

РАЗДЕЛ 2. МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 539.3

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.009

ОЦЕНКА ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ ОБРАЗЦА ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРУЧЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ ВЫРЕЗОВ И МАРКЕРОВ

Дмитрий Валерьевич Гундеров^{1,2}, Рашид Наилевич Асфандияров^{1,2},
Альфред Васимович Шарафутдинов^{2,3}, Гузель Ихсановна Заманова^{2,4},
Диана Юрьевна Пашали^{2,5}, Диана Ильдаровна Атангулова^{2,6}

¹Институт физики молекул и кристаллов Уфимского федерального исследовательского центра РАН, 450075 Уфа, проспект Октября 151

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Уфимский университет науки и технологий, 450076 Уфа, ул. Заки Валиди, 32

¹dimagun@mail.ru ORCID 0000-0001-5925-4513

²a.r.n@list.ru, ORCID 0000-0002-5522-4314

³shar-alfred@list.ru ORCID 0009-0001-3198-0342

⁴scissorhands10@yandex.com

⁵dipashali@mail.ru ORCID 0009-0003-8886-6975

⁶atangulovadi@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается эффект проскальзывания при интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) образцов титана марки Grade-4 с использованием общепринятых методик нанесения маркеров, а также выреза о образце. На начальном этапе ИПДК (угол поворота бойков $\varphi_t = 36^\circ$) проскальзывание (Λ), оценённое по сдвигу маркеров составило 35%. В образец Ti после предварительного ИПДК $n \approx 2,5$ был сделан врез, куда вставлена медная вставка, и затем образец подвергнут ИПДК с $\varphi_t = 54^\circ$. Сдвиг тела медной вставки оказался значительно меньше ожидаемого, и по основному объёму образца проскальзывание составило $\Lambda = 96\%$. Однако в верхнем правом углу медной вставки отчетливо виден захваченный при кручении «язык» меди толщиной около 15 мкм, растёкшийся по поверхности Ti. Это может свидетельствовать, что при ИПДК течение происходит преимущественно в локальной зоне контакта «боек-поверхность образца». Можно предположить, что локализация сдвига на поверхности искажает результаты оценки проскальзывания «методом нанесения маркеров на поверхность образцов перед ИПДК». Это объясняет разницу в величине проскальзывания, фиксируемого по маркеру на поверхности, и «методом выреза в образце» (или «методом совместного ИПДК двух половин диска»).

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация кручением, проскальзывание, титан.

Для цитирования: Гундеров Д.В., Асфандияров Р.Н., Шарафутдинов А.В., Заманова Г.И., Пашали Д.Ю., Атангулова Д.И. Оценка проскальзывания образца при интенсивной пластической деформации кручением с помощью вырезов и маркеров // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 4. С. 469-476. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.009.

Original article

EVALUATION OF SPECIMEN SLIPPAGE UNDER HIGH PRESSURE TORSION USING NOTCHES AND MARKERS

Dmitry D. Gunderov^{1,2}, Rashid N. Asfandiyarov^{1,2}, Alfred V. Sharafutdinov², Guzel I. Zamanova², Diana Y. Pashali², Diana I. Atangulova²¹Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 151 Oktyabr'ya Avenue, 450075, Ufa, Russia²Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St., 450076, Ufa, Russia¹dimagun@mail.ru ORCID 0000-0001-5925-4513²a.r.n@list.ru, ORCID 0000-0002-5522-4314³shar-alfred@list.ru ORCID 0009-0001-3198-0342⁴scissorhands10@yandex.com⁵dipashali@mail.ru ORCID 0009-0003-8886-6975⁶atangulovadi@gmail.com

Abstract. The paper considers the effect of slippage under high-pressure torsion (HPT) of Grade-4 titanium specimens using conventional marker application techniques and a cutout in the specimen. At the initial stage of HPT (striker rotation angle $\varphi_t = 36^\circ$), the slippage estimated from the marker shift was $\Lambda = 35\%$. A cutout was made in the Ti specimen after preliminary HPT $n \approx 2,5$, into $\varphi_t = 54^\circ$. The shift of the copper insert body was significantly less than expected, and over the main volume of the specimen, the slippage was $\Lambda = 96\%$. However, in the upper right corner of the copper insert, a copper “tongue” of about $15 \mu\text{m}$ thick, captured during torsion, is clearly visible, spreading over the Ti surface. This may indicate that during HPT, the flow occurs predominantly in the local “striker-sample surface” contact zone. It can be assumed that the localization of the slip on the surface distorts the results of the slip assessment by the “method of applying markers to the surface of the samples before HPT”. This explains the difference in the slip value recorded by the marker on the surface and by the “method of cutting in the sample” (or “method of joint HPT of two disk halves”).

