

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 539.22

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.008

ОБРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ ПЛАСТИН ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 ПОСЛЕ ГИБКИ ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ ПРУЖИНЕНИЯ

**Моркина Алина Юрьевна^{1†}, Таров Данила Владимирович², Лутфуллин Рамиль Яватович³,
Татаринов Павел Семенович⁴, Бебихов Юрий Владимирович⁵,
Семенов Александр Сергеевич⁶, Корзникова Елена Александровна⁷,
Дмитриев Сергей Владимирович⁸**

^{1,2,7}Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди 32, 450076, Уфа, Россия^{1,3}Институт проблем сверхпластичности металлов, ул. Степана Халтурина 39, 450001, Уфа, Россия^{4,5,6,7}Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова в г. Мирном, ул. Тихонова 5, 678170, Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия^{7,8}Уфимский государственный нефтяной технический университет, ул. Космонавтов 1, 450062, Уфа, Россия^{2,8}Институт физики молекул и кристаллов, Уфимский федеральный исследовательский центр РАН, пр. Октября, 71, 450054, Уфа, Россия¹alinamorkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3989-0376>²tarovdv@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-4539-1248>³lutfullin.ramil@imsp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4638-3206>⁴paveltatarinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7430-8591>⁵bebikhov.yura@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8366-4819>⁶sash-alex@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9940-3915>⁷elena.a.korznikova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5975-4849>⁸dmitriev.sergey.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>

Аннотация. Пружинение титановых сплавов после операции гибки представляет собой серьезную технологическую проблему в авиационной, медицинской и других отраслях промышленности. В данной работе исследована возможность снижения эффекта пружинения пластин из сплава ВТ6 с помощью электроимпульсной обработки после деформации. В отличие от традиционных подходов, требующих энергоемкого нагрева заготовок, предложенная технология предполагает подачу импульсного тока через инструментальную оснастку (матрицу и пуансон), что значительно упрощает процесс. Эксперименты проводились на образцах толщиной 0,77 и 2,1 мм и шириной 4 мм. Импульсный ток подавался от конденсаторной батареи заряженной до 100-180 В, количество импульсов варьировалось от 1 до 10. Результаты показали, что для тонких пластин (0,77 мм) правильно подобранные параметры обработки позволяют полностью устранить пружинение, в то время как для более толстых образцов угол восстановления уменьшается с 107-109,5° до 100°. Микроструктурный анализ методом РЭМ выявил, что снижение пружинения связано с $\alpha \rightarrow \beta$ фазовым превращением в зоне пластической деформации, а также с обогащением поверхностного слоя железом (до 14-16 мас.%) вследствие эрозии стального пуансона. Полученные результаты демонстрируют перспективность электроимпульсной обработки как технологического метода контроля геометрической точности изделий из титановых сплавов, сочетающего в себе подавление пружинения и модификацию химического состава поверхностного слоя материала.

Ключевые слова: гибка, пружинение, титановый сплав ВТ6, обработка импульсным током.

Благодарности: Работа Корзниковой Е.А. выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Уфимского университета науки и технологий (№ 075-03-2024-123/1) Молодежной научно-исследовательской лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях». Работа Моркиной А.Ю. и Дмитриева С.В. выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по программе ПРИОРИТЕТ 2030 Уфимского государственного нефтяного технического университета. Работа Бебихова Ю.В. выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-22-00092.

Для цитирования: Моркина А.Ю., Таров Д.В., Лутфуллин Р.Я., Татаринов П.С., Бебихов Ю.В., Семенов А.С., Корзникова Е.А., Дмитриев С.В. Обработка импульсным током пластин титанового сплава ВТ6 после гибки для ослабления пружинения // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2025. Т. 22, № 3. С. 324-334. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.008.

Original article

PULSE CURRENT TREATMENT OF GRADE 5 TITANIUM PLATES AFTER BENDING TO REDUCE SPRINGBACK EFFECT

**Morkina Alina Y.^{1†}, Tarov Danila V.², Lutfullin Ramil Ya.³, Tatarinov Pavel S.⁴, Bebikhov Yuri V.⁵,
Semenov Alexander S.⁶, Korznikova Elena A.⁷, Dmitriev Sergey V.⁸**

^{1,2,7}Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi St. 32, 450076, Ufa, Russia

^{1,3}Institute for Metals Superplasticity Problems, Russian Academy of Sciences, Khalturin St. 39, 450001, Ufa, Russia

^{4,5,6,7}Polytechnic Institute (branch) of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov», Tikhonova St. 5, 678170, Mirny, Russia.

^{7,8}Ufa State Petroleum Technological University, Kosmonavtov St. 1, 450062, Ufa, Russia

^{2,8}Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Centre of RAS, Oktyabrya Pr., 71, Ufa, 450054, Russia

¹alinamorkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3989-0376>

²tarovdv@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-4539-1248>

³lutfullin.ramil@imsp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4638-3206>

⁴paveltatarinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7430-8591>

⁵bebikhov.yura@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8366-4819>

⁶sash-alex@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9940-3915>

⁷elena.a.korzniakova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5975-4849>

⁸dmitriev.sergey.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>

Abstract. Springback in titanium alloys after bending remains a significant technological challenge in aerospace, medical and other industries. This study investigates the possibility of reducing springback in grade 5 titanium alloy plates using post-deformation electropulsing treatment. Unlike conventional approaches requiring workpiece heating, the proposed technology involves applying pulsed current through tooling (die and punch), significantly simplifying the process. Experiments were conducted on samples with thicknesses of 0.77 and 2.1 mm and width of 4 mm at voltages on the capacitor battery of 100-180 V and pulse numbers ranging from 1 to 10. The results demonstrated that for thin plates (0.77 mm), properly selected treatment parameters can completely eliminate springback, while for thicker samples the recovery angle decreases from 107-109.5° to 100°. SEM microstructural analysis revealed that springback reduction is associated with the $\alpha \rightarrow \beta$ phase transformation in the plastic deformation zone, as well as surface layer enrichment with iron (up to 14-16 wt.%) due to steel punch erosion. The obtained results demonstrate the promise of electropulse treatment as a technological method for controlling geometric accuracy of titanium alloy products, combining springback suppression with surface layer chemical modification.

