

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПО КРИВОЛИНЕЙНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ ПОСТОЯННОЙ КРИВИЗНЫ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ НАПРАВЛЕНИЕМ ПРОЦЕССА

*В.В. Гараников, Е.О. Корнильев*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Гараников В.В., Корнильев Е.О., 2020

**Аннотация.** Проведено экспериментальное исследование векторных и скалярных свойств при смене направления деформирования на образцах из стали 9Х2. Показано, что по исчерпанию некоторого интервала длины траектории скалярные и векторные свойства как бы «забывают» сменить направление деформирования и соответствуют траекториям без смены направления.

**Ключевые слова:** исследование, траектория, скалярные свойства, векторные свойства, деформация, направление деформирования, след запаздывания.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2020-3-17-24**

### ВВЕДЕНИЕ

Целью экспериментов, направленных на исследование закономерностей деформирования по криволинейным траекториям постоянной кривизны с изменяющимся направлением вектора, было изучение влияния смены направления деформирования на векторные и скалярные свойства стали 9Х2. Реализованы две программы испытаний. Проведено сравнение скалярных и векторных свойств по траекториям деформаций с изменением и без изменения направления процесса. В работе также уделено особое влияние изучения перемещений гипотетической поверхности текучести и нагружения [1–3].

### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПО ПЕРВОЙ ПРОГРАММЕ

Реализованы две программы испытаний. Испытания проводились на комплексе [4]. В опыте образец вначале растягивался до уровня  $\varepsilon_1 = 0,01$ , а затем были выполнены два витка против часовой стрелки и один виток по часовой стрелки (рис. 1). На рис. 1 цифры в кружках обозначают начало соответствующих витков. Условные символы в виде кружка с внутренним и внешним крестиком соответствуют первому и второму витку, темный кружок – соответствует третьему (в обратном направлении). Отклик на данную траекторию представлен на рис. 2.

В процессе деформирования на первом и втором витке наблюдается рост модуля вектора напряжений, т. е. происходит процесс упрочнения. Экспериментальная точка, отмеченная цифрой 3 в кружке, отвечает смене направления процесса деформирования. После смены направления процесса наблюдается вначале уменьшение модуля вектора напряжений, т. е. разгрузка, которая заканчивается в точках, отмеченных на рис. 1–2 буквой Н. При этом траектория напряжений проходит от начала координат девиаторной плоскости на удалении порядка 170 МПа. Затем реализуется активный процесс нагружения в обратном направлении; траектория напряжений быстро выходит на траекторию, отвечающую виткам в первоначальном направлении, и уже во второй половине третьего витка наблюдается процесс упрочнения.