Keywords: High pressure torsion, slippage, titanium.

For citation: Gunderov D.D., Asfandiyarov R.N., Sharafutdinov A.V., Zamanova G.I., Pashali D.Y. & Atangulova D.I. (2025). Evaluation of specimen slippage under high pressure torsion using notches and markers. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(4), 469-476. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.009.

Введение

В настоящее время для получения экспериментальных образцов, подвергнутых максимально большим степеням деформации, активно применяется интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК, она же кручение под высоким давлением), [1–4]. ИПДК металлов и сплавов, как правило, приводит к измельчению структуры до нанокристаллического (НК) размера зерна [1–6], необычным фазовым превращениям. В некоторых сплавах при ИПДК происходит аморфизация [2,3]. В аморфных сплавах при воздействии ИПДК происходит трансформация аморфной структуры [4]. Тематике ИПДК посвящены тысячи статей и ряд обзоров, в частности [2–4].

Ожидаемую (теоретическую) степень деформации сдвигом γ_t при ИПДК вычисляется по формуле (1):

$$\gamma = \frac{2\pi r n}{h},$$

где n — число оборотов, h — толщина образца, r — радиус от центра образца-диска до расчетной точки [2].

ИПДК реализуется, если при вращении бойков касательное напряжение (τ_{fr}), обусловленное трением бойка по поверхности образца, превышает предел текучести материала при сдвиге τ_y . В ряде случаев [5–7], реально достигаемая деформация (определяемая экспериментально прямыми методами) γ_{exp} при ИПДК не соответствует расчётной, что связано с эффектом «проскальзывания» — когда вращающийся боек скользит по поверхности образца.

В работе [7] маркеры были нанесены на верхнюю и нижнюю поверхности образцов Fe, Al, Cu и по их сдвигу было оценено проскальзывание при ИПДК. При ИПДК при давлении (P) = 5 ГПа, числе оборотов $n=0,25$ проскальзывание бойков по поверхности образцов Al и Cu

отсутствует [7]. При ИПДК образцов Fe при тех же условиях наблюдалось проскальзывание около 10 %, и только при уменьшении скорости вращения бойков (V) с 1 об/мин до 0,5 об/мин проскальзывание на Fe не фиксировалось. Однако проскальзывание на Fe не оценивалось для ИПДК с n больше 0,25. И исследования в [7] проводились на высокочистых мягких металлах: Al (99,99%), Cu (99,99%) и Fe (99,96%). Предыдущих работ, где бы прямыми методами оценивалось проскальзывание при КВД с относительно большим числом оборотов ($n \geq 1$) более прочных материалов – Fe технической чистоты, сталей, Ti технической чистоты, сплавов Ti и т.д. практически отсутствуют.

В [5-6] показано, что при ИПДК образцов объёмных металлических стёкол (ОМС) с τ_y выше 1000 МПа реальная деформация γ_{real} на один – два порядка ниже расчетной – результат полного проскальзывания. Однако, несмотря на это, структура ОМС в результате ИПДК существенно трансформируется [5-6], как это показано и в других работах по тематике ИПДК ОМС (обзор [4]).

В работах [8-11], нами был использован предложенный в [6] «метод совместного ИПДК двух половин диска» для оценки проскальзывания. По изменению формы двух половин, подвергнутых «совместному ИПДК», оценивалось реальная степень деформации сдвига γ_{exp} , и соответственно величина проскальзывания [10]:

$$\Lambda = (\gamma_t - \gamma_{exp}) / \gamma_t \cdot 100\%, \quad (2)$$

где γ_t – ожидаемая степень деформации, рассчитанная по формуле 1.

