

Научная статья
Original article

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-11-306-29-35

М. П. Королев, Е. В. Кузьмин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Д. В. Арбатский, Д. С. Жахов, В. А. Тараненко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ СЛОЙ
ПРИ СВАРКЕ ТРЕХСЛОЙНОГО СОЕДИНЕНИЯ VT1-0+A5+AMg6**

Волгоградский государственный технический университет

Автор, ответственный за переписку: Евгений Владимирович Кузьмин (e.v.kuzmin@yandex.ru)

Аннотация: В работе изучалось влияние воздействия ультразвуковых акустических колебаний на промежуточный слой при сварке соединения VT1-0 + A5 + AMg6. Исследована микроструктура соединений и зеренная структура алюминиевой прослойки на границе с титаном. Показано, что воздействие ультразвука способствует протеканию рекристаллизации в алюминии на границе с титаном и образованию рекристаллизованного слоя с размером зерна 0,5-3,5 мкм на глубину более 100 мкм.

Ключевые слова: Сварка взрывом, титан, алюминий, AMg6, ультразвук

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00609, <https://rscf.ru/project/25-29-00609/>

Для цитирования: Королев М. П., Кузьмин Е. В., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Арбатский Д. В., Жахов Д. С., Тараненко В. А. Исследование влияния воздействия ультразвука на промежуточный слой при сварке трехслойного соединения VT1-0+A5+AMg6. Известия ВолгГТУ; 2025; 306(11):29-35. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-29-35>

M. P. Korolev, E. V. Kuzmin, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak, D. V. Arbatsky, D. S. Zhakhov, V. A. Taranenko

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ULTRASOUND ON THE INTERMEDIATE LAYER
DURING WELDING OF A THREE-LAYER JOINT VT1-0+A5+AMg6**

Volgograd State Technical University

The author responsible for the correspondence: Evgeny Vladimirovich Kuzmin (e.v.kuzmin@yandex.ru)

Annotation: The work studied the effect of ultrasonic acoustic vibrations on the intermediate layer during welding of the VT1-0 + A5 + AMg6 joint. The microstructure of the compounds and the grain structure of the aluminum interlayer at the titanium boundary are investigated. It has been shown that the effect of ultrasound promotes the recrystallization in aluminum at the boundary with titanium and the formation of a recrystallized layer with a grain size of 0.5-3.5 microns to a depth of more than 100 microns.

Keywords: Explosion welding, titanium, aluminum, AMg6, ultrasound

Funding: The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation № 25-29-00609, <https://rscf.ru/project/25-29-00609/>

To cite: Korolev M. P., Kuzmin E. V., Kuzmin S. V., Lysak V. I., Arbatsky D. V., Zhakhov D. S., Taranenko V. A. Investigation of the effect of ultrasound on the intermediate layer during welding of a three-layer joint VT1-0+A5+AMg6. Izvestia VSTU; 2025; 306(11):29-35. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-29-35>

Введение

Благодаря высокой удельной прочности, титан и алюминиевые сплавы находят свое применение в высокотехнологичных отраслях промышленности, таких как авиастроение, ракетно-космическая отрасль, судостроение и др.

Сваренные взрывом соединения титана с алюминиево-магниевым сплавом AMg6 применяются в ракетно-космической промышленности для изготовления корпусов антенно-фидерных устройств.

Технология сварки предполагает использование промежуточного слоя из чистого алюминия для соединения между собой сло-

ев титана и алюминиевого сплава. Алюминевый слой выполняет функцию «буфера пластичности» при сварке, обеспечивая достаточный уровень пластической деформации для образования соединения на обеих границах. Этот способ сварки способен обеспечить требуемую прочность и низкую дефектность соединений для большинства применений.

Качество соединений может снижаться вследствие образования дефектов, таких как непровары и оплавленные участки. Наиболее существенные дефекты могут возникать на границе титана с алюминиевым слоем. Если энергия, W_2 затрачиваемая на пластическую деформацию на этой границе окажется слишком большой, то это может привести к формированию оплавленных участков, содержащих интерметаллиды системы Al-Ti. Слишком низкая энергия W_2 может привести к недостаточному уровню пластической деформации, результатом чего могут быть непровары, расслоения и трещины.

Воздействие ультразвуковых колебаний на материал прослойки при сварке взрывом

может способствовать снижению количества дефектов и повышению качества соединений. Ранее было показано, что сварка взрывом с одновременным воздействием ультразвука позволяет повысить качество получаемых соединений и расширить область свариваемости металлов [1].

