

Известия вузов. Строительство. 2022. № 6. С. 109–116.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (6): 109–116.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 621.791.011

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-762-6-109-116

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ГЛАВНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

**В.Н. Семькин, Д.А. Свиридов, М.Н. Подоприхин, В.Н. Проценко,  
А.В. Бесько, Н.В. Подзоров**

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

**Аннотация.** Впервые экспериментально восстановлены сваркой на постоянном токе обратной полярности штучными электродами УОНИ 13/55 диаметром 3 мм поля траекторий главных напряжений (они же изостаты, линии тяжения) на участках пластины из стали Ст3 габаритами 150×150×3 мм, соединенной встык с пластиной размером 200×200×3 мм также из стали Ст3. Методика исследований включала нанесение на поверхности пластины координатных сеток, определение в их узлах углов наклона главных площадок физическим неразрушающим магнитоупругим методом с помощью монофазного измерителя ИМН-4М, оборудованного угломерным устройством. На основе полученного массива данных строились поля изостат, сравнивалось их состояние до и после процесса сварки. Анализ картин полей на обеих сторонах контрольной пластины после обработки выстрелами мелкой свинцовой дробью и после сварки показал, что процесс сварки формирует в примыкающей к шву части стыкового соединения классическую зону упругих изостат за счет частичного поглощения площадей, занимаемых до сварки изотропными зонами и зонами извилистых траекторий. После сварки вышеназванные зоны могут сохраняться при существенном сокращении их площадей. Сварка исключает даже частичный возврат к полям, имевшимся в тонкой пластине до и после ее обработки выстрелами. Полученные результаты могут быть основой для управления напряженным состоянием путем создания, где необходимо, напряженных и разгруженных зон, а также их комбинаций в одном изделии.

**Ключевые слова:** сварка, остаточные напряжения, выстрелы свинцовой дробью, магнитоупругий метод, изостаты, изотропные зоны

**Для цитирования:** Семькин В.Н., Свиридов Д.А., Подоприхин М.Н., Проценко В.Н., Бесько А.В., Подзоров Н.В. Восстановление траекторий главных остаточных напряжений // Известия вузов. Строительство. 2022. № 6. С. 109–116. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-762-6-109-116.

Original article

## THE RECOVERY OF THE MAIN RESIDUAL STRESS TRAJECTORIES

V.N. Semykin, D.A. Sviridov, M.N. Podoprikhin, V.N. Protsenko, A.V. Besko,  
N.V. Podzorov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract.** For the first time, the fields of main stress trajectories (i.e. isostats or tension lines) were experimentally recovered on St3 steel plate sections with dimensions of 150x150x3 mm, butt-joined with a St3 steel plate of 200x200x3 mm in size, using welding by DC current of reverse polarity, with the help of UONI 13/55 piece electrodes of 3 mm in diameter. The methodology of research involved applying coordinate grids onto the plate surface, and detecting the inclination angles of main sites in their nodes by the physical, non-destructive magnetoelastic method, using IMN-4M single-phase meter, equipped with a goniometer. Based on the data array obtained, isostatic fields were plotted and their pre-welding state was compared with the one, following the welding process. The comparative analysis of field patterns on both sides of the control plate after being treated with small lead shots and those after welding showed that the welding process forms a classical zone of elastic isostats in the section, adjacent to the butt joint, due to partial absorption of areas, occupied by isotropic and winding trajectory zones prior to welding. After welding, the zones, mentioned above, can be preserved with significant reduction in their area. Welding eliminates even the possibility of partial reversion to the fields, existing in the thin plate before and after its processing by shots. The obtained results are intended to serve as the basis for handling the stress state by creating stressed and unstressed zones, as well as their combinations in one product, when necessary.

**Keywords:** welding, residual stresses, lead shots, magnetoelastic method, isostats, isotropic zones

**For citation:** Semykin V.N., Sviridov D.A., Podoprikhin M.N., Protsenko V.N., Besko A.V., Podzorov N.V. The recovery of the main residual stress trajectories. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; (6): 109–116. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-762-6-109-116.

