

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-2-I-76-80>

ТРАЕКТОРИИ ГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСЛЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

© Владимир Николаевич Семькин, Вера Николаевна Проценко,
Александр Васильевич Беско, Дмитрий Алексеевич Свиридов*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «ВГТУ», Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; *e-mail: d.a.sviridov@mail.ru

*Статья поступила 18 апреля 2022 г. Поступила после доработки 30 июня 2022 г.
Принята к публикации 28 июля 2022 г.*

Эффективность исследований механических напряжений в металлах можно повысить путем изучения и учета полей траекторий главных напряжений (изостат), качественно характеризующих напряженное состояние. Цель работы — определение возможности выявления изостат в образце из стали Ст3 после его пластического деформирования. Для исследований использовали магнитоупругий метод, основанный на зависимости магнитной проницаемости ферромагнитных материалов от действующих в них механических напряжений. Метод реализован с помощью монофазного магнитоупругого измерителя механических напряжений ИМН-4М с базой датчика 5 мм и погрешностью угломера ± 2 градуса. Образец — пластина размером $150 \times 150 \times 4$ мм. На ее лицевую и тыльную поверхности наносили координатные сетки с ячейками 10×10 мм. Прибором ИМН-4М в узлах сеток измеряли значения углов наклона касательных к траекториям главных напряжений, затем строили изостаты способом последовательной корректировки направления и радиуса кривизны нарастающей кривой. Пластины пластически деформировали выстрелом мелкой свинцовой дробью с кинетической энергией 1916 Дж. Максимальный выгиб пластины в зоне воздействия основной части заряда составил 7 мм. После выстрела в тех же узлах координатных сеток повторили измерения и вновь построили изостаты. Эксперимент показал: магнитоупругий метод позволяет определить изостаты и после пластического деформирования; траектории присутствуют на лицевой и тыльной поверхностях деформированной пластины; в полях, сформированных выстрелом, имеются изотропные точки и параллельные изостаты. На лицевой и тыльной сторонах формируются изотропные зоны, в которых из-за хаотической ориентации касательных нельзя построить изостаты. Выявлены «возмущения» полей со срывом упорядоченных потоков траекторий. Результаты работы могут быть полезны исследователям и инженерно-техническим работникам, занимающимся изучением упругих и пластических деформаций.

Ключевые слова: пластическое деформирование; выстрел свинцовой дробью; магнитоупругий метод; траектории напряжений; изотропные зоны.

TRAJECTORIES OF PRINCIPAL STRESSES AFTER PLASTIC DEFORMATION

© Vladimir N. Semykin, Vera N. Protsenko, Aleksandr V. Besko, Dmitrii A. Sviridov*

Voronezh State Technical University, 84, 20-letiya Oktyabrya ul., Voronezh, 394006, Russia; *e-mail: d.a.sviridov@mail.ru

Received April 18, 2022. Revised June 30, 2022. Accepted July 28, 2022.

Improving research efficiency of mechanical stresses in metals can be achieved by studying and taking into account the fields of the trajectories of the main stresses (isostats), which qualitatively characterize the stress state. The purpose of the work was to determine the possibility of detecting the isostates in a St3 steel sample, following its plastic deformation. The methodology is based on the magnetoelastic method, manifested by the dependence of magnetic permeability of ferromagnetic materials upon mechanical stresses, acting in them. The method is implemented using the IMN-4M monophasic magnetoelastic meter of mechanical stress: the base of the device gage is 5 mm, the angle meter error is $\pm 2^\circ$. The sample is a plate with dimensions of $150 \times 150 \times 4$ mm. Coordinate grids with 10×10 mm cells were applied to its front and back surfaces. Using the IMN-4M device, we measured the values of tilt angles for tangents to principal stress trajectories in all nodes, then we created isostates by consecutive adjustment of the direction and radius of curvature for a raised curve. The plastic deformation of a plate was performed by shooting small lead pellets with kinetic energy of 1916 J. The maximum plate curvature in the impact zone of main charge equaled 7 mm. After a shot, the measurements were repeated in the same nodes of coordinate grids, and the isostates were plotted again. The experiment has shown that: the magnetoelastic method makes it possible to detect the isostates even after plastic deformation; the trajectories are present

both on front and back surfaces of the deformed plate; isotropic points and parallel isostates are available in fields, formed by the shot. Isotropic zones were formed on front and back surfaces, in which isostates can not be plotted due to random orientation of tangents. The “disturbances” of fields with disruption of regular trajectory flows were detected. The results of the work may be useful for researchers and technical engineers, engaged in the study of elastic and plastic deformations.