Целью данной работы являлось исследование влияния воздействия ультразвуковых колебаний при сварке взрывом на алюминиевый слой при сварке трехслойного соединения ВТ1-0 + А5 + АМг6.

Материалы и методы

В качестве основных материалов для сварки использовали титан ВТ1-0, чистый алюминий марки А5 и алюминиевый сплав АМг6.

Схема сборки под сварку показана на рис. 1. В качестве неподвижной пластины выступала пластина АМг6 с габаритными размерами 200x80 мм. Габариты промежуточного алюминиевого слоя и метаемой пластины составляли 240x120 мм и 260x150 мм. Разница в габаритах пластин позволила вынести сварочные зазоры из зоны сварки и

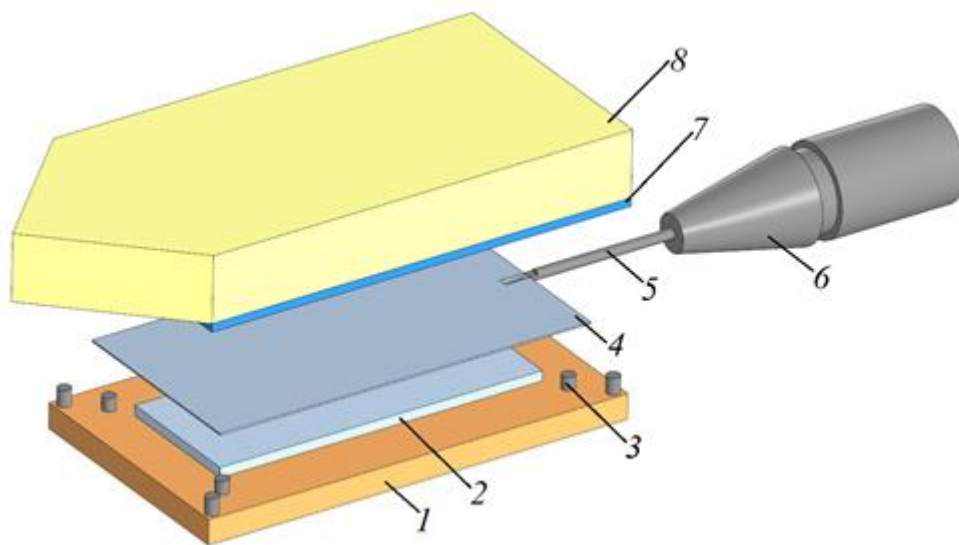


Рис. 1. Схема сборки под сварку с воздействием ультразвука: 1 – основание; 2 – неподвижная пластина АМг6; 3 – сварочный зазор; 4 – прослойка; 5 – волновод; 6 – ультразвуковой преобразователь; 7 – метаемая пластина ВТ1-0; 8 – заряд взрывчатого вещества

установить их на основании, исключив, тем самым, влияние материала зазоров на процесс и результат сварки. Кроме того, такая схема сборки применялась для обеспечения целостности и точности расположения деталей при воздействии ультразвуковых колебаний.

дятся вблизи нижней границы области свариваемости и обеспечивают близкий к минимально необходимому уровню пластической деформации на границе титана с алюминием. Было сварено два образца, один из которых сваривали с применением ультразвуковых колебаний, второй образец служил

Расчетные режимы сварки взрывом

Материалы	Толщины $\delta_1 + \delta_2$, мм	Смесь ВВ, (аммонит/ песок), %	Высота заряда H , мм	Скорость точки контакта V_k , м/с	Сварочный зазор h , мм	Скорость соударения V_c , м/с	Угол соударения γ , °	Энергия пластической деформации W_2 , МДж/м ²
BT1-0+ A5+ AMr6	4+1+5,8	60/40	40	2105	2	439	11,98	0,19
					1	392	10,68	0,57

Ультразвуковые колебания подвели к промежуточному слою из чистого алюминия с противоположной стороны начала процесса детонации. Частота колебаний составляла около 18 кГц, амплитуда перемещения на торце ультразвукового преобразователя ≈ 4 мкм, время воздействия ультразвука перед сваркой составляло около 5 секунд.

Расчетные режимы сварки приведены в таблице. Выбранные режимы сварки нахо-

дятся вблизи нижней границы области свариваемости и обеспечивают близкий к минимально необходимому уровню пластической деформации на границе титана с алюминием.