Keywords: springback, bending, grade 5 titanium alloy, current pulse treatment.

Acknowledgements: For Korznikova E.A. this research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the state assignment of the Youth Research Laboratory “Metals and Alloys under Extreme Impacts” of Ufa University of Science and Technology (No. 075-03-2024-123/1). The work of Morkina A.Y. and Dmitriev S.V. was supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation PRIORITY 2030, Ufa State Petroleum Technical University. The work of Bebikhov Yu.V. was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-22-00092.

For citation: Morkina A.Y., Tarov D.V., Lutfullin R.Ya., Tatarinov P.S., Bebikhov Yu.V., Semenov A.S., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. (2025). Pulse current treatment of grade 5 titanium plates after bending to reduce springback effect. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(3), 324-334. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.008.

Введение

Титановый сплав ВТ6 широко применяется в различных областях, таких как авиация, ме-

дицина, химическая промышленность и многих других, благодаря своим уникальным механическим и коррозионным свойствам. Однако у него есть и существенные недостатки, один из

которых заключается в том, что этот сплав трудно поддается формовке и пружинит при низкотемпературной формовке. Пружинение — это явление частичного упругого восстановления формы материалов, которое происходит после снятия приложенных нагрузок при формовке листового металла, что приводит к отклонениям от заданной геометрии заготовки [1]. На пружинение металла влияет множество факторов, среди которых, в частности, свойства самого материала [2], технологические параметры пресс-формы и заготовки [3], а также конструкция инструмента [4].

В титановых сплавах пружинение проявляется достаточно сильно даже при небольших деформациях из-за высокого модуля упругости и низкой пластичности при комнатной температуре. В настоящее время существуют различные способы предотвращения пружинения после формовки. Горячая формовка титанового сплава TC4 с повышением начальной температуры листа с 750°C до 900°C, как было показано, значительно уменьшает угол пружинения [5]. Ударная гидроформовка при высоких скоростях деформации значительно снижает упругость относительно обычного изгиба с растяжением. Взаимодействие между жидкостью и титановым листом изменяет траекторию деформации, перемещая предпочтительную область деформации из середины в концы листа [6].

Электростимулированная обработка металлов также является перспективным подходом в настоящее время. Существуют различные области применения импульсного тока, основными из которых являются: улучшение механических свойств материалов за счет усовершенствования структуры [7], повышение коррозионной стойкости [8], залечивание трещин [9], электропластическая деформация [10,11] и предотвращение пружинения [12].

В магниевых сплавах, в частности AZ31B, формообразование с применением электрического тока продемонстрировало очевидные преимущества. Импульсный ток во время постепенной формовки улучшил однородность толщины и уменьшил пружинение [12]. V-образная гибка под действием тока привела к снижению упругого восстановления и повышению пластичности за счет локализованного нагрева и движения дислокаций [13]. Ли и другие [14] сообщили о снижении пружинения до 40% с помощью импульсов, подаваемых на

вершину пуансона, а Кси и другие [14] связали эти эффекты с релаксацией напряжений и релаксацией микроструктуры. Формирование магнитных импульсов также показало свою эффективность в уменьшении пружинения [16].

В алюминиевых сплавах электрические импульсы уменьшают пружинение за счет изменения внутренних напряжений и улучшения микроструктуры. При V-образной гибке сплава AA2024 различные режимы импульсного тока значительно уменьшили пружинение и улучшили структуру зерен [17]. При инкрементной формовке сплава 2024-T3 локальное применение тока минимизировало эффект пружинения при получении сложных геометрических форм [18].

Титановые сплавы значительно выигрывают от формообразования с применением электрического тока за счет ярко выраженного эффекта пружинения. В сплаве Ti-6Al-4V пружинение уменьшилось более чем на 35% в зависимости от направления тока и зоны деформации [19]. Электростимулированная формовка крупнокристаллического Ti показала улучшение пластичности за счет теплового расширения и подавления динамического деформационного старения [20]. При U-образной гибке импульсные токи вызывали локальное размягчение и микроструктурное измельчение, снижая упругое восстановление [21].

Целью данной работы является исследование влияния импульсов тока на эффект пружинения титанового сплава BT6 после гибки. В отличие от существующих исследований, ток подается не непосредственно на образец, а на матрицу и пуансон, что является более технологичным методом.

Материал и методика эксперимента

В данном исследовании в качестве образцов использовались пластины из титанового сплава марки BT6, химический состав которого приведен в таблице 1. Для эксперимента были выбраны пластины следующих размеров: 50×4×0,77, 50×3×2,1 и 50×4×2,1 мм³. В дальнейшем эти пластины будут называться образцами А, Б и В соответственно. Таким образом, было исследовано влияние толщины и ширины пластины на эффект пружинения.

Таблица 1. Химический состав (масс. %) титанового сплава марки ВТ6.

Table 1. Chemical composition (wt. %) of grade 5 titanium alloy.

Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
Fe	<0.6	Al	5.3-6.8
C	<0.1	Zr	<0.3
Si	<0.1	O	<0.2
V	3.5 -5.3	N	<0.015
N	<0.05	примеси	0.3
Ti	86.45-90.9		

Для изучения влияния электрического тока на пружинение титановых пластин после гибки используется установка, показанная на рис. 1. Образец 1 помещается на V-образную матрицу 4 с углом 90° и радиусом кривизны $R=5$ мм. Пуансон 3 вдавливает образец в матрицу под действием силы, показанной стрелкой. Для тонких образцов А усилие вдавливания составляет 130 Н, а для более толстых образцов Б и В - 460 Н. Приложенного усилия достаточно, чтобы образец под нагрузкой принял форму матрицы, то есть изогнулся под углом 90° с радиусом кривизны 5 мм.

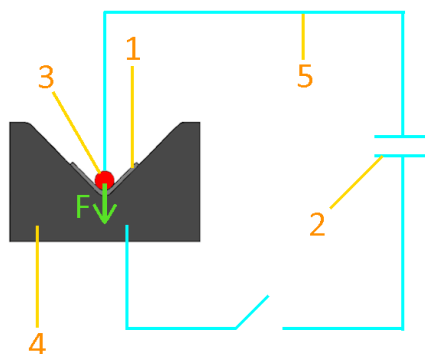


Рис. 1. Схематическое изображение оснастки для гибки пластин с использованием импульсного тока: 1 - образец, 2 - конденсаторная батарея, 3 - пуансон, 4 - матрица, 5 - электрическая цепь. Стрелка показывает приложенную силу.

Fig. 1. Schematic representation of the tooling for plate bending using pulsed current: 1 - specimen, 2 - capacitor bank, 3 - punch, 4 - die, 5 - electrical circuit. Arrow indicates the force applied.

После снятия нагрузки образец отпружинивает назад на угол, превышающий 90° , что является эффектом пружинения. Для уменьше-

ния этого эффекта в зону пластической деформации образца подается одиночный импульс тока в соответствии со схемой, показанной на рис. 1. На рис. 2 представлен пример профиля импульса тока, длительность которого составляет 1,5 мс. В нагруженном состоянии через образец разряжается конденсаторная батарея емкостью 25 мФ, заряженная до определенного напряжения V в диапазоне 130-300 В с плотностью тока 1,8-4,2 кА/мм². Количество разрядов конденсатора варьируются.

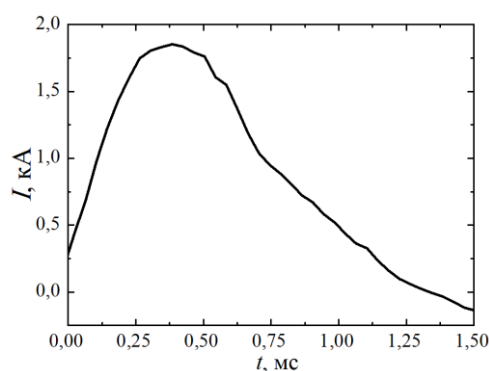


Рис. 2. Пример профиля импульса тока.

Fig. 2. Example of a pulse current profile.

После того как образец подвергнут воздействию импульсов тока он извлекается из матрицы, после чего угол изгиба измеряется с помощью транспортира, как показано на рис. 3.

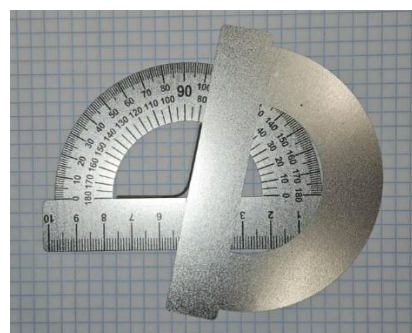


Рис. 3. Измерение угла изгиба образца.

Fig. 3. Measurement of the bending angle of the specimen.

Для исследования микроструктуры на растровом электронном микроскопе (РЭМ) образцы были разрезаны по длине на станке с ЧПУ ARTA-120. Затем на водостойкой абразивной бумаге были подготовлены поверхности с последовательным переходом к более мелко-

му абразиву. Полировка осуществлялась с помощью суспензии на полировальной салфетке. Оптический контраст на образцах получали травлением в растворе электролита (16% HNO_3 , 16% HF , 68% $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$). Изображения микроstructures были получены на РЭМ JSM-6490LV (JEOL, Япония) с ускоряющим напряжением 20 кВ, оснащенный приставкой для энергодисперсионной спектроскопии Oxford INCAEnergy (Oxford Instrument, Англия).

Результаты

На рис. 4 показаны результаты изменения угла деформированных образцов А после снятия нагрузки (а) без тока и (б-д) с током. Количество импульсов тока, пропущенных через образцы, составляло (б) 1, (в) 3, (г) 5 и (д) 10, при напряжении на конденсаторной батарее 130 В. Видно, что с увеличением количества импульсов эффект пружинения уменьшается до почти полного исчезновения.

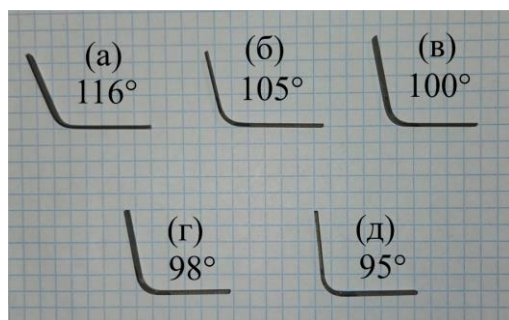


Рис. 4. Примеры образцов А после изгиба (а) без тока, (б-д) после прохождения импульсов тока в количестве (б) 1, (в) 3, (г) 5 и (д) 10 от конденсаторной батареи, заряженной до напряжения 130 В.