Наши исследования показали, что в случае материалов с относительно невысоким исходным τ_y (Cu, Al) на начальных стадиях ИПДК (n до 5) Λ незначительно. Например, при ИПДК Cu, ($\tau_t = 70$ МПа) с $n = 0,25$ проскальзывание $\Lambda \approx 5\%$ [11]. Однако, если образец Cu предварительно подвергался ИПДК с $n = 10$, то при последующем ИПДК с $n = 0,25$ Λ составило 80 % [11]. Установлено, что рост Λ после предварительного ИПДК обусловлен уменьшением толщины образца ниже некоторой критической [12]. На материалах с более высоким значением τ_y , таких как сталь 10 (Fe-0,1 %C), Ti Grade-4, сплавы Ti, Ti-Ni, сплав Zr-1% Nb, ОМС, значительное Λ наблюдается уже на начальных ИПДК ($n = 0,25$) [8-11]. После предварительного ИПДК с $n = 5$ проскальзывание становится полным – $\Lambda > 95\%$ [9-11]. Это вызвано как упрочнением материалов при предварительном ИПДК, так и уменьшением h ниже критической, [9,11]. Однако структура выбранных материалов в результате ИПДК измельчалась до нанокристаллической [8,9], также, как это наблюдалось в других работах по ИПДК по-

добных материалов [1-3]. Отсюда измельчение структуры до нанокристаллической не является доказательством отсутствия проскальзывания при ИПДК. В работе [13] зафиксировано определённое проскальзывание при ИПДК TiN. В работе [14] на основе математического моделирования также показано, что при достижении некоторого критического n деформация кручением не реализуется.

В [8] была предложена модель, объясняющая увеличение степени деформации в образце при ИПДК в условиях полного проскальзывания. Также для достижения высоких степеней деформации предложен и используется новый метод – аккумулирующая интенсивная пластическая деформация кручением (АК ИПДК) [15,16]. Отмечено, что проскальзывание влияет на рельеф поверхности образцов после ИПДК [17].

У специалистов по ИПДК возникают вопросы к используемой нами схеме «совместного ИПДК двух половин диска» для оценки проскальзывания, ранее предложенной в [6]. Высказываются предположения, что при «совместном ИПДК двух половин диска» накопление деформации происходит по другим закономерностям, чем при обычном ИПДК целого диска. В связи с этим в данной работе для оценки проскальзывания нами был использован традиционный метод нанесения маркеров и рисок на нижнюю и верхнюю поверхности образца перед ИПДК [7].

Материалы и методики эксперимента

Для оценки проскальзывания в данной работе использовалась установка ИПДК, находящаяся в УУНиТ (ранее УГАТУ), г. Уфа. Нижний боек имел канавку диаметром 10 мм, глубиной 0,5 мм. Верхний боек был плоский. Обработку ИПДК проводили при комнатной температуре и расчетном давлении $P = 6$ ГПа. Давление рассчитывалось как $P = U/S$, где U – сила, а S – площадь, к которой приложена сила. За S , как и в других подобных работах [2,3] принимали площадь канавки. Исходный образец технически чистого титана (Grade-4) имел форму диска диаметром 10 мм и высотой 1,1 мм.

Результаты

В эксперименте I на нижнюю и верхнюю поверхности исходных дисков через центр наносились маркером полоски черного цвета. Фото исходных образцов с маркерами представлены на рис. 1а. Затем образец подвергнут ИПДК на угол $\phi_t = 36^\circ$ ($n = 0,1$). После ИПДК

$\varphi_t = 36^\circ$ маркеры размываются, но удалось восстановить их местоположение. Далее маркеры нанесены повторно и маркером нанесены точки выхода маркера с противоположной стороны, чтоб определить смещение по фото. Из полученных экспериментально углов относительно сдвига маркеров φ_{exp} получен параметр проскальзывания $\Lambda(\%)$:

$$\Lambda = (\varphi_t - \varphi_{\text{exp}}) / \varphi_t * 100 \%, \quad (3)$$

где φ_t – угол кручения, заданный установкой, (формула 3 аналогична формуле 2). При ИПДК с $\varphi_t = 36^\circ$ реальный угол смещения маркеров φ_{exp} составил 23° (Рис 1б), соответственно проскальзывание составило около 35 %, что можно считать незначительным.