Результаты и их обсуждение

По результатам механических испытаний прочность соединений лежала в диапазоне 85-90 МПа, а разрушение происходило по прослойке алюминия. Исследование микроструктуры показало, что в обоих соединениях сформировался волновой профиль на границе между алюминиевой прослойкой и слоем АМгб. При сварке с ультразвуком дли-

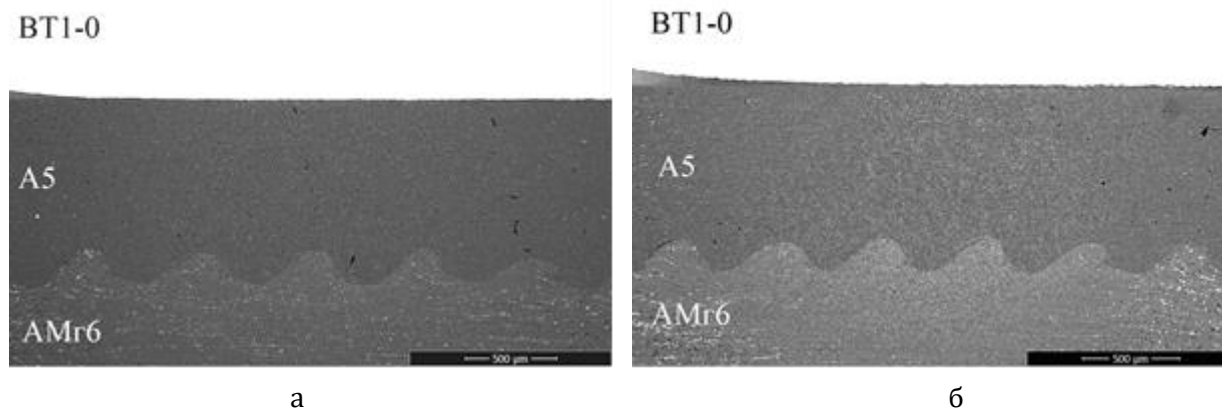


Рис. 2. Общий вид трехслойных соединений BT1-0+A5+AMr6:

а – сварка без ультразвука; б – сварка с ультразвуком

на и размах волнового профиля оказались несколько меньше, чем в контрольном образце. В образце, сваренном с ультразвуком, длина и размах составили 532 и 161 мкм, против 600 и 178 мкм в образце, сваренном без ультразвука. Граница алюминиевого слоя с титаном имела плоскую форму, оплавы или иные дефекты при стандартных увеличениях не обнаруживались.

При помощи метода дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD) было исследовано строение алюминиевой прослойки на границе с титаном. На рис. 3 приведены IPF-карты ориентации зерен алюминия, на которой черными линиями показаны границы зерен с углом разориентации $>10^\circ$ (большеугловые границы). Результаты исследова-

ния показали значительную разницу в структуре алюминия между образцами, сваренными разными способами.

При сварке без ультразвука в структуре алюминия вблизи границы можно выделить области с различным зеренным строением. На расстоянии > 40 мкм от границы с титаном (рис. 3, а), в алюминии сохранились исходные границы зерен, однако накопленные пластические деформации привели к появлению внутри зерен малоугловых границ и увеличению разориентации между субзернами. На расстоянии от 15 до 40 мкм от границы, алюминий имеет волокнистую структуру, образованную удлиненными зернами толщиной до 9 мкм с включениями мелких зерен с размерами около 2 мкм. На границе с