Keywords: plastic deformation; lead pellet shot; magnetoelastic method; trajectories of stresses; isotropic zones.

Введение

Значительным резервом повышения эффективности исследований механических напряжений в металлах является учет их геометрической характеристики — полей изостат (другими словами, линии тяжения, траекторий главных напряжений). Изостаты — это кривые, касательные к которым совпадают с направлением одного из главных напряжений, действующих в точках касания.

К настоящему времени накоплены знания о кинетике формирования изостат, температуре их стабилизации («застывания») в стали [1, с. 129; 2, с. 82; 3, с. 91; 4, с. 143]. С помощью специальных технологий можно управлять конфигурацией полей напряжений вплоть до полной деструкции изостат, а если необходимо, то восстанавливать их. Установлено, что траектории могут быть упругими (напряженными) и извилистыми (волнообразными, расслабленными). В результате деструкции траекторий путем обработки стальных образцов выстрелами свинцовой дробью получены благоприятные зоны без изостат, названные изотропными. Напряжения в этих зонах минимальны [5, с. 25]. Классификация полей напряжений как структур, содержащих упругие изостаты, извилистые изостаты, изотропные зоны и изотропные точки, продуктивна в первую очередь для качественной оценки остаточных сварочных напряжений и разработки эффективных способов их снижения. Однако информация получена только для напряжений в пределах упругости [6, с. 50; 7, с. 47].

В литературных источниках авторами не обнаружено данных о линиях тяжения после пластической деформации металлических деталей и методах их построения. Цель работы — определение наличия и возможности выявления траекторий главных напряжений в стальной пластине после ее пластического деформирования.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили магнитоупругим методом (МУМ), хорошо зарекомендовавшим себя в экспериментах по изучению геометрических характеристик остаточных напряжений [8, с. 493; 9, с. 807; 10, с. 18; 11, с. 680; 12, с. 39; 13, с. 25]. Метод основан на зависимости магнит-

ной проницаемости ферромагнитных материалов от величины действующих в них механических напряжений. Использовали магнитоупругий монофазный измеритель механических напряжений ИМН-4М системы радиоконструктора А. Н. Юршина. Характеристики прибора: рабочая частота 1000 Гц; база измерений датчика 5 мм; предел измерений $\pm\sigma_n$; погрешность угломера ± 2 градуса; габариты 220 × 210 × 170 мм; масса 3,25 кг. Он дает возможность определить значения разности главных напряжений $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$ и углов наклона главных площадок в любых точках поверхностей пластины, кроме находящихся ближе 5 мм к ее контуру (краю). Результаты измерений возле свободного контура искажает краевой эффект, который можно компенсировать способом, описанным, например, в патенте RU 2445591. Прибор ИМН-4М тарировали с помощью устройства, предложенного в [14, с. 66].

В качестве образца использовали пластину из стали Ст3 размером 150 × 150 × 4 мм, вырезанную гильотинными ножницами. На лицевую и тыльную поверхности образца наносили координатную сетку с ячейками 10 × 10 мм. На каждой из сторон пластины оказалось по 196 узлов сеток — точек для измерений. Вертикальные линии сеток обозначили А – А, В – В, ..., О – О для лицевой поверхности, О' – О', Н' – Н', ..., А' – А' — для тыльной; горизонтальные линии обеих сторон — 1 – 1, 2 – 2, ..., 14 – 14.

Далее через каждые полминуты измеряли значения углов наклона касательных к траекториям наибольших главных напряжений во всех узлах лицевой и тыльной координатных сеток. Полученный массив данных позволил построить изостаты способом последовательной корректировки направления и радиуса кривизны нарастающей изолинии¹. На рис. 1 траектории наибольших главных напряжений S_{σ_1} обозначены сплошными линиями, а траектории наименьших S_{σ_2} — штриховыми линиями. Поле изостат лицевой поверхности пластины представлено на рис. 1, а, тыльной стороны — на рис. 1, б. На обеих поверхностях преобладают почти прямые тра-

¹ Семькин В. Н. Развитие магнитоупругого метода и создание средств определения напряженного состояния конструкций тяжелого машиностроения: дис. ... канд. техн. наук. — М., 1992. — 124 с.

