

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ ПО КРИВОЛИНЕЙНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ

Гараников В.В., Корнильев Е.О.

Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия

Ключевые слова: инструментальная сталь, траектория, скалярные и векторные свойства, деформация, направление деформирования, след запаздывания.

Аннотация. В работе проведено экспериментальное исследование векторных и скалярных свойств при смене направления деформирования на образцах из стали 9Х2. Показано, что по истечении некоторого интервала длины траектории скалярные и векторные свойства как бы "забывают" смену направления деформирования и соответствуют траекториям без смены направления.

STUDY OF REGULARITIES OF DEFORMATION OF TOOL STEEL ALONG CURVILINEAR TRAJECTORIES

Garanikov V.V., Korniliev E.O.

Tver State Technical University, Tver, Russia

Keywords: tool steel, trajectory, scalar and vector properties, deformation, deformation direction, delay trace.

Abstract. The paper presents an experimental study of vector and scalar properties when changing the deformation direction on 9X2 steel samples. It is shown that after a certain interval of the trajectory length has been exhausted, the scalar and vector properties seem to "forget" the change in deformation direction and correspond to trajectories without changing direction.

Целью данных экспериментов, 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 были реализованы в двух программах испытаний. Испытания проводились на автоматизированном комплексе [4]. В опыте образец начале растягивался до уровня проекции траектории деформаций $\varepsilon_1 = 0.01$, а затем выполнены два витка против часовой стрелки и один виток по часовой стрелки (рис. 1).

На данном рисунке цифры в кружках отвечают началу соответствующих витков. Условные символы в виде кружка с внутренним и внешним крестиком соответствуют первому и второму витку, темный кружок – третьему, в обратном направлении. Отклик на данную траекторию представлен на рисунке 2.

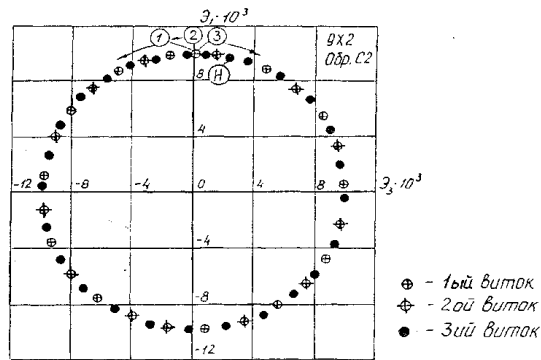


Рис. 1. Программа испытаний с изменяющимся направлением процесса

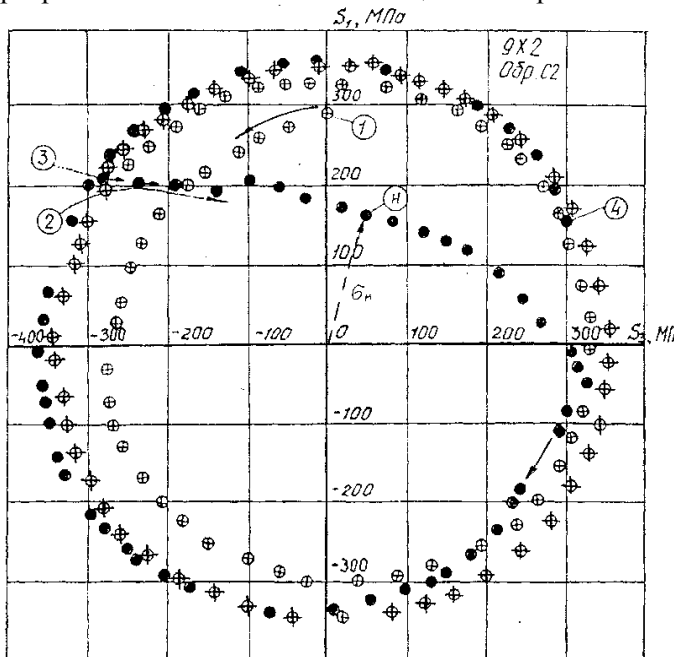


Рис. 2. Траектория нагружения

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, вначале наблюдается уменьшение модуля вектора напряжений, т.е. наблюдается разгрузка, которая заканчивается в точках, отмеченных на рисунках 2,3 буквой "H". При этом траектория напряжений S 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.