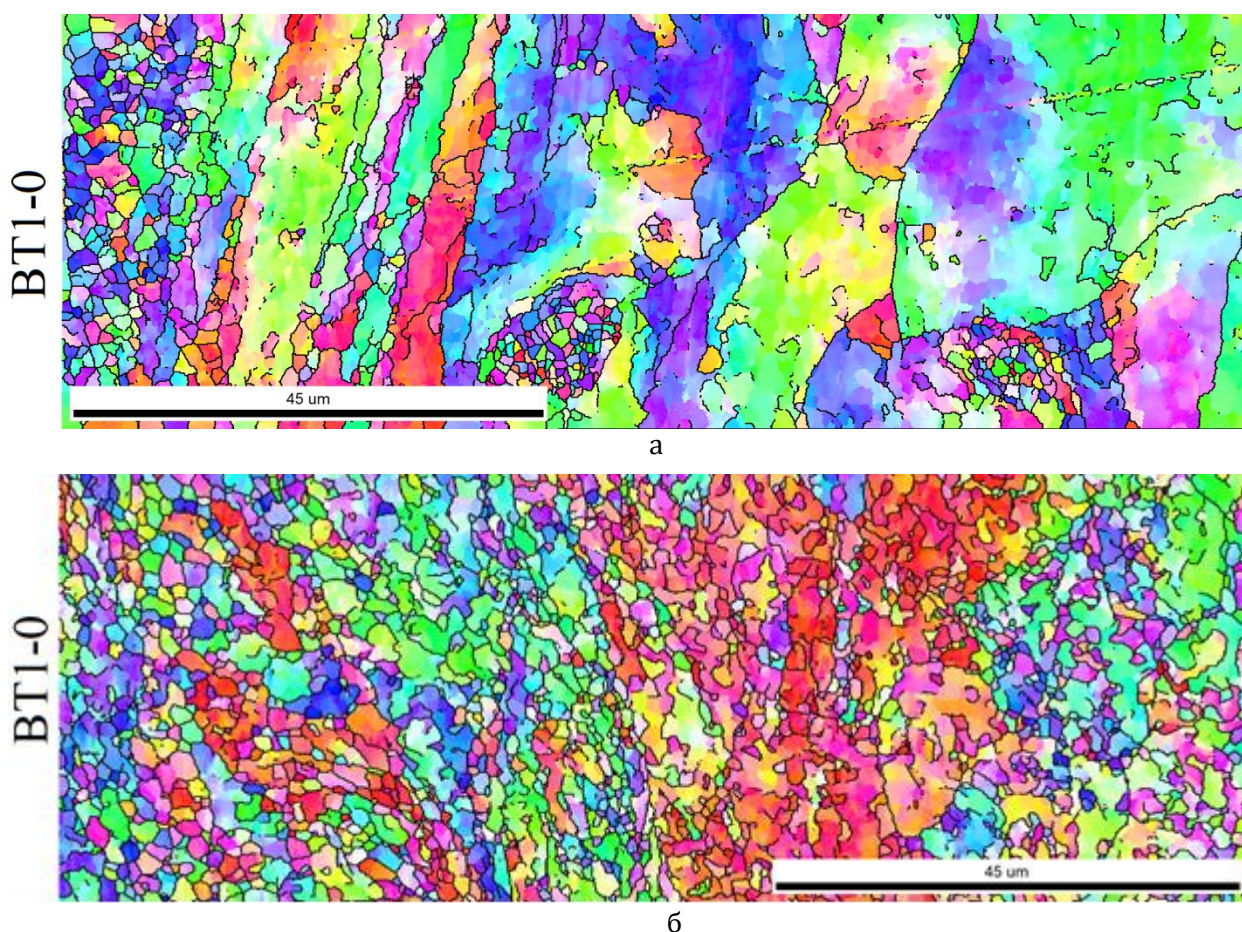


Рис. 3. IPF карты алюминиевого слоя в области на границе с титаном, черной линией показаны границы зерен с углом разориентации $>10^\circ$:
а – сварка без ультразвука; б – сварка с ультразвуком

титаном располагается слой мелкозернистого алюминия толщиной около 10-15 мкм, с размером зёрен 1,5-2,5 мкм. Наиболее вероятно, что образование мелкозернистой структуры стало результатом протекания в этой области динамической рекристаллизации, локальный характер которой был связан с одной стороны – локализованностью пластических деформаций, с другой – той особенностью, что начало протекания динамической рекристаллизации требует достижения критической деформации [2].

При сварке с ультразвуком в структуре алюминия практически не прослеживались очертания исходных зерен или выраженные границы между областями с различным размером или формой зерна (рис. 3, б); вместо этого во всей исследованной области наблюдалась практически однородная структура, состоящая из рекристаллизованных зерен и субзерен с размерами около 0,5-3,5 мкм. По результатам картирования методом ДОЭ, суммарная протяженность границ с углом разориентировки $>10^\circ$ на исследуемом участке при сварке с ультразвуком была в 2 раза больше, чем при сварке без ультразвука и составила 7,43 мм против 3,64 мм в контрольном образце.

Объяснить наблюдаемое измельчение структуры можно эффектами, которые оказывают акустические колебания на дислокационную структуру материала. Ранее многие исследователи уже отмечали, что воздействие ультразвука на металл в процессе деформации способствует измельчению зерна [3 ... 6]. Причина этого эффекта заключается в том, что воздействие ультразвука в процессе пластической деформации приводит к значительному повышению плотности и подвижности дислокаций, что способствует ускоренному протеканию динамической рекристаллизации [3, 4].

При сварке взрывом рекристаллизованные слои могут в некоторых случаях приводить к снижению прочности соединений. Например, в работе [7] было показано, что граница рекристаллизованного слоя АМг6 с металлом, имеющего деформированную структуру, может быть слабым местом всего сваренного взрывом композита. В этой ситуации увеличение толщины рекристаллизованного слоя и исчезновение деформированной структуры под действием ультразвука, которое было получено в чистом алюминии, можно считать положительным эффектом, поскольку рекристаллизация происходит в большем объеме и стирается четкая граница между рекристаллизованным и деформированным слоем.