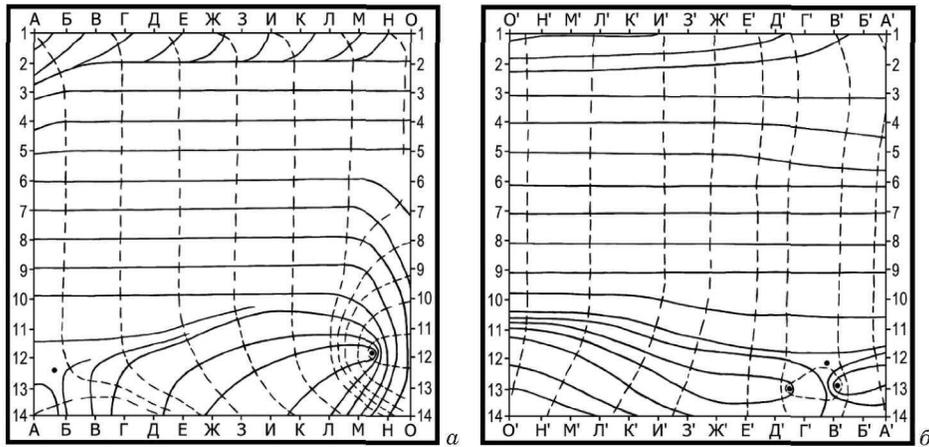


Рис. 1. Траектории наибольших S_{σ_1} (сплошные линии) и наименьших S_{σ_2} (штриховые линии) главных напряжений на лицевой (а) и тыльной (б) сторонах стальной пластины $150 \times 150 \times 4$ мм до ее деформирования

Fig. 1. Trajectories of the largest S_{σ_1} (continuous lines) and the least S_{σ_2} (dashed lines) principal stresses on the front side (a), back side (b) of the steel plate with dimensions of $150 \times 150 \times 4$ mm before its deformation

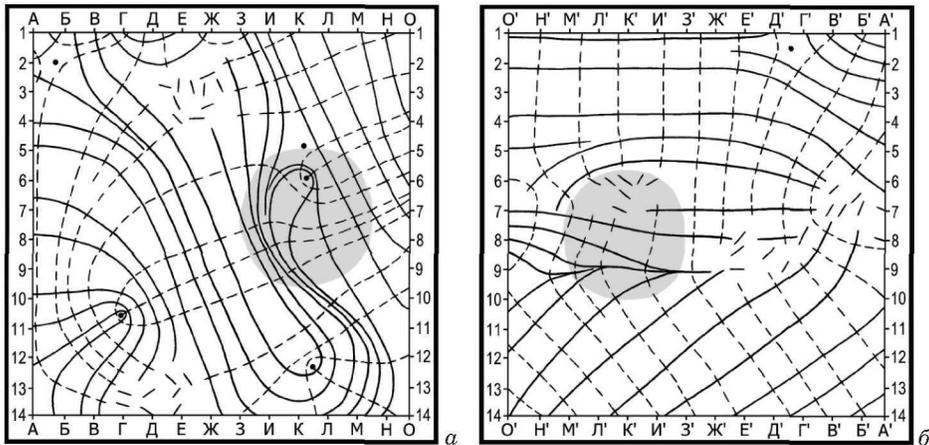


Рис. 2. Траектории наибольших S_{σ_1} (сплошные линии) и наименьших S_{σ_2} (штриховые линии) главных напряжений на лицевой (а) и тыльной (б) сторонах стальной пластины $150 \times 150 \times 4$ мм после ее деформирования выстрелами свинцовой дробью

Fig. 2. Trajectories of the largest S_{σ_1} (continuous lines) and the least S_{σ_2} (dashed lines) principal stresses on the front side (a) and back side (b) of the steel plate with dimensions of $150 \times 150 \times 4$ mm after its deformation by lead pellet shots

ектории, сохранившиеся от проката. Небольшие отклонения от такого вида траектории вызваны, по-видимому, последовательностью вырезания образца. Оба поля содержат изотропные (сингулярные) точки замкнутого и асимптотического типов. В изотропных точках главные напряжения равны по величине. Точку замкнутого типа охватывают взаимно ортогональные траектории, и она окружена замкнутыми кривыми овальной формы. На рис. 1, а такая точка находится между вертикалями М – М и Н – Н, на горизонтали 12 – 12. Асимптотическую точку ветви двух пересекающихся изостат не охватывают (см. рис. 1, а, точка вблизи вертикали Б – Б, между горизонталями 12 – 12 и 13 – 13).

Пластины пластически деформировали выстрелом мелкой свинцовой дробью, так как в этом случае достаточно просто эмпирически подобрать необходимую кинетическую энергию воздействия и точно оценить ее величину [15]. Обстрел нескольких пластин из стали СтЗ с габаритами исследуемого образца показал, что эффект обеспечивает один ружейный выстрел в лицевую сторону пластины с применением патрона «Главпатрон Competition» (ТУ 7272-001-14365998-04), снаряженного порошком G2/28В и свинцовой дробью диаметром 2,4 мм общей массой 28 г. Скорость дроби на дистанции 12 м составила 370 м/с, кинетическая энергия 1916 Дж. Использовали отечественное ружье ТОЗ-120 12-го калибра в условиях оборудованного поли-

гона с соблюдением всех правил безопасности. Основная часть заряда пришлась на площадку, по форме близкую к кругу с центром возле узла К8 и радиусом 25 – 28 мм. Максимальный чашеобразный выгиб пластины в этой зоне составил 7 мм.

