

**EFFECT OF CHANGE OF THE SPECIMEN THICKNESS ON SLIPPAGE
DURING HIGH-PRESSURE TORSION**

Dmitry Valerievich Gunderov^{1,2}, *Rashid Nailevich Asfandiyarov*^{1,2},
*Alfred Vasimovich Sharafutdinov*², *Sofya Dmitrievna Gunderova*^{1,2}

¹ Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 151 Oktyabrya pr., 450075, Ufa, Russia

² Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St., 450076, Ufa, Russia

^a dimagun@mail.ru

ABSTRACT

The results of determination of the slippage effect during the high-pressure torsion (HPT) of commercially pure Cu samples using the method of “joint HPT of halves” are presented. It is shown that during the HPT of Cu at a pressure of 6 GPa and room temperature at the first stage of deformation ($n = 0.25$ revolutions) slippage is insignificant. After preliminary HPT for $n = 10$, during further torsion for $n = 0.25$ slippage Λ reaches 85%. However, if at the first stage the Cu sample was subjected to HPT for $n = 10$ on anvils with a groove depth of 0.6 mm, and then the obtained disc was cut into halves that were subjected to joint HPT with $n = 0.25$ on anvils with a groove of 0.4 mm, the torsional deformation is close to the expected one, slippage is insignificant. Hence, the growth of Λ with n increasing up to 10 can be explained by the decrease in the height h of the specimen, because with increasing n the specimen material flows out from under the anvils (in fact, from the deformation zone) and at $n = 10$ the specimen height becomes less critical.

KEYWORDS

HPT; slippage; copper; microhardness.

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЗАГОТОВКИ НА ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕ
ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРУЧЕНИЕМ**

Дмитрий Валерьевич Гундеров^{1,2}, *Рашид Наилевич Асфандияров*^{1,2},
*Альфред Васимович Шарафутдинов*², *Софья Дмитриевна Гундерова*^{1,2}

¹ Институт физики молекул и кристаллов Уфимского федерального исследовательского центра РАН, пр. Октября, 151, 450075, Уфа, Россия;

² Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди, 32, 450076, Уфа, Россия

^a dimagun@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты определения эффекта проскальзывания при интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) образцов технической чистой Cu с использованием методики «совместного ИПДК половинок». Показано, что при ИПДК Cu при давлении 6 ГПа и комнатной температуре на первом этапе деформации ($n = 0,25$ оборотов) проскальзывание незначительное. После предварительного ИПДК $n = 10$ при дальнейшем кручении $n = 0,25$ проскальзывание Λ достигает 85%. Однако если на первом этапе образец Cu подвергнулся ИПДК $n = 10$ на бойках с канавкой глубиной 0,6 мм, а затем полученный диск разрезался на половины, которые подвергались совместному ИПДК с $n = 0,25$ на бойках с канавкой 0,4 мм, то деформация кручением близка к ожидаемой, проскальзывание незначительно. Таким образом, рост Λ с увеличением n до 10 можно объяснить уменьшением высоты h образца, поскольку с увеличением n происходит вытекание материала образца из-под бойков, фактически из очага деформации, и при $n = 10$ высота образца становится менее некоторой критической.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ИПДК; проскальзывание; медь; микротвердость.

Введение

Интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК) является методом, обеспечивающим наиболее сильное измельчение структуры металлических материалов [1–3]. В чистых металлах и ряде сплавов ИПДК приводит к измельчению зерна до нанокристаллического размера [1–3]. В сплавах ИПДК может приводить к неравновесным фазовым превращениям [1–3]. Некоторые сплавы при ИПДК аморфизуются [4–7]. Влиянию ИПДК на структуру и свойства различных материалов посвящено тысячи статей и несколько обзоров, в частности [1–3].

Схема и особенности метода ИПДК хорошо известны [1]. Накопленную сдвиговую деформацию γ при ИПДК оценивают, в частности, по уравнению [2]:

$$\gamma = \frac{2\pi Rn}{h}, \quad (1)$$

где R – радиус от центра заготовки до точки измерения; n – количество оборотов; h – толщина образца.

Для реализации деформации при ИПДК необходимо, чтобы обусловленное трением бойка по поверхности образца касательное напряжение ($\tau_{тр}$) при вращении бойков было выше предела текучести (σ_r) материала.