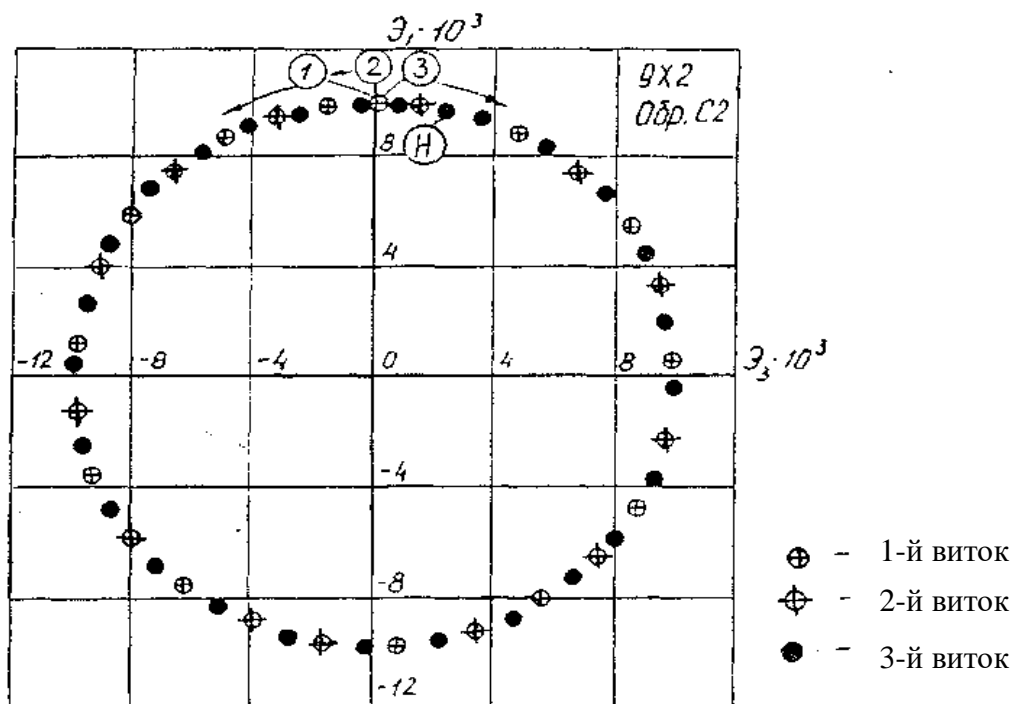


Рис. 1. Программа испытаний с изменяющимся направлением процесса

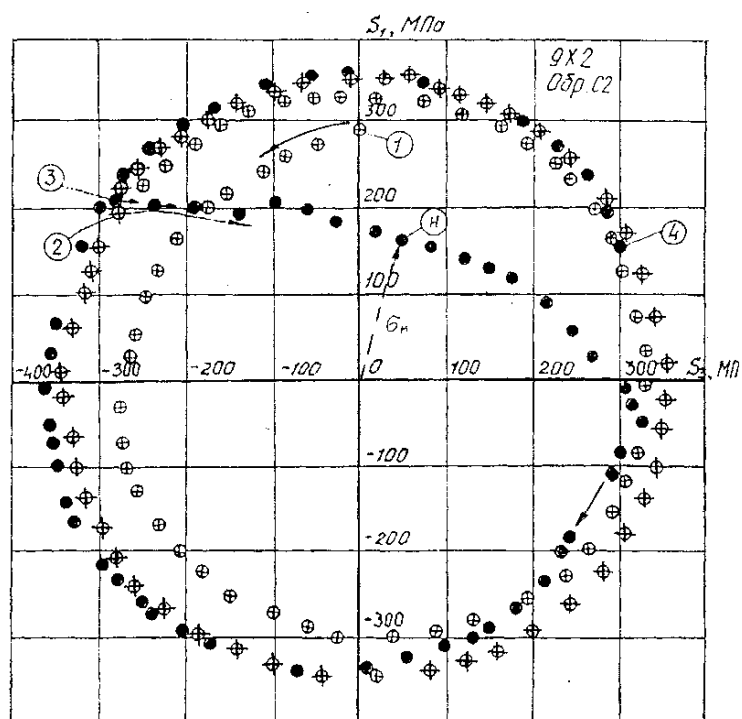


Рис. 2. Траектория нагружения

Скалярные и векторные свойства при деформировании по данной программе отражены на рис. 3–4. На рис. 3 представлена диаграмма деформирования  $\sigma \sim \epsilon$ . Стрелками показаны направления процесса деформирования. После «нырка» напряжений на первом витке, связанного с изломом траектории деформации при переходе от простого растяжения к сложному нагружению по криволинейной траектории постоянной кривизны, наблюдается процесс упрочнения. На втором витке диаграмма характеризуется тем, что модуль вектора

деформаций  $\mathcal{E}$  в процессе деформирования изменяется (рис. 3б). Данное обстоятельство можно объяснить появлением третьей компоненты модуля вектора деформации  $\mathcal{E}_2 \neq 0$ , причем к концу данного витка эта компонента уменьшается. После смены направления процесса происходит разгрузка, которая заканчивается в точке, отмеченной буквой Н (рис. 3в). Затем наблюдается рост модуля вектора напряжений до значения, соответствующего его максимального уровня на втором витке.