После выстрела в тех же узлах координатных сеток вновь определили углы наклона главных площадок и построили траектории. Эти траектории с лицевой вогнутой стороны показаны на рис. 2, а (место воздействия основной части заряда дроби выделено серым пятном), с выпуклой тыльной — на рис. 2, б.

Обсуждение результатов

Эксперимент показал, что магнитоупругий метод позволяет определить изолинии после пластического деформирования пластины из низкоуглеродистой стали, а траектории имеются на ее лицевой и тыльной поверхностях. На лицевой стороне (см. рис. 2, а) поле «возмущено» в эпицентре действия заряда, а упорядоченный поток линий «срывается» на площади $\sim 6 \text{ см}^2$. Сформировались две изотропные зоны площадью $\sim 4 \text{ см}^2$, в которых из-за хаотической ориентации касательных нет возможности построить изостаты, зона ЕЗ – ЖЗ и Е13 – Е14.

С тыльной стороны (см. рис. 2, б) сформировались три изотропные зоны — возле точек К'6, Д'9 и Б'7. Проекция лицевой на тыльную сторону эпицентра воздействия дроби показана на рис. 2, б в виде серого пятна.

Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что после пластического деформирования «наследуются» лишь незначительные фрагменты геометрии упругих полей, бывших до обработки выстрелом.

Заключение

Работа подтвердила эффективность использованных методик и аппаратуры для исследования напряженного состояния в сталях. Анализ полученных экспериментальных данных позволил сделать следующие выводы.

1. Силовые потоки в пластически деформированных стальных деталях можно оперативно выявить магнитоупругим методом.

2. Внешние различия полей траекторий напряжений в пределах упругости и полей траекторий после пластической деформации не носят принципиального характера, так как содержат однотипные составляющие: упругие изостаты, изотропные зоны и изотропные точки.

3. В полях траекторий пластически деформированного образца имеются участки с параллельными изолиниями. В таких участках отсутствуют градиенты напряжений.

Полученная информация может быть полезна исследователям и практическим инженерам, занимающимся изучением упругих и пластических деформаций в ферромагнитных материалах.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. Ч. 3. — Пермь: Пермский политех. ин-т, 1990. С. 124 – 129.
2. Семькин В. Н., Кучер А. Т. Определение температуры стабилизации изостат / Современные проблемы сварочной науки и техники: тез. докл. межд. науч.-техн. конф. — Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 1993. С. 81 – 82.
3. Semykin V. N., Protzenko V. N., Besko A. V., et al. 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. DOI: 10.1080/09507116.2021.1945319
4. Попов А. Л., Куров Д. А. Использование температурных следов для неразрушающей диагностики остаточных напряжений в сварном соединении / Вестник МГСУ. 2012. № 8. С. 143 – 146.
5. 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.
6. Семькин В. Н., Проценко В. Н., Свиридов Д. А., Беско А. В. Снижение остаточных напряжений обработкой выстрелами свинцовой дроби сварных соединений толщиной 12 мм / Сварочное производство. 2022. № 3. С. 49 – 54.
7. Семькин В. Н., Проценко В. Н., Свиридов Д. А., Беско А. В. Проверка эффективности снятия остаточных сварочных напряжений выстрелами свинцовой дроби / Сварка и диагностика. 2022. № 3. С. 47 – 51.
8. Yoshinaga A., Takizawa T., Yoshi T. Non-Destructive Measurement of Residual Stress by Magnetostriction Effect / Journal of NDI. 1979. Vol. 28. P. 491 – 497 [in Japanese].
9. Abuku S., Isono T. Measurement of Welding Residual Stress Distribution by means of Magnetic Probe / Journal of NDI. 1986. Vol. 35. N 11. P. 805 – 810 [in Japanese].
10. Петушков В. Г., Брызгалов А. Г., Титов В. А., Первой В. М. Оценка напряженного состояния сварных металлоконструкций методом магнитоупругой тензометрии / Автоматическая сварка. 1992. № 5. С. 16 – 18.
11. Петушков В. Г. Применение взрыва в сварочной технике. — Киев: Наукова думка, 2005. — 756 с.
12. Никулин В. Е., Евстратикова Я. И. Контроль остаточных сварочных напряжений с помощью магнитоанизотропного метода после применения ультразвуковой ударной обработки / Сварка и диагностика. 2019. № 4. С. 38 – 41.
13. Паршин С. Г., Никулин В. Е., Левченко А. М. Неразрушающий контроль остаточных напряжений при подводной мокрой сварке судостроительной стали с применением порошковой проволоки / Сварка и диагностика. 2021. № 5. С. 24 – 29.
14. Калинин Ю. И., Семькин В. Н., Ульянов А. В. Компактное устройство для снятия статических характеристик магнитоупругих датчиков / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 1. С. 66 – 67.
15. 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 / Семькин В. Н., Юршин А. Н.; заявитель и патентообладатель Семькин Владимир Николаевич. — 2014122903/02; заявл. 04.06.14; опубл. 10.08.16. Бюл. № 22.