Однако ряд работ показывает [8–13], что если $\tau_{тр}$ меньше σ_r , то при ИПДК происходит «проскальзывание», когда боек скользит по поверхности заготовки и реально достигаемая деформация $\gamma_{ист}$ не соответствует расчетной. В работе [11] был реализован эффективный метод оценки проскальзывания – метод совместного ИПДК двух половинок диска (рис. 1). Было показано [11–14], что при ИПДК образцов объемного металлического стекла (ОМС) с σ_r выше 1500 МПа реальная деформация $\gamma_{ист}$ намного (на порядок) ниже ожидаемой. Но отметим, что структура ОМС в результате ИПДК существенно изменяется, несмотря на тотальное проскальзывание [11–14].

Метод совместного ИПДК двух половинок диска был использован нами для оценки проскальзывания при ИПДК различных металлических материалов [14–18]. При ИПДК меди (с невысокой σ_r) на ранних стадиях ИПДК проскальзывание Λ (рассчитывается по формуле 3) было несущественным [16–18]. Однако при ИПДК большинства материалов с исходно относительно высокой σ_r , в частности стали, титана, сплава Zr-1% Nb, сплава Ti18Zr15Nb, проскальзывание отмечено уже на начальных этапах – до первого оборота ИПДК. Если заготовки данных материалов предварительно подвергались

ИПДК с $n > 1$ или с $n > 5$ оборотов, то при дальнейшем увеличении числа оборотов проскальзывание становится тотальным [16, 17]. Но несмотря на проскальзывание, структура стали, титана, сплава Zr-1% Nb, сплава Ti18Zr15Nb измельчалась до нанокристаллической [16–18], так же как наблюдалось в работах других авторов. В недавней работе [19] показано на основе математического моделирования, что при достижении некоторого критического n деформация кручением не реализуется, проскальзывание становится тотальным.

В [16] предложена модель, объясняющая накопление деформации в образце при ИПДК твердых материалов несмотря на проскальзывание. Авторы предложили также новый метод – аккумулялирующей интенсивной пластической деформации кручением (АК ИПДК) – для достижения высокой деформации различных материалов, включая твердые [17, 20, 21].

Целью данного исследования является продолжение исследований различных факторов, влияющих на проскальзывание при ИПДК.

1. Материалы и методы

Установка ИПДК имела нижний боек с канавкой диаметром 20 мм, глубиной 0,6 мм. Также использовался боек с канавкой диаметром 20 мм, глубиной 0,4 мм (в особо указанном случае). Верхний боек во всех случа-

ях был «плоский». Исходными заготовками были диски меди диаметром 20 мм, высотой 1,1 мм. ИПДК проводили при рабочем расчетном давлении 6 ГПа и комнатной температуре. Давление рассчитывалось как $P = U/S$, где U – сила, а S – площадь, к которой приложена сила. За S (как и в других исследованиях) принимали площадь бойка [3] (однако такой подход является ошибочным, [17]).

Метод «совместного ИПДК двух половин» для определения степени проскальзывания подробно описан в [18, 22]. Исходный диск разрезали на две половины; торцы каждой половины покрыты лаком во избежание адгезии металла; половины располагались на бойке согласно рис. 1, а. Затем сложенные на бойки по схеме 1а половины Cu подвергли ИПДК. Были проведены «опыт А», при котором исходный диск Cu разрезался на две половины и подвергался совместному ИПДК с $n = 0,25$ оборота; «опыт В», при котором исходный диск Cu сначала подвергался ИПДК с $n=10$, затем полученный образец разрезался на две половины и подвергался совместному ИПДК с $n = 0,25$ оборота; «опыт С», при котором исходный диск Cu сначала подвергался ИПДК с $n = 10$ на бойках с канавкой глубиной h 0,6 мм, затем образец разрезался на две половины и подвергался совместному ИПДК с $n = 0,25$ оборота на бойках с канавкой глубиной h 0,4 мм.

Микротвердость измеряли методом Викерса при нагрузке 1 Н (100 г) в течение 10 с.