Эксперимент II. Образец Ti был первоначально подвергнут ИПДК с $n=2,5$. В получившийся образец титана электроэрозией была сделана прорезь шириной 0,5 мм от края до центра диска. В прорезь образца с натягом была закреплена медная пластинка, геометрически подобная прорези (Рис. 2а). Также на образец были нанесены маркеры: на нижнюю и верхнюю стороны.

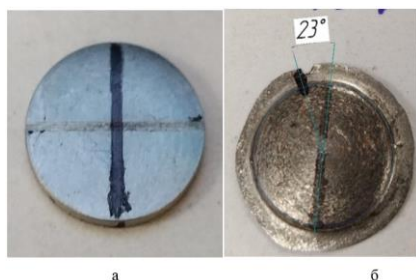


Рис. 1. а) исходные диски Ti, с нанесёнными на поверхности рисками и перпендикулярными им маркерами; б) эксперимент I, образец Ti после ИПДК на $\varphi_t = 36^\circ$

Fig. 1. a) original Ti disks with marks applied to the surface and markers perpendicular to them; b) experiment I, Ti sample after HPT at $\varphi_t = 36^\circ$

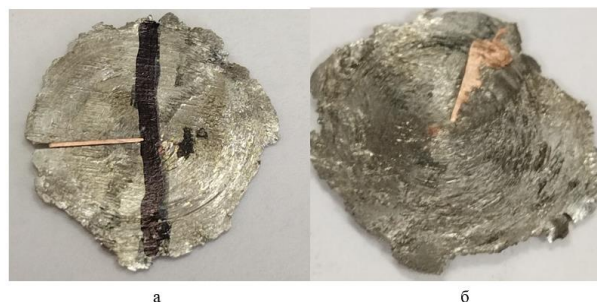


Рис. 2. Вид образца Ti, эксперимент II: а) образец “перед экспериментом III” - после предварительного ИПДК $n=2,5$ со вставкой Cu и маркером; б) этот же образец со вставкой Cu после дополнительного ИПДК $\varphi_t = 54^\circ$, верхняя сторона

Fig. 2. View of the Ti sample, experiment II: a) sample “before experiment III” - after preliminary HPT $n=2.5$ with a Cu insert and a marker; b) the same sample with a Cu insert after additional HPT $\varphi_t = 54^\circ$, top side

На рис. 2б представлена фотография образца Ti (*эксперимент III*) после предварительного ИПДК с $n \approx 2,4$, со вставкой Cu, и дополнительного ИПДК с $\varphi_t = 54^\circ$. Маркеры полностью стерлись. Можно видеть, что после ИПДК $\varphi_t = 54^\circ$ медь «растеклась» по верхней и нижней поверхностям, согласно повороту бойков. Однако растекшийся по поверхности слой меди очень тонкий. После эксперимента II торец диска в области медной вставки был срезан с отступом в 1 мм от края и отшлифован в струбцине. Полученные фото с торца представлены на рис. 3.