Fig. 4. Examples of specimens A after bending (a) without current, (b-e) after passing current pulses in numbers of (b) 1, (c) 3, (d) 5 and (e) 10 from a capacitor bank charged to a voltage of 130 V.

Эксперименты с другими напряжениями конденсаторной батареи были проведены аналогичным образом, и результаты для образцов А показаны на рис. 5. По оси абсцисс отложено количество пропущенных через образец импульсов тока, а по оси ординат - угол изгиба образца.

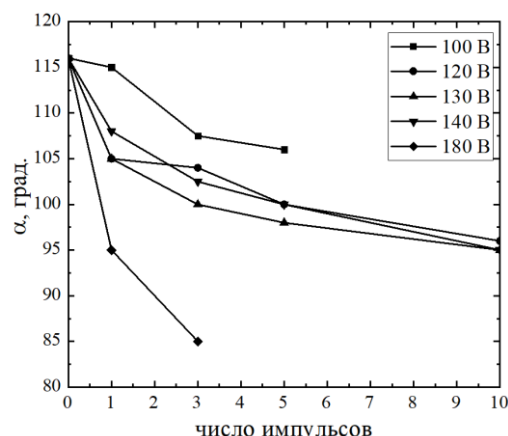


Рис. 5. Изменение угла изгиба α образцов А в зависимости от количества импульсов тока для различных значений напряжения на конденсаторной батарее.

Fig. 5. Variation of the bending angle α of specimens A as a function of the number of current pulses for different values of voltages on the capacitor bank.

Видно, что наблюдавшаяся ранее тенденция к уменьшению угла деформации образца при увеличении количества импульсов сохраняется и при других напряжениях конденсатора. Этот эффект наиболее выражен при максимальном напряжении 180 В, но при количестве импульсов, превышающем 3, образец пробивается искровым разрядом и в нем образуется отверстие. То же самое происходит при напряжении на конденсаторе 140 В, но после прохождения через образец 20 импульсов тока. Можно сделать вывод, что для уменьшения эффекта пружинения без повреждения заготовки важно правильно выбрать параметры тока и количество импульсов.

Тот же эксперимент был проведен для образцов Б и В, и результаты показаны на рис. 6(a) и (b), соответственно. Как видно из сравнения рис. 4 и рис. 6, для более толстых пластин импульсы тока уменьшают эффект пружинения в меньшей степени. В частности, для тонкого образца А эффект пружинения может быть полностью устранен при правильном выборе параметров тока и количества импульсов, а для более толстых образцов Б и В угол изгиба может быть уменьшен с 107° до 100° и с $109,5^\circ$ до 100° , соответственно.

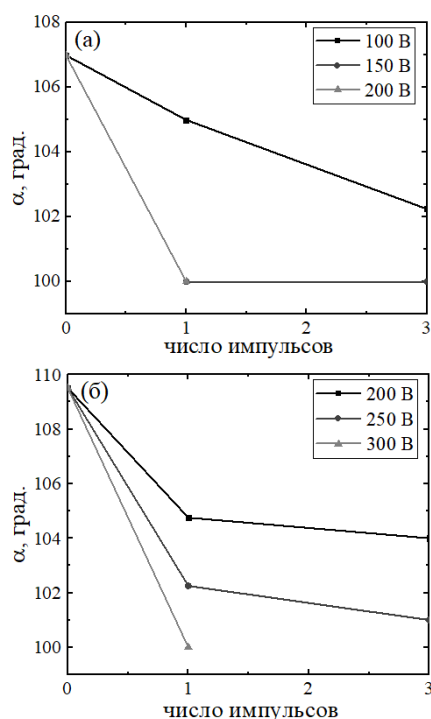


Рис. 6. Изменение угла изгиба α образцов (а) Б и (б) В в зависимости от количества импульсов тока для различных значений напряжения на конденсаторной батарее.

Fig. 6. Variation of the bending angle α of (a) specimens B and (b) specimens C as a function of the number of current pulses for different values of voltages on the capacitor bank.

Сравнение результатов на рис. 6(а) и рис. 6(б) показывает влияние ширины образца на уменьшение эффекта пружинения. Для более широких образцов В угол изгиба после снятия нагрузки без импульсов тока составил $109,5^\circ$, что несколько больше, чем для образца Б, для которого угол изгиба без тока составляет 107° . Однако для обоих образцов удалось уменьшить угол изгиба до 100° с помощью импульсов тока.