Скалярные и векторные свойства при деформировании по данной программе отражены на рисунках 3, 4. На рисунке 3 представлена диаграмма деформирования $\sigma \sim \varepsilon$, где ось σ характеризует напряжение в МПа, а ε – значение деформации. 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 характерна тем, что модуль вектора деформаций ε в процессе деформирования изменяется (рис. 3, б). Данное обстоятельство можно объяснить появлением третьей компоненты модуля вектора деформации $\varepsilon_2 \neq 0$, причем к концу данного витка эта компонента уменьшается. После смены направления процесса, происходит разгрузка, которая заканчивается в точке отмеченной буквой "Н" (рис. 3, в). Затем наблюдается рост модуля вектора напряжений до значения, соответствующего его максимального уровня на втором витке.

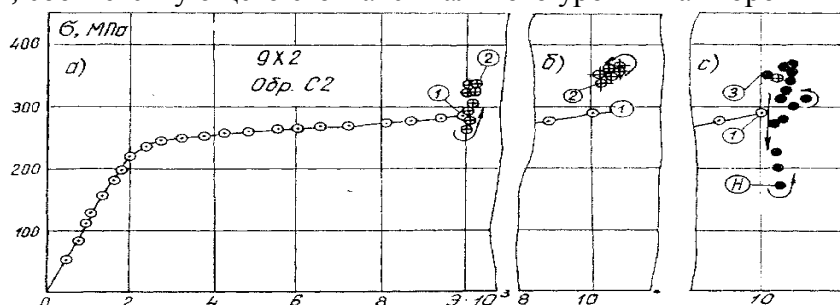


Рис. 3. Диаграмма деформирования материала

На рисунке 4 представлены зависимости угла сближения от приращения длины траектории деформации. Из данного рисунка хорошо видно, что данные зависимости с ростом ΔS стабилизируются. Начало режима $v_1 = \text{const}$ на кривых можно принять за условный след запаздывания h векторных свойств материала как функции кривизны. Для данных испытаний он составил $h = 0.015$.

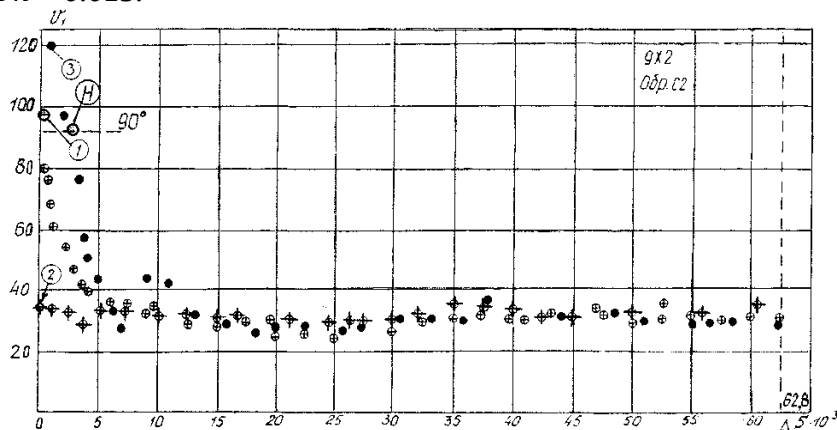


Рис. 4. Графики изменения угла сближения

Более сложная программа испытаний с периодически изменяющимся направлением процесса, состоящая из двенадцати участков, была реализована для образца С17 (рис. 5). Выход на криволинейную траекторию деформаций постоянной кривизны осуществлен после предварительного растяжения до уровня $\mathcal{E}_1 = 0.02$, разгрузки ($\sigma = 0$), а затем повторного нагружения до уровня соответствующему началу гипотетической поверхности текучести $\mathcal{E} = 0,02 - \mathcal{E}^T$ ($\sigma_{0,01}^T = 147 \text{ МПа}$, $\mathcal{E}^T = 1,19 \cdot 10^{-3}$).