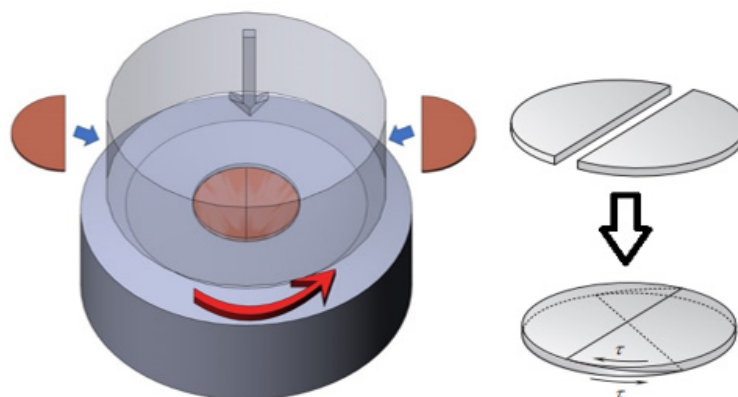


Рис. 1. Схема «совместного ИПДК двух половин» для определения «истинной» степени деформации кручением/степени проскальзывания

Fig. 1. Principle of the «joint HPT of two halves» for determining the «true» torsional strain/slippage degree

2. Результаты

Опыт А. Исходный диск Cu разрезался на две половины, которые подвергались совместному ИПДК с числом оборотов $n = 0,25$ (угол поворота бойка $\theta = 90^\circ$). Из фотографии полученного образца (рис. 2, а) видно, что проскальзывание незначительно, относительный сдвиг верхней и нижней поверхности образцов-половин близок к повороту бойка $\theta = 90^\circ$.

Опыт Б. Цельный медный диск на первом этапе подвергся ИПДК $n = 10$ на бойках с канавкой глубиной 0,6 мм, полученный образец разрезался на две половины (рис. 2, б), и данные половины снова совместно укладывались на те же бойки по схеме 1 и подвергались совместному ИПДК с $n = 0,25$. Изменение внешнего вида полу-

ченного образца (рис. 2, в) свидетельствует, что деформация кручением $\gamma_{\text{ист}}$ мала. По геометрическим параметрам полученных половин можно оценить реальную степень деформации сдвига $\gamma_{\text{ист}}$:

$$\gamma_{\text{ист}} = x/h, \quad (2)$$

где x – смещение нижней и верхней поверхности половин; h – толщина образца. Проскальзывание Λ можно оценить:

$$\Lambda = (\gamma_t - \gamma_{\text{ист}}) / \gamma_t \cdot 100\%, \quad (3)$$

где γ_t – теоретически ожидаемая деформация, рассчитанная по формуле 1.

Оценка показывает, что в опыте Б $\Lambda = 80\%$. Таким образом, после предварительного ИПДК с $n = 10$ проскальзывание становится значительным и наблюдается даже на относительно «мягкой» Cu .