**Введение.** В 2016 г. воздействием выстрелов свинцовой дробью (ВСД) на сварные стыковые соединения стальных пластин толщиной 6–8 мм впервые удалось получить изотропные зоны (ИЗ) в полях траекторий главных остаточных сварочных напряжений (ОСН) [1–6]. В благоприятных ИЗ уровень напряжений минимален, направления главных площадок хаотичны, а построить траектории (они же линии тяжения, изостаты) нет возможности. Эффект снижения ОСН способом ВСД на 80–90 % проявляется на лицевой стороне пластин, которая непосредственно воспринимает кинетическую энергию зарядов. За счет затухания энергии по толщине снижение уровня ОСН на тыльной (оборотной) стороне составило всего 10–30 %. Низкие ОСН на всю толщину обеспечивали обработкой стыковых образцов выстрелами с обеих сторон. Расход ресурсов при этом удваивался. Для их экономии проверили возможность получения ИЗ на обеих сторонах (а, следовательно, и по всей толщине) тонкой пластины обработкой ВСД только с лицевой стороны. Эксперимент дал положительный результат [7].

**Постановка задачи.** В настоящий момент по доступным источникам нет сведений ни о влиянии технологических процессов на уже сформировавшиеся поля с ИЗ и зонами извилистых траекторий, ни о возможности восстановления упругих изостат в таких зонах. Целью настоящей работы стало исследование воздействия сварки на изотропные зоны и зоны извилистых изостат.

**Методы исследования.** Образец из стали Ст3 (ГОСТ 380–2005) габаритами 150×150×3 мм вырезали гильотинными ножницами НА3121 производства Южно-Уральского механического завода усилием 29 кН. На обе стороны образца наносили координатные сетки с шагом 10×10 мм. В узлах координатной сетки (по 196 с каждой стороны) магнитоупругим методом монофазным измерителем ИМН-4М системы радиоинженера А.Н. Юршина определяли углы наклона касательных к изостатам наибольших главных напряжений. Магнитоупругий датчик прибора оборудован угломерным устройством с погрешностью измерений ±2°. Время на одно измерение 0,5 мин. Полученный массив значений углов позволил построить поля траекторий [8–12]. Для лицевой и тыльной сторон выявили картины полей изостат без ИЗ (рис. 1). Поле лицевой стороны состоит из упругих траекторий, двух изотропных точек замкнутого типа и одной точки – асимптотического типа. В изотропных (сингулярных, ортотропных, нейтральных, особых) точках значения главных напряжений равны, а их направления не определяются. На тыльной стороне в поле упругих изостат четыре точки замкнутого и три – асимптотического типов.

Затем пластину с лицевой стороны обрабатывали тремя выстрелами из ружья двенадцатого калибра на стрелковом полигоне при соблюдении мер безопасности. Использовали патроны с нитропорохом АS и зарядом массой 28 г мелкой дроби № 7,5. Энергия трех выстрелов 1345×3 = 4035 Дж.

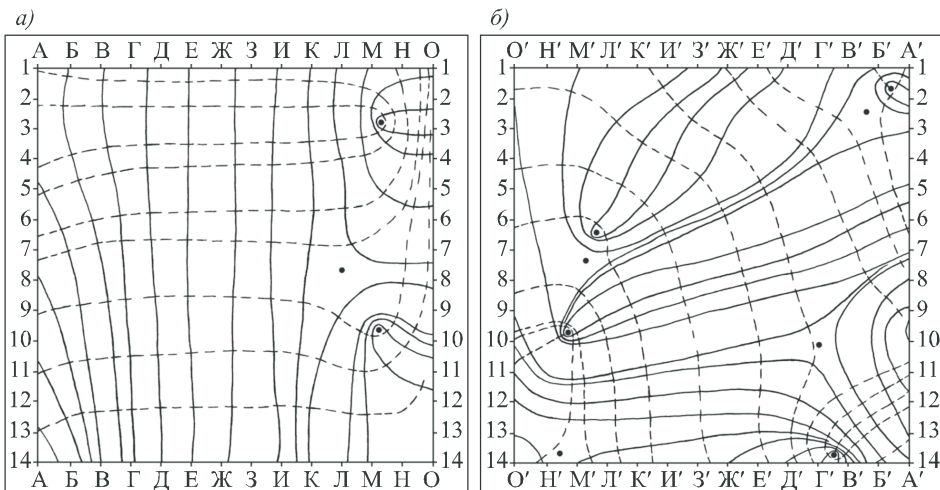


Рис. 1. Изостаты наибольших  $S_{\sigma_1}$  (сплошные линии) и наименьших  $S_{\sigma_2}$  (штриховые линии) напряжений на лицевой (а) и тыльной (б) стороне тонкой стальной пластины до обработки ВСД