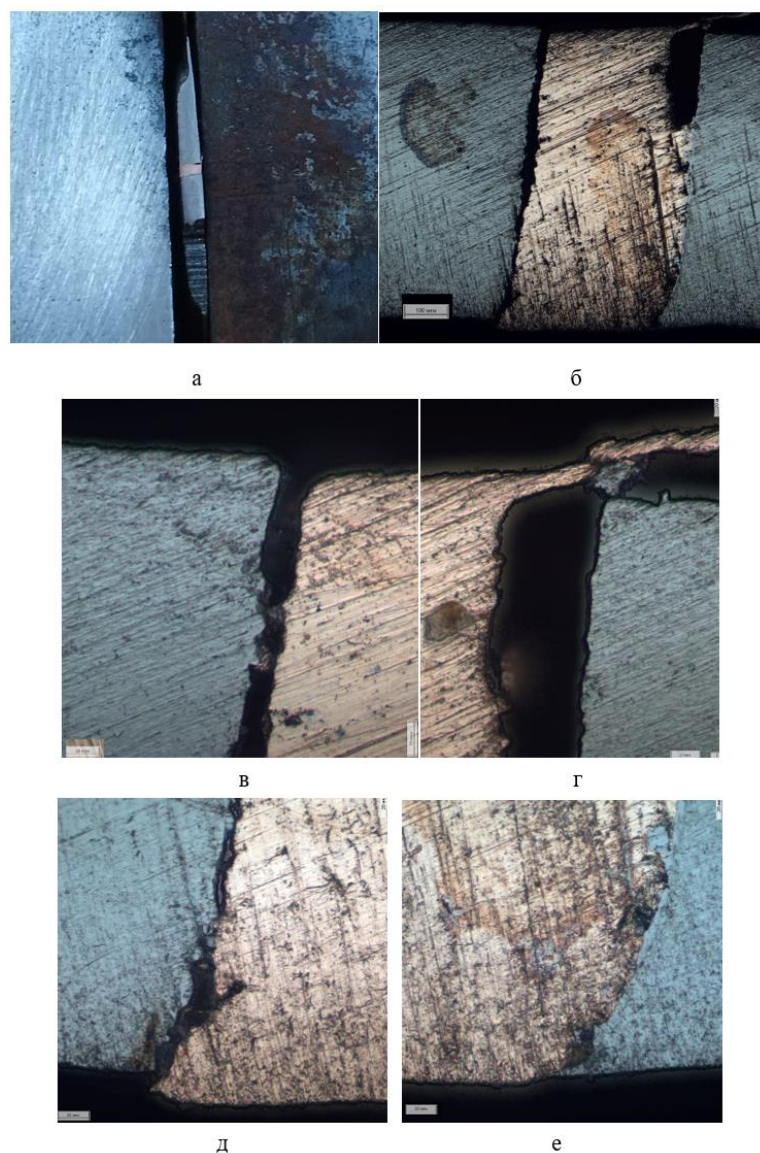


Рис. 3. Образец Ti после эксперимента II со вставкой Cu ИПДК с $\varphi_t = 54^\circ$, «торец» после шлифовки: а) фото образца в струбцине; б) фото общего вида медной вставки, оптический микроскоп, увеличение 50; в-е левые и правые, верхние и нижние углы медной вставки с большим увеличением

Fig. 3. Ti sample after experiment II with a Cu insert subjected to IPDC with $\varphi_t = 54^\circ$, “end face” after grinding: а) photo of the sample in a clamp; б) photo of a general view of the copper insert, optical microscope, magnification 50; в) left and right, upper and lower corners of the copper insert at high magnification

Из рис. 3б, видно, что сдвиг тела медной вставки значительно меньше ожидаемого для ИПДК с $\varphi_t = 54^\circ$. Рассчитанная по формуле (1) для данной области диска степень деформации, составила $\gamma_t = 4,2$. Реальная степень деформации, определённая по наклону основного тела медной вставки, составила $\gamma_{\text{exp}} = 0,15$. Таким образом, в эксперименте II по основному объёму

образца Ti проскальзывание составило $\Lambda \approx 95\%$.

Также необходимо обратить внимание на следующее: в верхнем правом углу медной вставки отчетливо виден захваченный при кручении «язык» меди, растёкшийся по поверхности Ti и, затем, отслоившийся (Рис. 3д). Толщина этого «языка» меди около 15 мкм. Этот «язык Cu» видно на поверхности на рис. 2б, и он создаёт впечатление заметной деформации

Ti в эксперименте II, если ориентироваться на сдвиг меди по поверхности, тогда как деформация образца Ti «по сдвигу тела медной вставки (Рис. 3б)» в 30 раз меньше теоретически ожидаемой. Интересна картина, наблюдаемая в нижнем левом и правом углах образца (Рис. 3д,е). Можно видеть, что степень искривления и, соответственно, сдвига на границе «медная вставка – Ti» увеличивается с приближением к нижней поверхности образца. Это означает градиентное увеличение степени деформации сдвигом с приближением к нижней поверхности образца. В самом нижнем углу (Рис. 4е) также виден «язык» титана, начальной толщиной около 15 мкм и длиной 20 мкм, показывающий приповерхностное течение Ti при кручении нижнего бойка. Полученные результаты свидетельствуют, что при ИПДК, возможно, наиболее существенный сдвиг происходит в контактной зоне «боек-поверхность образца» толщиной порядка 10-20 мкм. Отметим, что при оценке проскальзывания методом «совместного кручения двух половин диска» нами было зафиксировано значительно более сильное проскальзывание на Ti уже на начальных стадиях ИПДК – до 90 – 95 % [16,17].