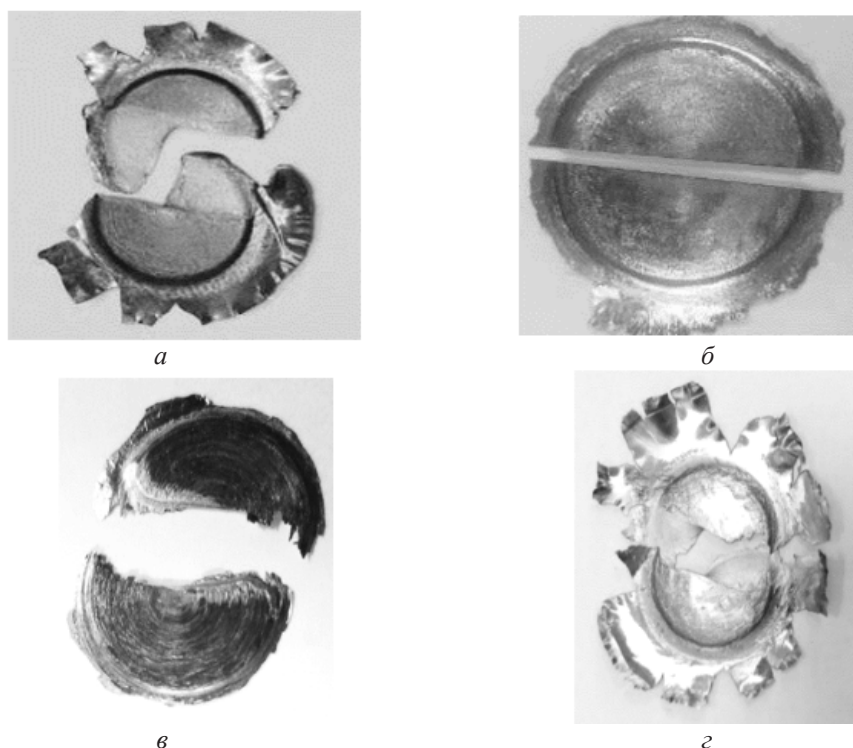


Рис. 2. Вид образцов – половин диска меди после совместного ИПДК $n = 0,25$ (а); вид образцов Cu после ИПДК $n = 10$ и резки пополам (канавка $h = 0,6$ мм) (б); в) вид Cu после «предварительного» ИПДК $n = 10$ (образец «б») и последующего совместного ИПДК половин с $n = 0,25$ (в); з) вид Cu после «предварительного» ИПДК $n = 10$ (канавка $h = 0,6$ мм), последующей резки на половины и совместного ИПДК половин с $n = 0,25$ на бойках с канавкой $h = 0,4$ мм (з)

Fig. 2. View of samples – Cu disc halves after joint HPT for $n = 0.25$ (a); view of Cu samples after HPT for $n = 10$ and cutting into halves (groove $h = 0.6$ mm) (b); v) view of Cu after «preliminary» HPT for $n = 10$ (sample «b») and subsequent joint HPT of halves with $n = 0.25$ (v); z) view of Cu after «preliminary» HPT for $n = 10$ (groove $h = 0.6$ mm), subsequent cutting into halves and joint HPT of halves with $n = 0.25$ on anvils with groove $h = 0.4$ mm (z)

Опыт В. Цельный медный диск на первом этапе подвергался ИПДК $n = 10$ на бойках с канавкой глубиной 0,6 мм, полученный диск разрезался на две половины. Полученные половины снова совместно укладывались на бойки с канавкой с меньшей глубиной, равной $h = 0,4$ мм, и подвергались совместному ИПДК с числом оборотов $n = 0,25$. Вид половин (рис. 1, з) свидетельствует, что деформация кручением близка к ожидаемой, проскальзывание незначительно.

Таблица 1. Значения проскальзывания Λ , микротвердости HV и высоты h образцов Cu при различных режимах ИПДК

Table 1. Values of slippage Λ , microhardness HV and height h of the Cu samples under different HPT regimes

Состояние / State	Λ , %	HV	h
Cu исход. / Initial Cu		107	1,2
ИПДК $n = 0,25$ / HPT $n = 0,25$	$>5^*$	133	1
ИПДК $n = 10$ / HPT $n = 0,25$	85	137	0,84

*При $n = 0,25$ значение проскальзывание мало, и его величину сложно точно определить. Погрешность определения HV $\pm 6\%$.

*At $n = 0.25$ the slippage value is small and difficult to determine precisely. The HV measurement error is $\pm 6\%$.

Деформация «кручением» при ИПДК реализуется, если напряжение трения $\tau_{тр}$ между поверхностью образца и поверхностью бойка больше предела текучести (YS) материала:

$$\tau_{тр} > YS,$$

$$\tau_{тр} = P \cdot \mu.$$

Напряжение трения $\tau_{тр} = P\mu$ (3), где P – давление, а μ – коэффициент трения, который для пары медь-сталь (материал бойков) составляет 0,3. Давление $P = U/S$, где U – усилие прессы, а S – площадь, к которой приложено U . За S (как и другие исследователи) принимаем площадь канавки бойка $3,2 \text{ см}^2$ (при диаметре канавки $d = 2 \text{ см}$) [3]. Усилие

пресса составляло $U = 200$ тонн, отсюда расчетное давление $P = 6 \text{ ГПа}$.

Однако из чертежа бойка видно (рис. 3), что площадь контакта боек – образец больше площади канавки бойка. Диаметр зоны, на которую однозначно приходит давление, составляет 2,6 см (рис. 3), а площадь зоны составляет $5,4 \text{ см}^2$, соответственно при усилении прессы 200 т давление на эту площадь составляет $P \approx 3,7 \text{ ГПа}$. Отсюда в нашем случае при ИПДК Cu $\tau_{тр} \approx 1,1 \text{ ГПа}$. Предел текучести исходной (отожженной меди) составляет около 0,3 ГПа, σ_t меди после обработки ИПДК составляет около 0,5 ГПа [1]. Отсюда $\tau_{тр}$ больше, чем σ_t Cu даже после ИПДК с $n > 10$. И, как можно видеть из эксперимента, на начальных стадиях ИПДК Cu эффект проскальзывания был не столь значителен.