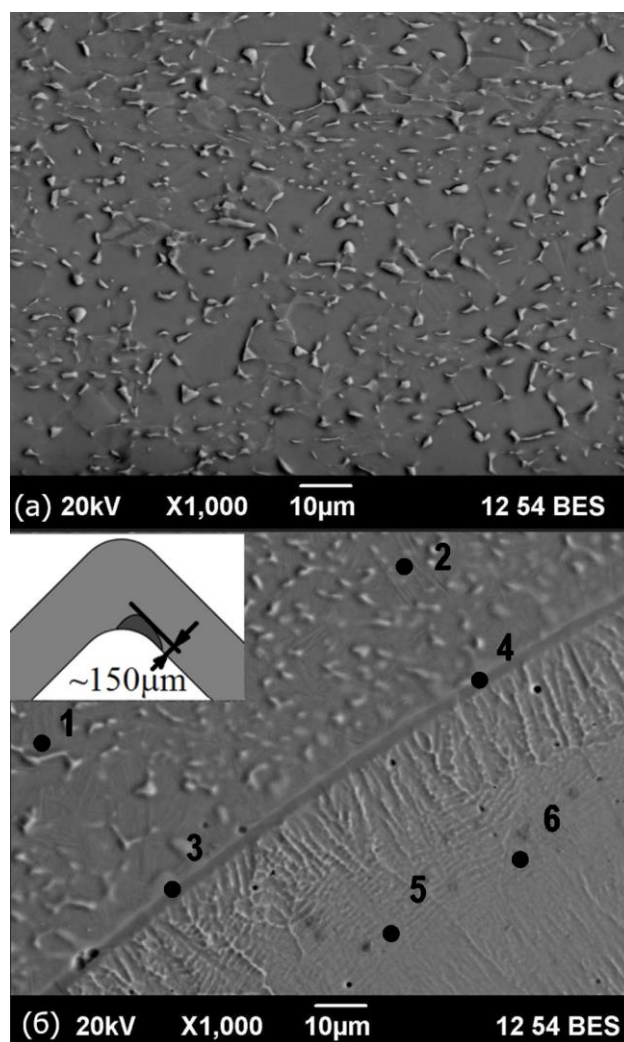


Рис. 7. РЭМ-изображение микроструктуры (а) исходного состояния и (б) границы между зонами, подвергшейся (нижняя) и не подвергшейся (верхняя) температурному воздействию для пластины, подвергнутой электроимпульсной обработке в изогнутом состоянии. На вставке (б) схематически показано расположение зоны температурного воздействия (затенено). Указаны шесть точек, в которых измерен химический состав сплава, см. табл. 2.

Fig. 7. SEM image of the microstructure of (a) the initial state and (b) the boundary between the temperature-affected (lower) and unaffected (upper) zones of the plate subjected to electrical pulse treatment in the bent state. The inset in (b) schematically shows the location of the temperature affected zone (shaded). Six points are indicated for which the chemical composition of the alloy is measured, see Table 2.

Химический состав сплава, измеренный в шести точках, показанных на рис. 7(б), представлен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав (мас. %) сплава в различных точках в области границы между зоной температурного воздействия и зоной, не подверженной воздействию, см. рис. 6.

Table 2. Chemical composition (wt. %) of the alloy at various points in the area of the boundary between the temperature-affected zone and the unaffected zone, see Fig. 6.

Точ- ка	Al	Ti	V	Cr	Fe	Ga	Итого
1	5.5 1	91.6 0	2.8 9	0	0	0	100.0 0
2	5.1 2	87.8 4	6.2 4	0	0.29	0.5 1	100.0 0
3	5.2 8	87.5 1	3.4 9	0	3.73	0	100.0 0
4	5.0 5	83.7 3	3.3 4	0	7.88	0	100.0 0
5	4.7 0	78.7 0	3.8 1	0	12.7 9	0	100.0 0
6	4.2 8	76.3 6	2.9 6	0.3 6	16.0 4	0	100.0 0

Точки 1 и 2 находятся в зоне отсутствия воздействия температуры, точки 5 и 6 - в зоне воздействия температуры, а точки 3 и 4 - на границе между этими зонами. В зоне без воздействия химический состав типичен для исследуемого титанового сплава марки ВТ6, см. табл. 1. С другой стороны, на границе зон и особенно в зоне температурного воздействия наблюдается высокое содержание железа - до 16 %. Очевидно, что это железо поступает из стального пуансона. Эрозия пуансона в зоне контакта с образцами видна невооруженным глазом [22]. Также отметим, что атомы Fe быстро диффундируют в Ti [23] и что железо является бета-стабилизирующим элементом [24].

Обсуждение результатов и выводы

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния импульсов электрического тока на эффект пружинения пластин из титанового сплава марки ВТ6 после гибки в V-образной матрице с углом 90° и радиусом кривизны 5 мм. В отличие от работы [12], где в аналогичном эксперименте ток подавался на торцы образца, в нашей работе ток подается на матрицу и пуансон. Такой подвод тока является технологически более совершенным, так как исключает необходимость прикрепления контактов к образцу перед гибкой и их удаления после электроимпульсной обработки.

Исследовалось влияние толщины и ширины пластины на уменьшение пружинения при импульсной обработке. Для более тонких образцов А эффект пружинения сильнее, чем для более толстых образцов Б и В. Без импульсной обработки угол изгиба после снятия нагрузки для образцов А составляет 116°, тогда как для образцов Б и В он ближе к желаемым 90° и равен 107° и 109,5°, соответственно. Это объясняется тем, что относительная толщина упругого слоя вблизи нейтральной поверхности изгибаемого листа больше для более тонкого листа. Действительно, если предположить, что лист находится в состоянии чистого изгиба без осевого растяжения/сжатия, то деформация в листе составляет

$$\varepsilon(z) = \frac{z}{R}, \quad (1)$$

где z - координата, нормальная к плоскости листа с началом координат на нейтральной поверхности, а R - радиус кривизны листа. Предполагая, что предел упругой деформации равен e_e , упругий слой находится между $\pm z_e = Re_e$, а толщина упругого слоя составляет

$$h_e = 2z_e = 2Re_e \quad (2)$$

В наших экспериментах радиус матрицы составляет 5 мм, а для предельной упругой деформации принимаем $\varepsilon_e = 0,002$. Тогда из уравнения (2) находим толщину упругого слоя $h_e = 0,02$ мм. Для образцов А упругий слой составляет 2,6% от его толщины, а для образцов Б и В - только 0,95%. Отметим, что наличие упругого слоя вблизи нейтральной плоскости изгибаемых пластин является лишь одним из источников эффекта пружинения [25].