Выводы

В данной работе методом нанесения маркеров и врезов в образец оценивалось проскальзывание при ИПДК титана. Небольшое проскальзывание $\Lambda \approx 35\%$ зафиксировано уже на начальных стадиях ИПДК с поворотом бойков на угол $\varphi_t = 36^\circ$. Затем образец Ti был подвергнут предварительному ИПДК $n=2,5$, в полученном образце был сделан врез, куда вставлена медная вставка, и образец подвергнут ИПДК $\varphi_t = 54^\circ$ ($n = 0,15$). Сдвиг тела медной вставки оказался значительно меньше ожидаемого, и по основному объёму образца проскальзывание составило $\Lambda = 96\%$. Однако в верхнем правом углу медной вставки отчетливо виден, захваченный при кручении, «язык» меди, растёкшийся по поверхности Ti, толщиной около 15 мкм. Это показывает, что при ИПДК возможна сильная неоднородность течения материала образца, в результате чего течение происходит преимущественно в локальной зоне контакта «боек-поверхность образца», что искажает результаты оценки проскальзывания «методом нанесения маркеров на поверхность образцов перед ИПДК». Это объясняет разницу

в величине проскальзывания, фиксируемую по маркеру на поверхности, или «методом совместного ИПДК двух половин диска», или методом врезки.

Список литературы

1. Bridgman P.W. Effects of High Shearing Stress Combined with High Hydrostatic Pressure // *Physical Review*. 1935. Vol. 48. P. 825–847. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.48.825>
2. Edalati K., [и др.] Severe plastic deformation for producing superfunctional ultrafine-grained and heterostructured materials: An interdisciplinary review // *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. P. 174667.. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130240>
3. Edalati K., Horita Z. A review on high-pressure torsion (HPT) from 1935 to 1988 // *Mat. Science and Eng: A*. 2016. Vol. 652. P. 325–352. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.074>
4. Gunderov D., Astanin V. INFLUENCE OF HPT DEFORMATION ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF AMORPHOUS ALLOYS *Metals*. 2020. T. 10. № 3. С. 415 10.3390/met10030415
5. Dmowski W., Yokoyama Y., Chuang A., Ren Y., Umemoto M., Tsuchiya K., Inoue A., Egami T. Structural rejuvenation in a bulk metallic glass induced by severe plastic deformation // *Acta Materialia*. 2010. Vol. 58. P. 429–438. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.09.021>
6. Adachi, N.; Todaka, Y.; Yokoyama, Y.; Umemoto, M. Cause of hardening and softening in the bulk glassy alloy Zr50Cu40Al10 after HPT. *Mater. Sci. Eng. A* **2015**, 627, 171–181. [
7. Edalati K., Horita Z., Langdon T.G. The significance of slippage in processing by HPT // *Scripta Materialia*. 2009. Vol. 60. P. 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.08.042>
8. Gunderov D., Asfandiyarov R., Titov V., Gunderova S., Astanin V. Some Slippage Issues in High-Pressure Torsion Using Cu and Ti Samples as an Example // *Materials*. 2023. Vol. 16. No. 1. P. 162. <https://doi.org/10.3390/ma16010162>
9. 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. Vol. 13. No. 8. P. 1340. <https://doi.org/10.3390/met13081340>
10. Gunderov D.V., Asfandiyarov R.N., Raab G.I., Churakova A.A., Astanin V.V. Method for slippage evaluation at various stages of high-pressure torsion and its application to Fe-0.1%C // *Letters on Materials*. 2021. Vol. 11. No. 4. P. 416–421. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-4-416-421>

11. Gunderov D.V., Mavlyutov A.M., Asfandiyarov R.N., Titov V.V., Gunderova S.D. The influence of equipment features on workpiece slippage under high pressure torsion // *Letters on Materials*. 2024. Vol. 14. No. 4 (56). P. 359–364.