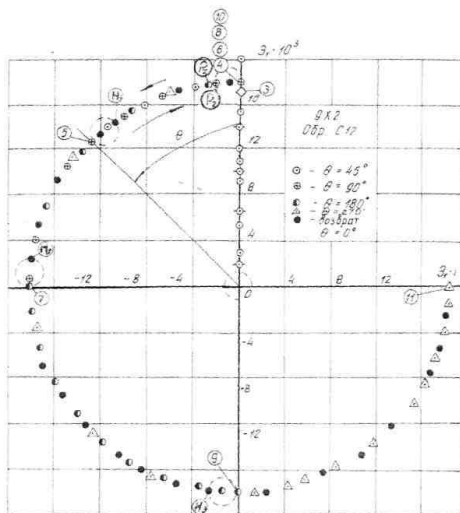


Рис. 5. Программа испытания с периодически изменяющимся направлением процесса

Испытания по криволинейной траектории состояли из трех циклов: последовательное нагружение против часовой стрелки до $\theta = 45^\circ, 90^\circ, 180^\circ; 0$; изменение направления процесса на противоположное и возврат в исходную точку. Точки 4, 6, 8 на рисунке 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.

Траектория нагружения соответствующая реализованной траектории деформаций представлена на рисунке 6.

Условные символы для каждого цикла траектории нагружения соответствуют обозначениям экспериментальных точек траекторий деформаций. Темные точки отвечают траектории напряжений после смены направления процесса. Вначале, после смены направления деформаций, наблюдается разгрузка, которая меняется на активный процесс в точках, отмеченных буквами "Н₁" 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).

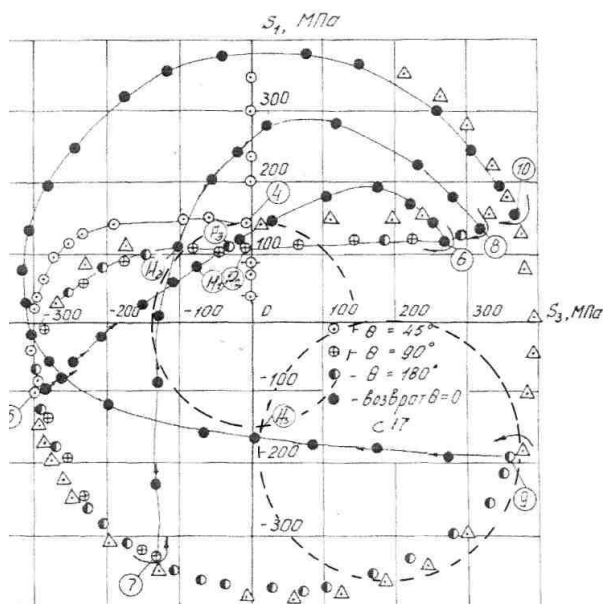


Рис. 6. Траектория нагружения

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 изучения перемещений гипотетической поверхности текучести и нагружения. На рисунках 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 (рис. 5). Как видно из данного рисунка, сколь 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. На рисунке 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 рисунке 8.