Fig. 1. Isostats of the largest  $S_{\sigma_1}$  (solid lines) and the smallest  $S_{\sigma_2}$  (dashed lines) stresses on the front (a) and back (b) sides of a thin steel plate before processing the VSD

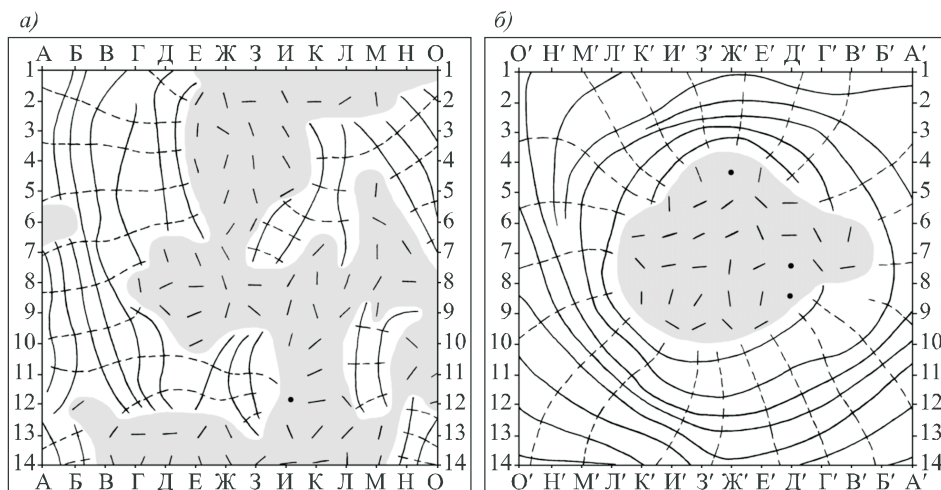


Рис. 2. Изостаты наибольших  $S_{\sigma_1}$  (сплошные линии) и наименьших  $S_{\sigma_2}$  (штриховые линии) напряжений и изотропные зоны (окрашены серым) на лицевой (а) и тыльной (б) стороне тонкой стальной пластины после обработки ВСД лицевой стороны

Fig. 2. Isostats of the largest  $S_{\sigma_1}$  (solid lines) and smallest  $S_{\sigma_2}$  (dashed lines) stresses and isotropic zones (colored gray) on the front (a) and back (b) sides of a thin steel plate after processing the front side of the VSD

С учетом площади пластины, равной  $225 \text{ см}^2$ , удельная кинетическая энергия составила  $18 \text{ Дж/см}^2$ . Пластина не получила повреждений и пластических деформаций.

После повторных измерений во всех узлах координатных сеток вновь построили картины полей (рис. 2).

Воздействие ВСД с удельной энергией  $18 \text{ Дж/см}^2$  лишь на лицевую сторону сформировало ИЗ на обеих сторонах пластины. Отмеченные на рисунках серым цветом ИЗ расположены среди извилистых (волнообразных) траекторий. Наличие последних – свидетельство низкого уровня остаточных напряжений в пластине [4].

На заключительном этапе методика эксперимента включала выявление изостат с помощью измерителя ИМН-4М в стальной пластине толщиной 3 мм после соединения одной ее кромки сварным швом встык с другой пластиной из стали Ст3 размером  $200 \times 200 \times 3 \text{ мм}$ . Сварку производили на керамической подложке штучными электродами диаметром 3 мм на постоянном токе 70–90 А обратной полярности.

**Результаты.** На рис. 3, а представлено поле лицевой стороны, а на рис. 3, б – поле тыльной стороны пластины после сварки. Рассмотрим рис. 3, а в сравнении с рис. 2, а, который отражает картину, имевшуюся до сварки.