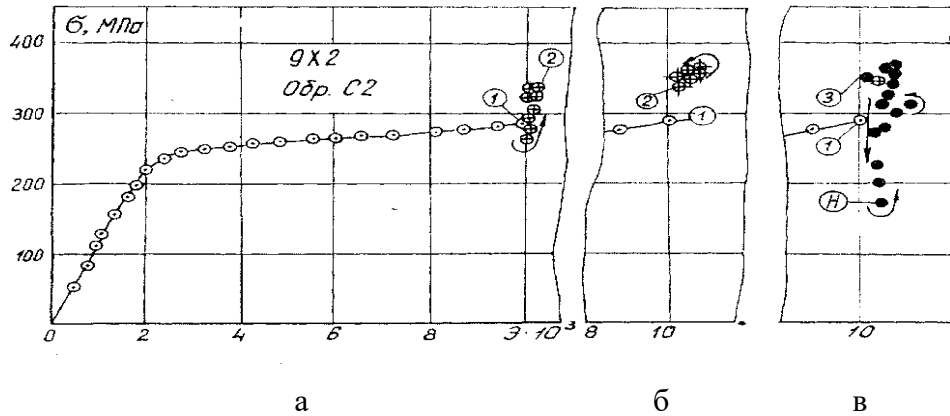


Рис. 3. Диаграмма деформирования материала по виткам: а – первому с упрочнением; б – второму с измененным модулем деформации  $\mathcal{E}$ ; в – третьему со сменой направления процесса

На рис. 4 представлены зависимости угла сближения от приращения длины траектории деформации. Хорошо видно, что данные зависимости с ростом  $\Delta S$  стабилизируются. Начало режима  $v_1 = \text{const}$  на кривых можно принять за условный след запаздывания векторных свойств материала как функции кривизны. Для данных испытаний  $h = 0,015$ .

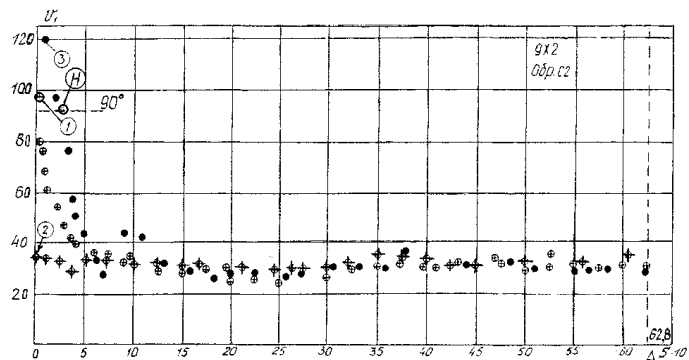


Рис. 4. Графики изменения угла сближения  
**МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ С ПЕРИОДИЧЕСКИ  
ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ НАПРАВЛЕНИЕМ ПРОЦЕССА**

Более сложная программа испытаний, состоящая из двенадцати участков, была реализована для образца с17 (рис. 5). Выход на криволинейную траекторию деформаций постоянной кривизны был осуществлен после предварительного растяжения до уровня  $\mathcal{E}_1 = 0,02$ , разгрузки ( $\sigma = 0$ ), а затем повторного нагружения до уровня, соответствующего началу гипотетической поверхности текучести  $\mathcal{E} = 0,02 \cdot \mathcal{E}^T$  ( $\sigma_{0,01}^T = 147$  МПа,  $\mathcal{E}^T = 1,19 \cdot 10^{-3}$ ).

Испытания по криволинейной траектории состояли из трех циклов: последовательное нагружение против часовой стрелки до  $\theta = 45^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ; изменение направления процесса на противоположное и возврат в исходную точку. Точки 4, 6, 8 на

рис. 5 отвечают началу цикла нагружения, а точки 5, 7, 9 соответствуют моменту смены направления процесса деформирования. Здесь же показаны экспериментальные точки и для четвертого цикла  $\theta = 270^\circ$  (треугольники). Но из-за значительного роста компоненты деформации  $\mathcal{E}_2$  в процессе нагружения данный цикл не рассматривался.

