y., Liaw P.K. Origin of serrated flow in bulk metallic glasses. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2019;124:634–642.
<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.11.015>
51. Adjaoud O., Albe K. Microstructure formation of metallic nanoglasses: Insights from molecular dynamics simulations. *Acta Materialia*. 2018;145:322–330.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.12.014>
52. Adjaoud O., Albe K. Influence of microstructural features on the plastic deformation behavior of metallic nanoglasses. *Acta Materialia*. 2019;168:393–400.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.02.033>
53. Wang C., Mu X., Chellali M.R., Kilmametov A., Ivanisenko Yu., Gleiter H., Hahn H. Tuning the Curie temperature of Fe₉₀Sc₁₀ nanoglasses by varying the volume fraction and the composition of the interfaces. *Scripta Materialia*. 2019;159:109–112.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.09.025>
54. Maaß R. Beyond serrated flow in bulk metallic glasses: what comes next? *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2020;51:5597–5605.
<https://doi.org/10.1007/s11661-020-05985-w>
55. Ibrahim M.Z., Sarhan A.A.D., Kuo T.Y., Yusof F., Hamdi M. Characterization and hardness enhancement of amorphous Fe-based metallic glass laser clad on nickel-free stainless steel for biomedical implant application. *Materials Chemistry and Physics*. 2019;235:121745.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121745>
56. Escher B., Kaban I., Kühn U., Eckert J., Pauly S. Stability of the B2 CuZr phase in Cu-Zr-Al-Sc bulk metallic glass matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;790:657–665.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.139>
57. Schultz L.E., Afflerbach B., Szlufarska I., Morgan D. Molecular dynamic characteristic temperatures for predicting metallic glass forming ability. *Computational Materials Science*. 2022;201:110877.
<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110877>
58. Ali Rafique M.M. Bulk Metallic Glasses and Their Composites: Additive Manufacturing and Modeling and Simulation. Berlin. Boston: De Gruyter. 2021.
<https://doi.org/10.1515/9783110747232>

Сведения об авторах

Чжан Пэй, доктор, профессор, Школа материаловедения и инженерии, Шанхайский совместный инновационный центр передовых лазерных производственных технологий

E-mail: peilei@sues.edu.cn
ORCID: 0000-0002-2342-5832

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН

E-mail: yufi55@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8022-7958
SPIN-код: 7576-4810

Александр Петрович Семин, к.т.н., старший научный сотрудник, доцент кафедры инженерных конструкций, строительных технологий и материалов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: syomin53@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3989-7420

Сергей Владимирович Боровский, научный сотрудник, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: sbnk@mail.ru

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: gromov@physics.sibsui.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343
SPIN-код: 2834-4090

Виталий Владиславович Шляров, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: shlyarov@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8130-648X
SPIN-код: 5074-3309

Information about the authors

Zhang Peilei, Dr. Sci., Prof, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser Advanced Manufacturing Technology

E-mail: peilei@sues.edu.cn
ORCID: 0000-0002-2342-5832

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: yufi55@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8022-7958
SPIN-код: 7576-4810

Alexander P. Semin, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher, associate professor of the department of engineering structures, construction technologies and materials, Siberian State Industrial University

E-mail: syomin53@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3989-7420

Sergei V. Borovskii, Researcher, Siberian State Industrial University
E-mail: sbnk@mail.ru

E-mail: shlyarov@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8130-648X
SPIN-код: 5074-3309

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Department of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343
SPIN-код: 2834-4090

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 06.10.2023

После доработки 10.06.2024

Принята к публикации 11.06.2024

Vitalii V. Shlyarov, Postgraduate of the Department of Science named after V.M. Finkel', Researcher of Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

Received 06.10.2023

Revised 10.06.2024

Accepted 11.06.2024