Библиографический список

1. Особенности формирования медно-алюминиевых соединений при сварке взрывом с воздействием ультразвука / Е. В. Кузьмин, А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. Н. Дородников, А. Е. Сорокин, Е. А. Никулин // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. - Волгоград, 2015. - № 10 (170). - С. 70-78.
2. Горелик, С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С. С. Горелик, С. В. Добаткин, Л. М. Капуткина; под науч. ред. С. С. Горелика. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва : МИСИС, 2005. - (Металлургия и материаловедение XXI века). - 430 с.
3. Wang, Y. Gradient layer of ultrafine equiaxed grains produced by ultrasonic energy accelerated dynamic recrystallization / Y. Wang, Y. Zhu, Z. Kai // Materials Science & Engineering A. - 2020. - Vol. 795(20). - Pp. 139958. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139958>
4. Mechanism of ultrasonic vibration assisted upsetting of 6061 aluminum alloy / M. Y. Cao, H. Hu, X. D. Jia, S. J. Tian, C. C. Zhao, X. B. Han // Journal of Manufacturing Processes. - 2020. - Vol. 59. - P. 690-697. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.070>
5. A comparative study of mechanical and microstructural characteristics of aluminium and titanium undergoing ultrasonic assisted compression testing / H. Zhou, H. Cui, Q. H. Qin, H. Wang, Y. Shen // Materials Science and Engineering: A. - 2017. - Vol. 682. - P. 376-388. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.11.021>
6. Ultrasonic dynamic impact effect on deformation of aluminum during micro-compression tests / J. Hu, T. Shimizu, T. Yoshino, T. Shiratori, M. Yang // Journal of Materials Processing Technology. - 2018. - Vol. 258. - P. 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.021>
7. Структура и свойства соединений титана с алюминиево-магниевыми сплавами, полученных

сваркой взрывом / М. П. Королев, Е. В. Кузьмин, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин, В. О. Харламов // Деформация и разрушение материалов. – 2024. – № 4. – С. 2-9.

Информация об авторах

Михаил Петрович Королев – кандидат технических наук, инженер, старший научный сотрудник кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0002-2430-6384>

e-mail: mihakorolew@mail.ru

Евгений Владимирович Кузьмин – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0002-1037-5186>

e-mail: e.v.kuzmin@yandex.ru

Сергей Викторович Кузьмин – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, первый проректор ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Владимир Ильич Лысак – академик РАН, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Дмитрий Вячеславович Арбатский – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

e-mail: darbatskiy02@yandex.ru

Данил Сергеевич Жахов – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

e-mail: danilzahov2002@gmail.com

Владимир Александрович Тараненко – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

e-mail: vov.taranenko2016@yandex.ru

Information about the authors

Mikhail P. Korolev – Candidate of Technical Sciences, Engineer, Senior Researcher at the Department of Welding Equipment and Technology, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0002-2430-6384>

e-mail: mihakorolew@mail.ru

Evgeny V. Kuzmin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the Department of Welding Equipment and Technology, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0002-1037-5186>

e-mail: e.v.kuzmin@yandex.ru

Sergey V. Kuzmin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Vladimir I. Lysak – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Dmitry V. Arbatsky is a Master's student at Volgograd State Technical University

e-mail: darbatskiy02@yandex.ru

Danil S. Zhakhov is a Master's student at Volgograd State Technical University

e-mail: danilzahov2002@gmail.com

Vladimir A. Taranenko is a Master's student at the Volgograd State Technical University

e-mail: vov.taranenko2016@yandex.ru

Вклад авторов

М. П. Королев – проведение экспериментов, анализ экспериментов, написание текста статьи

Е. В. Кузьмин – определение цели работы, анализ экспериментов

С. В. Кузьмин – анализ и интерпретация полученных данных

В. И. Лысак – участие в обсуждении результатов

Д. В. Арбатский, Д. С. Жахов, В. А. Тараненко – подготовка материалов для проведения исследований

Contribution of the authors

M. P. Korolev – conducting experiments, analyzing experiments, writing articles

E. V. Kuzmin – defining the purpose of the work, analyzing experiments

S. V. Kuzmin – analyzing and interpreting the data

V. I. Lysak – participating in the discussion of the results

D. V. Arbatsky, D. S. Zhakhov, V. A. Taranenko – preparing materials for conducting research the followings

*Статья поступила в редакцию 29.09.2025, доработана 20.10.2025,
подписана в печать 21.11.2025*

*The article was submitted 29.09.2025, revised 20.10.2025,
accepted for publication 21.11.2025*