12. Гундеров Д.В., Асфандияров Р.Н., Шарафутдинов А.В., Гундерова С.Д. Влияние изменения толщины заготовки на проскальзывание при интенсивной пластической деформации кручением // *Materials. Technologies. Design*. 2024. Т. 6. № 2 (17). С. 67–73

13. Rogachev S., Sundeev R., Khatkevich V. On the possible slippage of a specimen under high-pressure torsion conditions // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. Published online 31 October. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16818-8>

14. Beygelzimer Y., Estrin Y., Davydenko O., Kulagin R. Gripping Prospective of Non-Shear Flows under High-Pressure Torsion // *Materials*. 2023. Vol. 16. No. 2. P. 823. <https://doi.org/10.3390/ma16020823>

15. Gunderov D., Churakova A., Astanin V., Asfandiyarov R., Hahn H., Valiev R. Accumulative HPT of Zr-based BMG // *Mater. Lett.* 2019 Vol. 261. P. 127000. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127000>

16. Kadirov P., Zhukova Y., Gunderov D., Antipina M., Teplyakova T., Tabachkova N., Baranova A., Gunderova S., Pustov Y., Prokoshkin S. Effect of accumulative high-pressure torsion on structure and electrochemical behavior of biodegradable Fe-30Mn-5Si (wt. %) alloy // *Crystals*. 2025. Vol. 15. No. 4. P. 351.

17. Гундеров Д.В., Афанасьев М.О., Шарафутдинов А.В., Гундерова С.Д., Титов В.В., Заманова Г.И., Нафиков Р.К. Особенности рельефа поверхности образцов стали и меди после КВД // *Materials. Technologies. Design*. 2025. Т. 7. № 2(21). DOI: 10.54708/26587572_2025_722150

Информация об авторах

Гундеров Дмитрий Валерьевич зав. Лаборатории физики металлов д.ф.-м.н. в.н.с. Институт физики молекул и кристаллов Уфимского федерального исследовательского центра РАН (ИФМК УФИЦ РАН) 450075 Уфа Проспект Октября 71, +7 9276353744 Профессор (по совместительству) Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32 450076

Рашид Наилевич Асфандияров, с.н.с. лаборатории физики металлов, к.т.н. Институт физики молекул и кристаллов Уфимского феде-

рального исследовательского центра РАН (ИФМК УФИЦ РАН) 450075 Уфа Проспект Октября 71 тел. +7(347) 292-14-17, доцент (по совместительству) Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32 450076

Альфред Васимович Шарафутдинов, инженер Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32 450076 +7 961-042-28-54

Гузель Ихсановна. Заманова, доцент Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди, 32, 450076, Уфа, Россия +7 917 382-50-67

Диана Юрьевна Пашали, доцент Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди, 32, 450076, Уфа, Россия +7 917 345-95-88

Диана Ильдаровна Атангулова студент Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди, 32, 450076, Уфа, Россия +7 961 575-74-59

References

1. Bridgman P.W. Effects of High Shearing Stress Combined with High Hydrostatic Pressure // *Physical Review*. 1935. Vol. 48. P. 825–847. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.48.825>

2. Edalati K., [et al.] Severe plastic deformation for producing superfunctional ultrafine-grained and heterostructured materials: An interdisciplinary review // *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. P. 174667.. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130240>

3. Edalati K., Horita Z. A review on high-pressure torsion (HPT) from 1935 to 1988 // *Mat. Science and Eng: A*. 2016. Vol. 652. P. 325–352. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.074>

4. Gunderov D., Astanin V. INFLUENCE OF HPT DEFORMATION ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF AMORPHOUS ALLOYS *Metals*. 2020. Т. 10. No. 3. P. 415 10.3390/met10030415

5. Dmowski W., Yokoyama Y., Chuang A., Ren Y., Umemoto M., Tsuchiya K., Inoue A., Egami T. Structural rejuvenation in a bulk metallic glass induced by severe plastic deformation // *Acta Materialia*. 2010. Vol. 58. P. 429–438. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.09.021>

6. Adachi, N.; Todaka, Y.; Yokoyama, Y.; Umemoto, M. Cause of hardening and softening in the bulk glassy alloy Zr50Cu40Al10 after HPT. *Mater. Sci. Eng. A* 2015, 627, 171–181. [

7. Edalati K., Horita Z., Langdon T.G. The significance of slippage in processing by HPT // *Scripta Materialia*. 2009. Vol. 60. P. 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.08.042>