Оказалось:

- 1) на лицевой стороне после сварки сформировались упругие изостаты ОСН, распространившиеся от сварного шва на расстояние до 70 мм;
- 2) в поле имеются также изостаты извилистые, две ИЗ и пять изотропных точек;

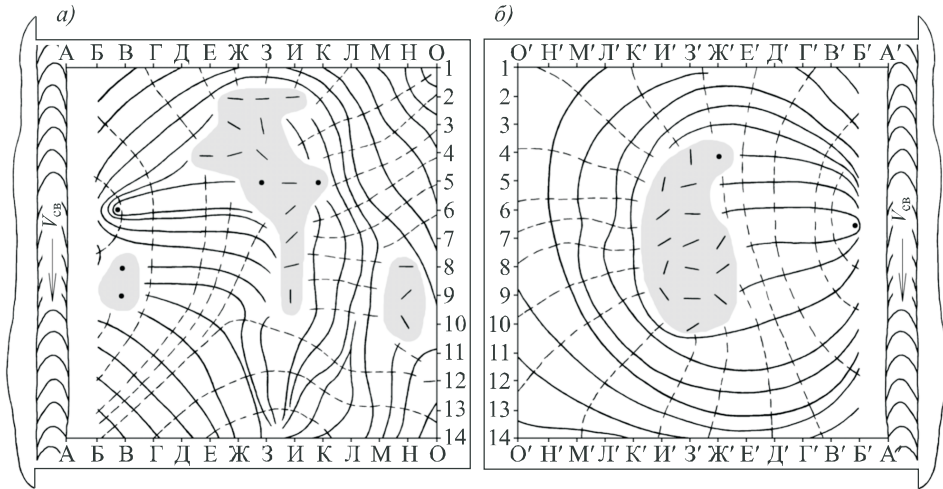


Рис. 3. Изостаты наибольших  $S_{\sigma_1}$  (сплошные линии) и наименьших  $S_{\sigma_2}$  (штриховые линии) напряжений и изотропные зоны (окрашены серым) на лицевой (а) и тыльной (б) стороне тонкой стальной пластины после сварки

Fig. 3. Isostats of the largest  $S_{\sigma_1}$  (solid lines) and smallest  $S_{\sigma_2}$  (dashed lines) stresses and isotropic zones (colored gray) on the front (a) and back (b) sides of a thin steel plate after welding

3) площадь ИЗ вследствие сварки сократилась с 81 до 15 см<sup>2</sup>, т.е. более чем в 5 раз;

4) после сварки поле изменилось по всей площади лицевой стороны пластины, в ИЗ стали другими углы наклонов главных площадок;

5) даже частичного возврата к полю, которое было до обработки пластины ВСД, не произошло;

6) ближайшая к шву ИЗ находится на удалении 40 мм;

7) изотропные точки присутствуют в зоне упругих траекторий и в ИЗ;

8) проявляющийся сгущением изолиний эпицентр концентратора напряжений находится на горизонтали 6.

Далее сравнивали картины полей после сварки (см. рис. 3, б) и до сварки (см. рис. 2, б) на тыльной стороне пластины.

Выявили:

1) поле изостат и ИЗ изменились по всей площади тыльной стороны пластины;

2) после сварки наличествуют изостаты упругие, извилистые, ИЗ и две изотропные точки;

3) ширина зоны вызванных сваркой упругих траекторий у шва  $\geq 50$  мм;

4) сохранилась ИЗ почти с прежней локализацией, но ее площадь сократилась с 25 до 16 см<sup>2</sup> за счет «прорастания» упругих изостат от сварного шва;

5) зона извилистых траекторий резко уменьшилась и сохранилась только на небольшой площади, ограниченной линиями М'-М' слева, К'-К' справа, горизонталями 3 – сверху и 10 – снизу;

6) значения углов наклонов главных площадок в самих ИЗ изменились;

7) эпицентр напряжений локализовался между горизонталями 6 и 7, что примерно соответствует его положению и на лицевой стороне.

Отметим, что несмотря на малую толщину, напряженное состояние в пластине во всех случаях трехосное, так как поля траекторий лицевой и тыльной сторон не совпадают. Вид напряженного состояния определяли способом, защищенным патентом РФ № 2687528.