REFERENCES

1. **Kucher A. T., Semykin V. N., Shmulevich S. D.** Kinetics of principal stresses trajectories formation in welding / 100th anniversary of the invention of welding according to the method of N. G. Slavyanov and modern problems of the development of welding production: a collection of scientific papers of the All-Union Scientific and Technical Conference. Part 3. — Perm': Perm. Politekhn. Inst., 1990. P. 124 – 129 [in Russian].
2. **Semykin V. N., Kucher A. T.** Determination of isostat stabilization temperature / Modern problems of welding science and technology: abstrs of the Int. Sci.-Tech. Conf. — Rostov-na-Donu: Don. Gos. Tekhn. Univ., 1993. P. 81 – 82 [in Russian].
3. **Semykin V. N., Protsenko V. N., Besko A. V., et al.** 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. DOI: 10.1080/09507116.2021.1945319
4. **Popov A. L., Kurov D. A.** Using temperature traces in non-destructive diagnostics of residual stresses of welded joints / Vestn. MGSU. 2012. N 8. P. 143 – 146 [in Russian].
5. **Semykin V. N., Sviridov D. A., Protsenko V. N., Besko A. V.** Destruction of the trajectories of principal residual welding stresses / Svarka Diagn. 2018. N 6. P. 24 – 28 [in Russian].
6. **Semykin V. N., Protsenko V. N., Sviridov D. A., Besko A. V.** Reduction of residual stresses by lead shot treatment of welded joints 12 mm thick / Svar. Proizv. 2022. N 3. P. 49 – 54 [in Russian].
7. **Semykin V. N., Protsenko V. N., Sviridov D. A., Besko A. V.** Verification of the effectiveness of removing residual welded stresses with lead shots / Svarka Diagn. 2022. N 3. P. 47 – 51 [in Russian].
8. **Yoshinaga A., Takizawa T., Yoshi T.** Non-Destructive Measurement of Residual Stress by Magnetostriction Effect / Journal of NDI. 1979. Vol. 28. P. 491 – 497 [in Japanese].
9. **Abuku S., Isono T.** Measurement of Welding Residual Stress Distribution by means of Magnetic Probe / Journal of NDI. 1986. Vol. 35. N 11. P. 805 – 810 [in Japanese].
10. **Petushkov V. G., Bryzgalin A. G., Titov V. A., Pervoi V. M.** Evaluation of the Stressed State of Welded Metal Structures by Magnetoelastic Tensometry / Avtom. Svarka. 1992. N 5. P. 16 – 18 [in Russian].
11. **Petushkov V. G.** The use of explosion in welding technology. — Kiev: Naukova dumka, 2005. — 756 p. [in Russian].
12. **Nikulin V. E., Evstratikova Ya. I.** Control of residual welding stresses using the magnitoanizotropnogo method after the application of ultrasonic peening / Svarka Diagn. 2019. N 4. P. 38 – 41 [in Russian].
13. **Parshin S. G., Nikulin V. E., Levchenko A. M.** Non-destructive testing of residual stresses during underwater wet welding of shipbuilding steel using flux-cored wire / Svarka Diagn. 2021. N 5. P. 24 – 29 [in Russian].
14. **Kalinin Yu. I., Semykin V. N., Ul'yanov A. V.** Compact device for measuring static characteristics of magnetoelastic sensors / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 1. P. 66 – 67 [in Russian].
15. RF Pat., Int. Cl. C 21 D 9/50, C 21 D 1/30, C 21 D 7/06. Method for reducing residual welding stress / Semykin V. N., Yurshin A. N.; applicant and proprietor Semykin Vladimir Nikolaeovich. — 2014122903/02; applied 04.06.14; publ. 10.08.16. Byull. N 22 [in Russian].