Было установлено, что для более тонких образцов А эффект пружинения может быть практически полностью устранен путем правильного выбора параметров тока и количества импульсов, см. рис. 5. Для более толстых образцов Б и В эффект пружинения уменьшается в меньшей степени под действием импульсного тока, см. рис. 6.

Основной причиной снижения эффекта пружинения после обработки импульсным током является эволюция микроструктуры сплава, которая наблюдается в зоне воздействия джоулева тепла, см. рис. 7. В зоне без температурного воздействия домены β -фазы присутствуют в матрице α -фазы, т.е. исходная микроструктура сохраняется. В зоне температурного воздействия крупные домены β -фазы образуются в результате α - β фазового перехода, по-

этому можно предполагать, что температура нагрева зоны контакта должна составлять минимум 1010 °С. На рис. 6(б) в зоне температурного воздействия не видно признаков плавления.

Важно отметить, что химический состав сплава существенно изменяется под воздействием импульсной обработки в зоне температурного воздействия и не изменяется в зоне отсутствия воздействия, см. табл. 2. Зона температурного воздействия обогащена железом до 14-16% по массе. Железо вводится в сплав за счет эрозии стального пуансона, который играет роль электрода. Железо обладает очень высокой диффузионной способностью в титане [23] и является бета-стабилизирующим элементом [24], и эти факты подтверждают утверждение о том, что бета-фаза образуется в зоне температурного влияния.

В целом, эффект пружинения может быть значительно снижен за счет импульсного электрического тока, подаваемого на согнутый лист перед снятием нагрузки. Химическая модификация металла возможна из-за эрозии электродов, что может быть как отрицательным, так и положительным эффектом.

Список литературы

1. Li W., Attallah M. M., Essa K. Heat-assisted incremental sheet forming for high-strength materials — a review // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Т. 124. – С. 2011–2036.
2. Rizlan M., Abdullah A. B., Hussain Z. Springback study of aluminium and steel joint TWBs by FE analysis // *Proceedings of the International Conference on Advanced Materials Processing*. – 2022. – С. 89–96.
3. Tejyan S., Kumar N., Ravi R. K., Singh V., Gangil B. Analysis of spring back effect for AA6061 alloy sheet using finite element analysis // *Materials Today: Proceedings*. – 2024.
4. Le Thai H., Vu D. T., Doan P., Le P. K. T. Effect of springback in DP980 advanced high strength steel on product precision in bending process // *Acta Metallurgica Slovaca*. – 2019. – Т. 25, № 3. – С. 150–157.
5. Yang X.-M., Dang L.-M., Wang Y.-Q., Zuo D.-W., Zhou J. Springback prediction of TC4 titanium alloy V-bending under hot stamping condition // *Journal of Central South University*. – 2020. – Т. 27. – С. 2578–2591.
6. Li H., Xu Y., Chen S.-F., Song H.-W., Zhang S. H. Springback inhibition of Ti-6Al-4V sheet with impact hydroforming at room temperature // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2022. – Т. 1238. – С. 012076.
7. Ying G., Yang W., Wang W., Zeng J. Effect of electropulsing treatment on the precipitation behavior of MnS in sulfur-containing microalloyed 49MnVS3 steel // *Metallurgical Research & Technology*. – 2023. – Т. 120. – С. 317.
8. Yan X., Xu X., Wu C., Zhao Y., Li D., Zhou Y., Wu Z., Wei L. A novel electropulsing treatment to improve the surface strength and repair the pore of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Т. 458. – С. 129364.
9. Kukudzhanov K., Khalikova G., Korznikova E., Chentsov A., Dmitriev S. Healing of Long Fatigue Cracks in Steel Plates by High-Density Current Pulses // *Mechanics of Solids*. – 2024. – Т. 59. – С. 3223–3234.
10. Morkina A., Tarov D., Khalikova G., Semenov A., Tatarinov P., Yakushev I., Dmitriev S. Comparison of the effect of electroplasticity in copper and aluminum // *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*. – 2024. – Т. 22. – С. 615–632.
11. Dmitriev S. V., Morkina A. Y., Tarov D. V., Khalikova G. R., Abdullina D. U., Tatarinov P. S., Tatarinov V. P., Semenov A. S., Naimark O. B., Khokhlov A. V., Stolyarov V. V. Effect of Repetitive High-Density Current Pulses on Plastic Deformation of Copper Wires under Stepwise Loading // *Spectrum Mechanical Engineering and Operational Research*. – 2024. – Т. 1, № 1. – С. 27–43.
12. Lozares J., Otegi N., Trinidad J., Barrenetxea M., Aizpuru I., Jimbert P., Mendiguren J. AA5754 aluminium alloy springback reduction by post forming electro plastic effect (PFEPE) // *Mechanics of Materials*. – 2024. – Т. 198. – С. 105136.
13. Chu X.-R., Wang L., Lin S.-X., Yue Z.-M., Gao J. Experimental Investigation on Formability of AZ31B Magnesium Alloy V-Bending Under Pulse Current // *Acta Metallurgica Sinica*. – 2018. – Т. 31. – С. 123–134.
14. Lee J., Bong H. J., Lee Y.-S., Kim D., Lee M.-G. Pulsed Electric Current V-Bending Springback of AZ31B // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2019. – Т. 50. – С. 1234–1245.
15. Xie H., Dong X., Peng F., Wang Q., Liu K., Wang X., Chen F. Investigation on the electrically-

assisted stress relaxation of AZ31B magnesium alloy sheet // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. – Т. 231. – С. 123–135.

16. Cui X., Zhang Z., Du Z., Yu H., Qiu D., Cheng Y., Xiao X. Inverse bending and springback-control using magnetic pulse forming // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2020. – Т. 275. – С. 116374.