**Выводы.** Анализ полей на двух сторонах пластины до обработки ВСД, после обработки и после сварки показал: процесс сварки восстанавливает в примыкающей к шву части стыкового соединения классическую зону упругих изостат за счет частичного поглощения площадей, занимаемых до сварки ИЗ и зонами извилистых траекторий. После сварки ИЗ и зоны извилистых изостат могут сохраниться, но значительно сократившись по площади. Сварка исключает даже частичный возврат к полям, имевшимся в тонкой пластине как до обработки ВСД, так и после нее.

Полученные результаты могут быть использованы при отработке сварочных технологий и оптимизации конструирования сварных изделий путем управления остаточным напряженным состоянием. Этого можно достигнуть созданием, где необходимо, напряженных и разгруженных зон или их комбинаций в пределах одного изделия.

#### Список источников

1. Пат. 2593256 Российская Федерация, МПК С 21 D 9/50, С 21 D 1/30, С 21 D 7/06. Способ снижения остаточных сварочных напряжений / В.Н. Семькин, А.Н. Юршин; заявитель и патентообладатель В.Н. Семькин; 2014122903/02; заявл. 04.06.2014; опубл. 10.08.2016; Бюл. № 22.
2. Семькин В.Н., Беско А.В., Проценко В.Н., Свиридов Д.А. Снижение остаточных сварочных напряжений выстрелами свинцовой дробью // Сварка и диагностика. 2016. № 4. С. 57–60.
3. Семькин В.Н., Проценко В.Н., Беско А.В., Свиридов Д.А. Исследование изотропных зон в поле траекторий остаточных сварочных напряжений // Сварка и диагностика. 2018. № 2. С. 23–26.
4. Семькин В.Н., Свиридов Д.А., Проценко В.Н., Беско А.В. Деструкция траекторий главных остаточных сварочных напряжений // Сварка и диагностика. 2018. № 6. С. 24–28.
5. Семькин В.Н., Свиридов Д.А., Беско А.В., Проценко В.Н. Изотропные зоны в поле остаточных сварочных напряжений // Проблемы и перспективы развития машиностроения: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Липецк: Липецкий гос. техн. ун-т, 2016. С. 70–74.
6. Семькин В.Н., Свиридов Д.А., Беско А.В., Проценко В.Н. Особенности плоского напряженного состояния после снижения остаточных сварочных напряжений выстрелами свинцовой дробью // Проблемы и перспективы развития машиностроения: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Липецк: Липецкий гос. техн. ун-т, 2016. С. 135–140.
7. Семькин В.Н., Проценко В.Н., Беско А.В., Свиридов Д.А., Хренов М.Ю. Формирование изотропных зон на двух сторонах стальной пластины толщиной 3 мм // Авиакосмические технологии (АКТ-2019): Труды XX Междунар. науч.-техн. конф. и шк. молодых ученых, аспирантов и студентов. Воронеж: Элист, 2019. С. 176–183.
8. Semykin V.N., Protsenko V.N., Besko A.V., Sviridov D.A., Podzorov N.V. Small atlas of residual stresses trajectories during surfacing or how to make steel 'transparent' // Welding International. 2021. Vol. 35, Issue 1-3. P. 91–97.

9. Кучер А.Т., Семькин В.Н. Совершенствование методики и аппаратуры для определения остаточных сварочных напряжений магнитоупругим способом // Сварочное производство. 1995. № 10. С. 32–33.
10. Устинов Ю.Ф., Семькин В.Н., Калинин Ю.И., Ульянов А.В. Магнитоупругий метод контроля металлических конструкций землеройно-транспортных и грузоподъемных машин // Механизация строительства. 2009. № 4. С. 7–11.
11. Устинов Ю.Ф., Семькин В.Н., Калинин Ю.И., Ульянов А.В. Выявление с помощью изостат напряженного состояния металлических конструкций строительных машин // Механизация строительства. 2009. № 6. С. 8–11.
12. Кучер А.Т., Семькин В.Н., Шмулевич С.Д. Кинетика формирования траекторий главных напряжений при сварке // 100-летие изобретения сварки по методу Н.Г. Славянова и современные проблемы развития сварочного производства: Сб. науч. тр. Всесоюз. науч.-техн. конф. Пермь: Пермский политехн. ин-т, 1990. Ч. 3. С. 124–129.