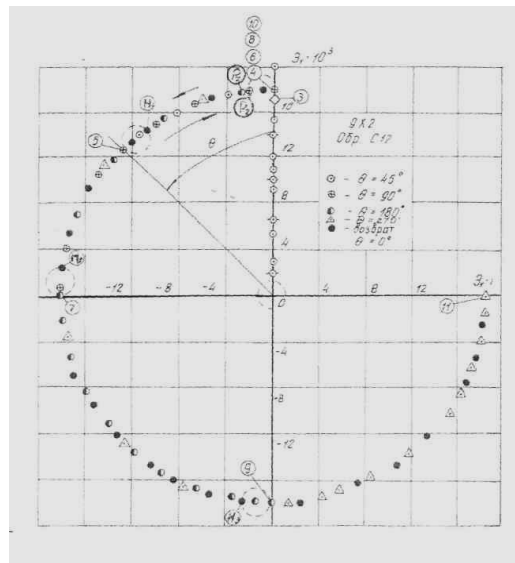


Рис. 5. Программа испытания с периодически изменяющимся направлением процесса

Траектория нагружения, соответствующая реализованной траектории деформаций, представлена на рис. 6.

Условные символы для каждого цикла траектории нагружения соответствуют обозначениям экспериментальных точек траекторий деформаций. Темные точки обозначают траектории напряжений после смены направления процесса. Вначале (после смены направления деформаций) наблюдается разгрузка, которая меняется на активный процесс в точках, отмеченных буквами  $H_i$  и заканчивающийся в точках 6, 8, 10. Причем длина модуля вектора напряжений для первых двух циклов ( $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ ) не успевает восстановиться до своего прежнего значения в точке излома. Только для третьего цикла программы ( $\theta = 180^\circ$ ) модуль вектора напряжений достигает своего прежнего значения к моменту окончания цикла. Данный результат также характерен для предыдущего эксперимента (образец с2). В точках 6, 8, 10 вновь происходит смена направления деформирования, соответствующая исходному направлению (против часовой стрелки). В этом случае разгрузка заканчивается в точках, отмеченных буквами  $P_i$ . Для всех циклов наблюдается выход траекторий нагружения на некоторую стабилизированную траекторию. Кроме того, в данном эксперименте сделана попытка изучить перемещения гипотетической поверхности текучести и нагружения.

На рис. 5–6 окружности, проведенные вокруг начала координат девиаторной плоскости, соответствуют начальным поверхностям текучести и нагружения. Пунктирными линиями отмечены положения поверхности текучести для точек, где происходит смена направления процесса (см. рис. 5). Как видно из рис. 5, заметного изменения размеров поверхности текучести не происходит. Перемещения гипотетической поверхности нагружения с целью большей наглядности представлены только для третьего цикла программы (рис. 6). Здесь можно отметить некоторое увеличение данной поверхности в процессе деформирования.

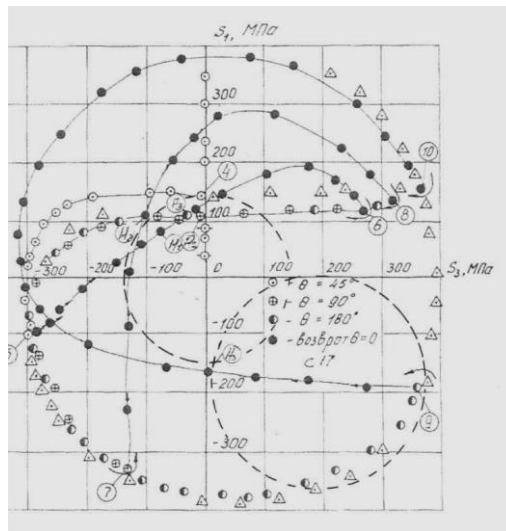


Рис. 6. Траектория нагружения

На рис. 7 показана диаграмма материала при деформировании по данной программе. Для наглядности каждый цикл представлен отдельно.