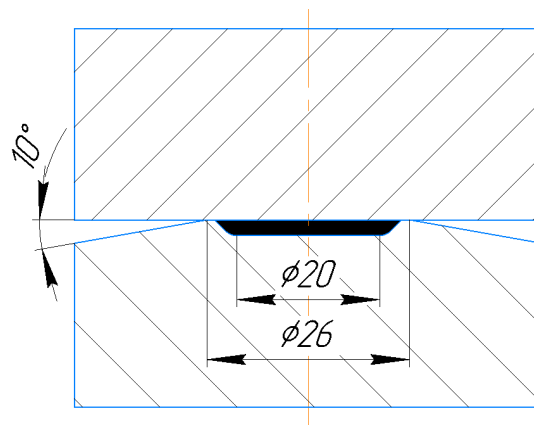


Рис. 3. Эскизы бойков, используемых на установке ИПДК

Fig. 3. Sketches of the anvils used in the HPT facility

Однако эффект проскальзывания при ИПДК Cu становится более существенным после предварительного ИПДК с $n = 10$ (85%). Нарастание Λ при ИПДК с ростом n до 10 нельзя объяснить все большим упрочнением образца Cu. Прирост HV и, соответственно, σ_t при увеличении n от 0,25 до 10 незначителен (табл. 1). Отсюда рост Λ с ростом n до 10 можно объяснить уменьшением высоты h образца в процессе ИПДК (табл. 1). При увеличении n происходит вытекание материала образца из-под бойков, фак-

тически из очага деформации, и при $n = 10$ h уменьшается до 0,84 мм, что практически равно глубине канавки (с учетом того, что и верхний «плоский» боек имеет «лунку» – углубление из-за износа в процессе ИПДК). При $n = 10$ объем материала – высота образца – в зоне приложения давления становится меньше некоторой необходимой критической h_n , и большая часть усилия U приходится на зону буртика – кольцо с плоской поверхности вокруг канавки, а давление P непосредственно на образец в канавке становится меньше некоторого P_k критического, и проскальзывание становится тотальным ($\Lambda = 85\%$). Верность данного предположения подтверждает «опыт В», когда после ИПДК $n = 10$ на бойках с канавкой глубиной 0,6 мм половины полученного образца подвергались совместному ИПДК на бойках с $h = 0,4$ мм и проскальзывание практически отсутствовало.

Выводы

Исследован эффект проскальзывания образцов Cu при интенсивной пластической деформации кручением. Для оценки эффекта проскальзывания использовался метод «совместного кручения половин диска». Показано, что для Cu при ИПДК на начальных стадиях ($n = 0,25$) проскальзывание незначительно. Однако эффект проскальзывания при ИПДК Cu становится практически тотальным (85%) после предварительного ИПДК с $n = 10$. Но если на первом этапе образец Cu подвергался ИПДК $n = 10$ на бойках с канавкой глубиной 0,6 мм, а затем совместному ИПДК с $n = 0,25$ на бойках с канавкой 0,4 м, то деформация кручением на втором этапе близка к ожидаемой, проскальзывание незначительно. Отсюда рост Λ с ростом n до 10 можно объяснить уменьшением высоты h образца с увеличением количества оборотов n , поскольку с увеличением n происходит вытекание материала образца из-под бойков из зоны очага деформации и при $n = 10$ высота образца становится менее необходимой критической.

Благодарности / Acknowledgments

Работы поддержаны проектом РНФ 22-19-00347.