### References

1. Pat. 2593256 Russian Federation, Int. Cl. C 21 D 9/50, C 21 D 1/30, C 21 D 7/06. Method for reducing residual welding stress / V.N. Semykin, A.N. Yurshin; applicant and proprietor V.N. Semykin. 2014122903/02; appl. 04.06.2014; publ. 10.08.2016; Bull. No. 22. (In Russ.).
2. Semykin V.N., Besko A.V., Protsenko V.N., Sviridov D.A. The reduction of residual welding stress by lead pellet shots. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*. 2016; (4): 57–60. (In Russ.).
3. Semykin V.N., Protsenko V.N., Besko A.V., Sviridov D.A. The study of isotropic zones in the field of residual welding stress paths. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*. 2018; (2): 23–26. (In Russ.).
4. Semykin V.N., Sviridov D.A., Protsenko V.N., Besko A.V. Destruction of the trajectories of principal residual welding stresses. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*. 2018; (6): 24–28. (In Russ.).
5. Semykin V.N., Sviridov D.A., Besko A.V., Protsenko V.N. The isotropic zones in the field of welding residual stress. Problems and prospects of mechanical engineering development. Lipeck, 2016. P. 70–74. (In Russ.).
6. Semykin V.N., Sviridov D.A., Besko A.V., Protsenko V.N. Peculiarities of plane stress after the reduction of residual welding stress by means of lead pellet shots. Problems and prospects of mechanical engineering development. Lipeck, 2016. P. 135–140. (In Russ.).
7. Semykin V.N., Protsenko V.N., Besko A.V., Sviridov D.A., Khrenov M.Yu. The formation of isotropic zones on both sides of a steel plate with a thickness of 3 mm. Aerospace Technologies (AST-2019): Proceedings XX International science and technical conference and school of young scientists, post graduate students. Voronezh, 2019. P. 176–183. (In Russ.).
8. Semykin V.N., Protsenko V.N., Besko A.V., Sviridov D.A., Podzorov N.V. Small atlas of residual stresses trajectories during surfacing or how to make steel ‘transparent’. *Welding International*. 2021; 35 (1-3): 91–97.
9. Kucher A.T., Semykin V.N. Improving the methodology and equipment for determining residual welding stresses by the magnetoelastic method. *Svarochnoye proizvodstvo = Welding production*. 1995; (10): 32–33. (In Russ.).
10. Ustinov Yu.F., Semykin V.N., Kalinin Yu.I., Ul'yanov A.V. Controlling metal structures magnetoelastic method of groundtransport and lifting machines. *Mekhanizatsiya stroitel'stva = Mechanization of construction*. 2009; (4): 7–11. (In Russ.).

11. *Ustinov Yu.F., Semykin V.N., Kalinin Yu.I., Ul'yanov A.V.* Revealing stressed state of metal constructions of building machines by isostatics. *Mekhanizatsiya stroitel'stva = Mechanization of construction*. 2009; (6): 8–11. (In Russ.).
12. *Kucher A.T., Semykin V.N., Shmulevich S.D.* Kinetics of principal stresses trajectories formation in welding. The 100th anniversary of the invention of welding by the method of N.G. Slavyanov and modern problems of welding production development. Perm', 1990; (3): 124–129. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

**Владимир Николаевич Семькин** – кандидат технических наук, доцент  
**Дмитрий Алексеевич Свиридов** – кандидат технических наук, доцент  
**Михаил Николаевич Подоприхин** – кандидат технических наук, доцент  
**Вера Николаевна Проценко** – старший преподаватель  
**Александр Васильевич Беско** – кандидат технических наук, доцент  
**Николай Вячеславович Подзоров** – студент

#### **Information about the authors**

**Vladimir Nikolaevich Semykin** – PhD, Ass. Proffesor  
**Dmitry Alekseevich Sviridov** – PhD, Ass. Proffesor  
**Mikhail Nikolaevich Podoprikhin** – PhD, Ass. Proffesor  
**Vera Nikolaevna Protsenko** – Senior Lecturer  
**Aleksandr Vasilevich Besko** – PhD, Ass. Proffesor  
**Nikolay Vyacheslavovich Podzorov** – Student

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.04.2022  
Одобрена после рецензирования 18.05.2022  
Принята к публикации 25.05.2022

The article was submitted 18.04.2022  
Approved after reviewing 18.05.2022  
Accepted for publication 25. 05.2022