Сплошная линия соответствует предварительно простому растяжению до уровня  $\varepsilon = 2\%$ . Условные символы в виде ромбиков отвечают простой разгрузке, а кружки с внешним крестиком – повторному нагружению до уровня  $\varepsilon_1 = 0,02 - \varepsilon^T$ . Здесь можно отметить то, что наименьший уровень модуля вектора напряжений при разгрузке соответствует первому циклу, имеющую наименьшую длину траектории деформаций до точки смены направления процесса. Векторные свойства отражены на рис. 8. Точки, в которых происходит смена направления процесса нагружения (5, 7, 9), не совмещены с началом координат. Это позволяет более наглядно проследить за закономерностью изменения угла сближения для каждого цикла. Угол сближения после смены направления процесса быстро убывает и стремится к значению  $\nu_1 = 20^\circ$ .

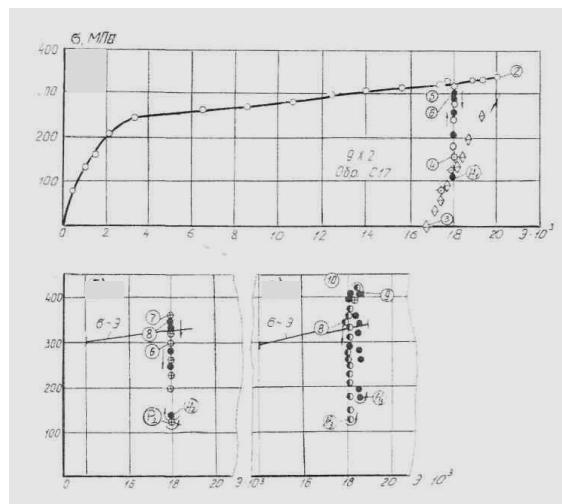


Рис. 7. Диаграмма деформирования образца

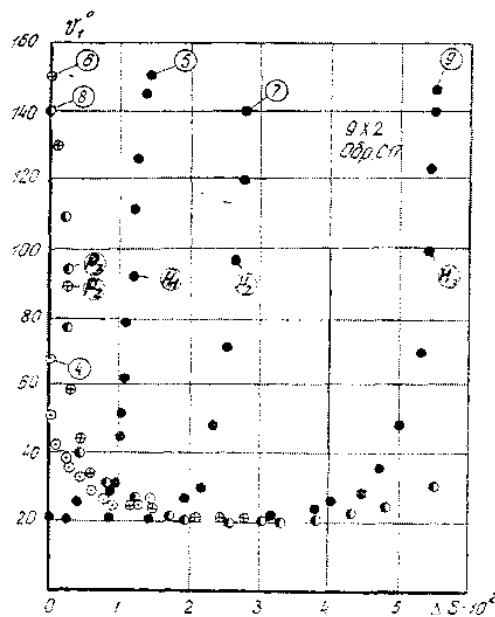


Рис. 8. Графики изменения угла сближения

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом полученных экспериментальных результатов по двум реализованным программам можно отметить, что по исчерпанию некоторого интервала длины траектории (в данных случаях порядка половины длины дуги окружности) скалярные и векторные свойства как бы «забывают» сменить направление деформирования и соответствуют траекториям без смены направления деформирования. Поэтому здесь можно говорить о следе запаздывания для траектории постоянной кривизны как отрезке окружности  $S_n$ , при котором процесс после смены направления стабилизируется. Данный результат полностью соответствует выводам, которые были получены ранее [7].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубчанинов В.Г. Определяющие соотношения теории неупругих процессов в пространстве напряжений. Сообщение 1: теоретические основы // *Проблемы прочности*. 1992. № 5. С. 3–13.
2. Зубчанинов В.Г. Определяющие соотношения теории неупругих процессов в пространстве напряжений. Сообщение 2: экспериментальные основы // *Проблемы прочности*. 1992. № 6. С. 3–12.
3. Зубчанинов В.Г. Механика процессов пластических сред. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 352 с.
4. Автоматизированный комплекс для исследования упруговязкопластичных свойств материалов при сложном нагружении: пат. 7202 U1 Рос. Федерация № 97108023/20(008702) / Зубчанинов В.Г., Акимов А.В., Охлопков Н.Л.; заявл. 20.05.1997; опубл. 16.07.1998.
5. Зубчанинов В.Г., Гараников В.В., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: монография: в 2 кн. Тверь: ТГТУ, 2003. Кн. 1: Процессы сложного деформирования. 172 с.
6. Зубчанинов В.Г., Гараников В.В., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: монография: в 2 кн. Тверь: ТГТУ, 2004. Кн. 2: Процессы сложного нагружения. 184 с.
7. Гараников В.В. Исследование векторных и скалярных свойств при изменении направления процесса деформирования // *Фундаментальные основы механики*. 2018. № 3. С. 112–114.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ГАРАНИКОВ Валерий Владимирович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой технической механики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: mehanika06@mail.ru