17. Mohammadtabar N., Bakhshi-Jooybari M., Gorji H., Jamaati R., Szpunar J. A. Effect of Electric Current Pulse Type on Springback, Microstructure, Texture, and Mechanical Properties During V-Bending of AA2024 Aluminum Alloy // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2021. – Т. 143. – С. 021003.

18. Ruszkiewicz B. J., Roth J. T., Johnson D. H. Locally Applied Direct Electric Current's Effect on Springback of 2024-T3 Aluminum After Single Point Incremental Forming // *ASME MSEC*. – 2015. – Т. 2. – С. V002T04A001.

19. Shivaprasad C., Subrahmanyam A., Reddy N. V. Effect of electric path in electric pulse aided V-bending of Ti-6Al4V: An experimental and numerical study // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2023. – Т. 100. – С. 75–84.

20. Lee T., Magargee J., Ng M. K., Cao J. Constitutive analysis of electrically-assisted tensile deformation of CP-Ti based on non-uniform thermal expansion, plastic softening and dynamic strain aging // *International Journal of Plasticity*. – 2017. – Т. 94. – С. 44–56.

21. Zhao Y., Peng L., Lai X. Influence of the electric pulse on springback during stretch U-bending of Ti6Al4V titanium alloy sheets // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2018. – Т. 261. – С. 12–23.

22. Bonnen J. J. F., Golovashchenko S. F., Dawson S. A., Mamutov A. V. Electrode erosion observed in electrohydraulic discharges used in pulsed sheet metal forming // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2013. – Т. 22, № 12. – С. 3946–3958.

33. Nakajima H., Koiwa M. Diffusion in titanium // *ISIJ International*. – 1991. – Т. 31, № 8. – С. 757–766.

23. Chaithanya Kumar K. N., Suresh K. S. Effect of alloying (V, Fe, Ge) additions on microstructural evolution in Ti-6Al-4V-based alloys after hot rolling and annealing // *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*. – 2025. – Т. 9. – С. 100176.

24. Lal R. K., Choubey V. K., Dwivedi J. P., Kumar S. Study of factors affecting springback in

sheet metal forming and deep drawing process // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Т. 5, № 2. – С. 4353–4358.

25. Vrsalović L., Čatipović N., Gudić S., Kožuh S. Beneficial effect of Cu content and austempering parameters on the hardness and corrosion properties of austempered ductile iron (ADI) // *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*. – 2022. – Т. 23, № 1. – С. 33–47.

Информация об авторах

А.Ю. Моркина – младший научный сотрудник молодежной лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» Уфимского университета науки и технологий, аспирант Института проблем сверхпластичности металлов РАН

Д.В. Таров – инженер-исследователь молодежной лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» Уфимского университета науки и технологий

Р.Я. Лутфуллин – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

П.С. Татаринов – старший преподаватель кафедры Электроэнергетики и автоматизация промышленного производства МПТИ (филиал) СВФУ

Ю.В. Бебихов – доктор физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой Электроэнергетики и автоматизация промышленного производства МПТИ (филиал) СВФУ

А.С. Семенов – доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры Электроэнергетики и автоматизация промышленного производства МПТИ (филиал) СВФУ

Е.А. Корзникова – доктор физ.-мат. наук, заведующая молодежной лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» Уфимского университета науки и технологий

С.В. Дмитриев – доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией «Физика конденсированного состояния» института Физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН.

References

1. Li W., Attallah M. M., Essa K. Heat-assisted incremental sheet forming for high-strength materials — a review // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Т. 124. – С. 2011–2036.