8. Gunderov D., Asfandiyarov R., Titov V., Gunderova S., Astanin V. Some Slippage Issues in High-Pressure Torsion Using Cu and Ti Samples as an Example // *Materials*. 2023. Vol. 16.No. 1. P. 162. <https://doi.org/10.3390/ma16010162>
9. 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. Vol. 13.No. 8. P. 1340. <https://doi.org/10.3390/met13081340>
10. Gunderov D.V., Asfandiyarov R.N., Raab G.I., Churakova A.A., Astanin V.V. Method for slippage evaluation at various stages of high-pressure torsion and its application to Fe-0.1%C // *Letters on Materials*. 2021. Vol. 11. No. 4. P. 416–421. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-4-416-421>
11. Gunderov D.V., Mavlyutov A.M., Asfandiyarov R.N., Titov V.V., Gunderova S.D. The influence of equipment features on workpiece slippage under high pressure torsion // *Letters on Materials*. 2024. Vol. 14. No. 4 (56). P. 359–364.
12. Gunderov D.V., Asfandiyarov R.N., Sharafutdinov A.V., Gunderova S.D. Influence of changing workpiece thickness on slippage under severe plastic deformation by torsion // *Materials. Technologies. Design*. 2024. Vol. 6. No. 2 (17). P. 67–73
13. Rogachev S., Sundeev R., Khatkevich V. On the possible slippage of a specimen under high-pressure torsion conditions // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. Published online October 31. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16818-8>
14. Beygelzimer Y., Estrin Y., Davydenko O., Kulagin R. Gripping Prospective of Non-Shear Flows under High-Pressure Torsion // *Materials*. 2023. Vol. 16.No. 2. P. 823. <https://doi.org/10.3390/ma16020823>
15. Gunderov D., Churakova A., Astanin V., Asfandiyarov R., Hahn H., Valiev R. Accumulative HPT of Zr-based BMG // *Mater. Lett.* 2019 Vol. 261. P. 127000. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127000>
16. Kadirov P., Zhukova Y., Gunderov D., Antipina M., Teplyakova T., Tabachkova N., Baranova A., Gunderova S., Pustov Y., Prokoshkin S. Effect of accumulative high-pressure torsion on the structure and electrochemical behavior of biodegradable Fe-30Mn-5Si (wt.%) alloy // *Crystals*. 2025. Vol. 15. No. 4. P. 351.
17. Gunderov D.V., Afanasyev M.O., Sharafutdinov A.V., Gunderova S.D., Titov V.V., Zamanova G.I., Nafikov R.K. Surface relief features of steel and copper samples after high-pressure heating // *Materials. Technologies. Design*. 2025. Vol. 7. No. 2(21). DOI: 10.54708/26587572_2025_722150

Information about the authors

Dmitry Valerievich Gunderov, Head of the Laboratory of Metal Physics, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of Physics of Molecules and Crystals, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IPMC UFRS RAS) 71 Oktyabrya Avenue, Ufa 450075, Russia, +7 9276353744 dimagun@mail.ru

Professor (part-time), Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi Street, Ufa 450076, Russia

Rashid Nailevich Asfandiyarov, Senior Researcher, Laboratory of Metal Physics, Candidate of Technical Sciences, Institute of Physics of Molecules and Crystals, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IPMC UFRS RAS) 71 Oktyabrya Avenue, Ufa 450075, Russia, phone +7(347) 292-14-17, e-mail a.r.n@list.ru

Associate Professor (part-time) Ufa University of Science and Technology, Ufa, Zaki Validi St., 32, 450076

Alfred Vasilovich Sharafutdinov, Engineer Ufa University of Science and Technology, Ufa, Zaki Validi St., 32, 450076 +7 961-042-28-54 shar-alfred@list.ru

Guzel Ikhsanovna Zamanova, Associate Professor Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi St., 32, 450076, Ufa, Russia +7 917 382-50-67 scissorhands10@yandex.com

Diana Yuryevna Pashali, Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi St., 32, 450076, Ufa, Russia +7 917 345-95-88 dipashali@mail.ru

Diana Ildarovna Atangulova, Student, Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi St., 32, 450076, Ufa, Russia +7 961 575-74-59 atangulovadi@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21.11.2025; одобрена после рецензирования 24.11.2025; принята к публикации 01.12.2025.

The article was received by the editorial board on 21 Nov. 2025; approved after reviewing 24 Nov. 2025; accepted for publication 01 Dec. 2025.