*КОРНИЛЬЕВ Егор Олегович* – ассистент кафедры технической механики, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: [mexanika06@mail.ru](mailto:mexanika06@mail.ru)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Гараников В.В., Корнильев Е.О. Исследование закономерностей деформирования по криволинейным траекториям постоянной кривизны с изменяющимся направлением процесса // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 3 (7). С. 17–24.

---

### RESEARCH OF THE PATTERNS OF DEFORMATION ALONG CURVILINEAR TRAJECTORIES OF CONSTANT CURVATURE WITH A CHANGING PROCESS DIRECTION

*V.V. Garanikov, E.O. Kornilev*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** An experimental study of the vector and scalar properties was carried out when changing the direction of deformation on samples made of 9X2 steel. It is shown that after the exhaustion of a certain interval of the trajectory lengths, scalar and vector properties seem to forget the change in the direction of deformation and correspond to the trajectories without changing the direction.

**Keywords:** research, trajectory, scalar properties, vector properties, deformation, direction of deformation, delay trace.

#### REFERENCES

1. Zubchaninov V.G. Determining relations of the theory of inelastic processes in stress space. Message 1: Theoretical Foundations. *Problemy prochnosti*. 1992. No. 5, pp. 3–13. (In Russian).
2. Zubchaninov V.G. Determining relations of the theory of inelastic processes in stress space. Message 2: Experimental Basics. *Problemy prochnosti*. 1992. No. 6, pp. 3–12. (In Russian).
3. Zubchaninov V.G. *Mekhanika processov plasticheskikh sred* [Mechanics of processes of plastic media]. M.: Fizmatlit, 2010. 352 p.
4. Avtomatizirovannyj kompleks dlya issledovaniya uprugovyazkoplastichnyh svojstv materialov pri slozhnom nagruzhении [Automated complex for the study of elastic-viscoplastic properties of materials under complex loading]: Pat. 7202 U1 Rus. Federation No. 97108023/20 (008702) / Zubchaninov V. G., Akimov A.V., Okhlopkov N. L.; declared 20.05.1997; published 16.07.1998.
5. Zubchaninov V.G., Garanikov V.V., Ohlopkov N.L. *Eksperimental'naya plastichnost': Monografiya* [Experimental plasticity: monograph]: in 2 books. Tver: TGTU. 2003. Book 1: *Processy slozhnogo deformirovaniya* [Complex Deformation Processes]. 172 p.
6. Zubchaninov V.G., Garanikov V.V., Ohlopkov N.L. *Eksperimental'naya plastichnost': Monografiya* [Experimental plasticity: monograph]: in 2 books. Tver: TGTU, 2004. Book 2: *Processy slozhnogo nagruzheniya* [Complex loading processes]. 184 p.
7. Garanikov V.V. *Issledovanie vektornyh i skalyarnykh svojstv pri izmenenii napravleniya processa deformirovaniya*. *Fundamental'nye osnovy mekhaniki*. 2018. No. 3, pp. 112–114. (In Russian).

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*GARANIKOV Valeriy Vladimirovich* – Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Head of Department of Technical Mechanics, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: [mexanika06@yandex.ru](mailto:mexanika06@yandex.ru)

*KORNILYEV Egor Olegovich* – Assistant of Department of Technical Mechanics, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mexanika06@yandex.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Garanikov V.V., Kornilev E.O. Research of the patterns of deformation along curvilinear trajectories of constant curvature with a changing process direction // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 3 (7), pp. 17–24.