This research was supported by the Russian Science Foundation under project No. 22-19-00347.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhilyaev, A.P.; Langdon, T.G. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Prog. Mater. Sci.* 2008, 53, 893–979. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.03.002>.
2. Valiev, R.Z.; Zhilyaev, A.P.; Langdon, T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. In *Bulk Nanostructured Materials*; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2013.
3. Edalati, K.; Horita, Z. A review on high-pressure torsion (ИПДК) from 1935 to 1988. *Mater. Sci. Eng. A* 2016, 652, 325–352. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.074>.
4. Bridgman, P.W. Effects of High Shearing Stress Combined with High Hydrostatic Pressure. *Phys. Rev.* 1935, 48, 825–847. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.48.825>.
5. Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Пилюгин В.П., Гундырев В.М. и др. Формирование аморфной структуры в никелиде титана при пластической деформации. // *ФММ*. 2005. Т.99. С. 90-100.
6. Вячеслав Викторович Титов, Дмитрий Валерьевич Гундеров, Софья Дмитриева Гундерова, Альфред Васинович Шарафутдинов, Василий Владимирович Астанин Распределение полос сдвига на поверхности деформированных образцов аморфных сплавов на основе Zr Том 4 № 1 (7) (2022): *Materials. Technologies. Design*
7. Sergueeva A.V., Song C., Valiev R.Z., Mukherjee A.K. Structure and properties of amorphous and nanocrystalline NiTi prepared by severe plastic deformation and annealing // *Mater. Sci. Eng. A*. 2003. V. 339. P. 159-165.
8. Edalati, K.; Horita, Z.; Langdon, T.G. The significance of slippage in processing by high-pressure torsion. *Scr. Mater.* 2009, 60, 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.08.042>.
9. Kuhlmann-Wilsdorf, D.; Cai, B.; Nelson, R. Plastic flow between Bridgman anvils under high pressures. *J. Mater. Res.* 1991, 6, 2547–2564. <https://doi.org/10.1557/jmr.1991.2547>.
10. Vorhauer, A.; Pippan, R. On the homogeneity of deformation by high pressure torsion. *Scr. Mater.* 2004, 51, 921–925.

11. Adachi, N.; Todaka, Y.; Yokoyama, Y.; Umemoto, M. Cause of hardening and softening in the bulk glassy alloy Zr₅₀Cu₄₀Al₁₀ after high-pressure torsion. *Mater. Sci. Eng. A* 2015, 627, 171–181.
12. Kovács Z, Schaffler E, Szommer P and Révész Á 2014 Localization of plastic deformation along shear bands in Vitreloy bulk metallic glass during high pressure torsion *J. of Alloys and Compounds* 593 207–212 doi:10.1016/j.jallcom.2014.01.079
13. Dmowski W, Yokoyama Y, Chuang A, Ren Y, Umemoto M, Tsuchiya K, Inoue A and Egami T 2010 Structural rejuvenation in a bulk metallic glass induced by severe plastic deformation *Acta Materialia* 58 429–38 doi:10.1016/j.actamat.2009.09.021
14. Gunderov, D.; Churakova, A.; Boltynjuk, E.; Ubyivovk, E.; Astanin, V.; Asfandiyarov, R.; Valiev, R.; Xioang, W.; Wang, J. Observation of shear bands in the Vitreloy metallic glass subjected to ИПДК processing. *J. Alloys Compd.* 2019, 800, 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.043>.
15. D V Gunderov, Vas V Astanin, A V Sharafutdinov and Jatin Bhatt Slippage during high-pressure torsion processing of Vitreloy 105 bulk metallic glass *Journal of Physics: Conference Series: 1967* (2021) 012062 doi:10.1088/1742-6596/1967/1/012062
16. Gunderov, D., Asfandiyarov, R., Titov, V., Gunderova, S., Astanin, Some Slippage Issues in High-Pressure Torsion Using Cu and Ti Samples as an Example *V. Materials*, 2023, 16(1), 162 <https://doi.org/10.3390/ma160101621>.
17. Gunderov, D.V.; Asfandiyarov, R.N.; Astanin, V.V.; Sharafutdinov, A.V. Slippage during High-Pressure Torsion: Accumulative High-Pressure Torsion—Overview of the Latest Results. *Metals* 2023, 13, 1340. <https://doi.org/10.3390/met13081340>
18. Gunderov, D.; Asfandiyarov, R.; Raab, G.; Churakova, A.; Astanin, V. Method for slippage evaluation at various stages of high-pressure torsion and its application to Fe-0.1 %C. *Lett. Mater.* 2021, 11, 416–421. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-4-416-421>.
19. Beygelzimer, Y.; Estrin, Y.; Kulagin, R. Some Unresolved Problems of High-Pressure Torsion. *Mater. Trans.* 2023, 2023 Volume 64 Issue 8 Pages 1856–1865
20. Gunderov, D.; Churakova, A.; Astanin, V.; Asfandiyarov, R.; Hahn, H.; Valiev, R. Accumulative ИПДК of Zr-based bulk metallic glasses. *Mater. Lett.* 2019, 261, 127000. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127000>.
21. Gunderov, D.; Stotskiy, A.; Lebedev, Y.; Mukaeva, V. Influence of ИПДК and Accumulative High-Pressure Torsion on the Structure and Hv of a Zirconium Alloy. *Metals* 2021, 11, 573. <https://doi.org/10.3390/met11040573>.