2. Rizlan M., Abdullah A. B., Hussain Z. Springback study of aluminium and steel joint TWBs by FE analysis // *Proceedings of the International Conference on Advanced Materials Processing*. – 2022. – C. 89–96.
3. Tejyan S., Kumar N., Ravi R. K., Singh V., Gangil B. Analysis of spring back effect for AA6061 alloy sheet using finite element analysis // *Materials Today: Proceedings*. – 2024.
4. Le Thai H., Vu D. T., Doan P., Le P. K. T. Effect of springback in DP980 advanced high strength steel on product precision in bending process // *Acta Metallurgica Slovaca*. – 2019. – T. 25, № 3. – C. 150–157.
5. Yang X.-M., Dang L.-M., Wang Y.-Q., Zuo D.-W., Zhou J. Springback prediction of TC4 titanium alloy V-bending under hot stamping condition // *Journal of Central South University*. – 2020. – T. 27. – C. 2578–2591.
6. Li H., Xu Y., Chen S.-F., Song H.-W., Zhang S. H. Springback inhibition of Ti-6Al-4V sheet with impact hydroforming at room temperature // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2022. – T. 1238. – C. 012076.
7. Ying G., Yang W., Wang W., Zeng J. Effect of electropulsing treatment on the precipitation behavior of MnS in sulfur-containing microalloyed 49MnVS3 steel // *Metallurgical Research & Technology*. – 2023. – T. 120. – C. 317.
8. Yan X., Xu X., Wu C., Zhao Y., Li D., Zhou Y., Wu Z., Wei L. A novel electropulsing treatment to improve the surface strength and repair the pore of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – T. 458. – C. 129364.
9. Kukudzhanov K., Khalikova G., Korznikova E., Chentsov A., Dmitriev S. Healing of Long Fatigue Cracks in Steel Plates by High-Density Current Pulses // *Mechanics of Solids*. – 2024. – T. 59. – C. 3223–3234.
10. Morkina A., Tarov D., Khalikova G., Semenov A., Tatarinov P., Yakushev I., Dmitriev S. Comparison of the effect of electroplasticity in copper and aluminum // *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*. – 2024. – T. 22. – C. 615–632.
11. Dmitriev S. V., Morkina A. Y., Tarov D. V., Khalikova G. R., Abdullina D. U., Tatarinov P. S., Tatarinov V. P., Semenov A. S., Naimark O. B., Khokhlov A. V., Stolyarov V. V. Effect of Repetitive High-Density Current Pulses on Plastic Deformation of Copper Wires under Stepwise Loading // *Spectrum Mechanical Engineering and Operational Research*. – 2024. – T. 1, № 1. – C. 27–43.
12. Lozares J., Otegi N., Trinidad J., Barrenetxea M., Aizpuru I., Jimbert P., Mendiguren J. AA5754 aluminium alloy springback reduction by post forming electro plastic effect (PFEPE) // *Mechanics of Materials*. – 2024. – T. 198. – C. 105136.
13. Chu X.-R., Wang L., Lin S.-X., Yue Z.-M., Gao J. Experimental Investigation on Formability of AZ31B Magnesium Alloy V-Bending Under Pulse Current // *Acta Metallurgica Sinica*. – 2018. – T. 31. – C. 123–134.
14. Lee J., Bong H. J., Lee Y.-S., Kim D., Lee M.-G. Pulsed Electric Current V-Bending Springback of AZ31B // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2019. – T. 50. – C. 1234–1245.
15. Xie H., Dong X., Peng F., Wang Q., Liu K., Wang X., Chen F. Investigation on the electrically-assisted stress relaxation of AZ31B magnesium alloy sheet // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. – T. 231. – C. 123–135.
16. Cui X., Zhang Z., Du Z., Yu H., Qiu D., Cheng Y., Xiao X. Inverse bending and springback-control using magnetic pulse forming // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2020. – T. 275. – C. 116374.
17. Mohammadtabar N., Bakhshi-Jooybari M., Gorji H., Jamaati R., Szpunar J. A. Effect of Electric Current Pulse Type on Springback, Microstructure, Texture, and Mechanical Properties During V-Bending of AA2024 Aluminum Alloy // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2021. – T. 143. – C. 021003.
18. Ruszkiewicz B. J., Roth J. T., Johnson D. H. Locally Applied Direct Electric Current's Effect on Springback of 2024-T3 Aluminum After Single Point Incremental Forming // *ASME MSEC*. – 2015. – T. 2. – C. V002T04A001.
19. Shivaprasad C., Subrahmanyam A., Reddy N. V. Effect of electric path in electric pulse aided V-bending of Ti-6Al4V: An experimental and numerical study // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2023. – T. 100. – C. 75–84.
20. Lee T., Magargee J., Ng M. K., Cao J. Constitutive analysis of electrically-assisted tensile deformation of CP-Ti based on non-uniform thermal expansion, plastic softening and dynamic strain aging // *International Journal of Plasticity*. – 2017. – T. 94. – C. 44–56.
21. Zhao Y., Peng L., Lai X. Influence of the electric pulse on springback during stretch U-bending

of Ti6Al4V titanium alloy sheets // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2018. – Т. 261. – С. 12–23.

22. Bonnen J. J. F., Golovashchenko S. F., Dawson S. A., Mamutov A. V. Electrode erosion observed in electrohydraulic discharges used in pulsed sheet metal forming // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2013. – Т. 22, № 12. – С. 3946–3958.

33. Nakajima H., Koiwa M. Diffusion in titanium // *ISIJ International*. – 1991. – Т. 31, № 8. – С. 757–766.

23. Chaithanya Kumar K. N., Suresh K. S. Effect of alloying (V, Fe, Ge) additions on microstructural evolution in Ti-6Al-4V-based alloys after hot rolling and annealing // *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*. – 2025. – Т. 9. – С. 100176.

24. Lal R. K., Choubey V. K., Dwivedi J. P., Kumar S. Study of factors affecting springback in sheet metal forming and deep drawing process // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Т. 5, № 2. – С. 4353–4358.

25. Vrsalović L., Čatipović N., Gudić S., Kožuh S. Beneficial effect of Cu content and austempering parameters on the hardness and corrosion properties of austempered ductile iron (ADI) // *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*. – 2022. – Т. 23, № 1. – С. 33–47.

Information about the authors

A.Y. Morkina - Junior Research Associate of the Youth Laboratory "Metals and Alloys under

Extreme Impacts" of the Ufa University of Science and Technology, postgraduate student of Institute for Metals Superplasticity Problems RAS.

D.V. Tarov - Research Engineer of the Fashion Laboratory "Metals and Alloys under Extreme Impacts" of the Ufa University of Science and Technology.

R.Y. Lutfullin - Doctor of Technical Sciences, Principal Scientist of the Institute for Metals Superplasticity Problems of RAS.

P.S. Tatarinov - Senior Lecturer, Department of Electric Power Engineering and Industrial Automation, MPTI (branch) of NEFU.

Yu.V. Bebikhov - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electric Power Engineering and Industrial Automation, MPTI (branch) of NEFU.

A.S. Semenov - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Electric Power Engineering and Industrial Automation of MPTI (branch) of NEFU.

E.A. Korznikova - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Youth Laboratory "Metals and Alloys under Extreme Impacts", Ufa University of Science and Technology.

S.V. Dmitriev - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Laboratory "Solid State Physics" of the Institute of Molecule and Crystal Physics UFRS of RAS.

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

Статья поступила в редакцию 08.08.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was received by the editorial board on 08 Aug. 2025; approved after reviewing 25 Aug. 2025; accepted for publication 01 Sep. 2025.