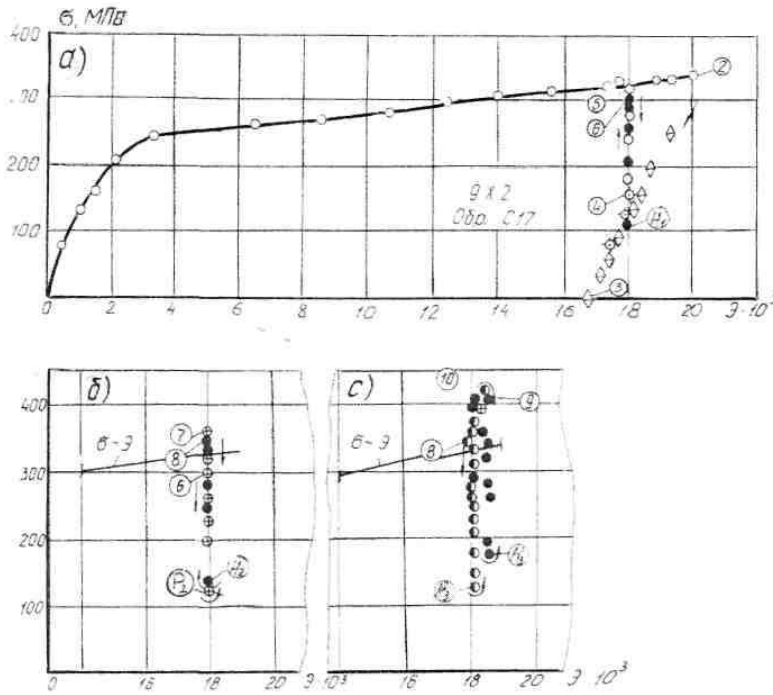


Рис. 7. Диаграмма деформирования образца

Здесь 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 $\nu_1 = 20^\circ$.

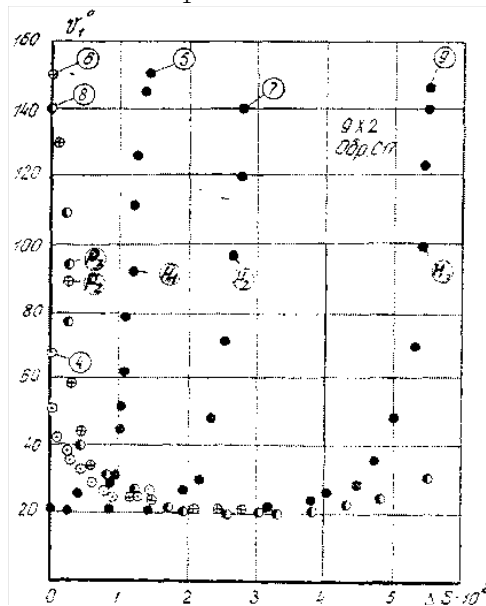


Рис. 8. Графики изменения угла сближения

Таким образом, принимая во внимание полученные экспериментальные результаты 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" смену направления деформирования и соответствуют траекториям без смены направления деформирования. Поэтому здесь можно говорить о следе запаздывания для траектории постоянной кривизны как отрезке окружности S_h , 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. Зубчанинов В.Г., Акимов А.В., Охлопков Н.Л. Автоматизированный комплекс для исследования упруговязкопластичных свойств материалов при сложном нагружении: Решение о выдаче свидетельства на полезную модель. – М.: ВНИИГПЭ, 1997. – №97108023/20(008702).
5. Зубчанинов В.Г., Гараников В.В., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: Монография. Книга 1: Процессы сложного деформирования. – Тверь: ТГТУ, 2003. – 172 с.
6. Зубчанинов В.Г., Гараников В.В., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: Монография. Книга 2: Процессы сложного нагружения. – Тверь: ТГТУ, 2004. – 184 с.
7. Гараников В.В. Исследование векторных и скалярных свойств при изменении направления процесса деформирования // Фундаментальные основы механики. – 2018. – №3. – С. 112-114.

References

1. Zubchaninov V.G. Constitutive relations of the theory of inelastic processes in stress space. Message 1: theoretical foundations // Problems of strength. 1992, no. 5, pp. 3-13.
2. Zubchaninov V.G. Constitutive relations of the theory of inelastic processes in stress space. Message 2: experimental foundations // Problems of strength. 1992, no. 6, pp. 3-12.
3. Zubchaninov V.G. Mechanics of processes of plastic media. – M.: Fizmatlit, 2010. – 352 p.
4. Zubchaninov V.G., Akimov A.V., Okhlopkov N.L. Automated complex for studying the elastic-viscoplastic properties of materials under complex loading: Decision on issuance of a certificate for a utility model. – M.: VNIIGPE, 1997. – №97108023/20(008702).

5. Zubchaninov V.G., Garanikov V.V., Okhlopkov N.L. Experimental plasticity: Monograph. Book 1: Complex deformation processes. – Tver: TSTU, 2003. – 172 p.
6. Zubchaninov V.G., Garanikov V.V., Okhlopkov N.L. Experimental plasticity: Monograph. Book 2: Complex loading processes. – Tver: TSTU, 2004. – 184 p.
7. Garanikov V.V. Study of vector and scalar properties when changing the direction of the deformation process // Fundamental foundations of mechanics. 2018, no. 3, pp. 112-114.

Гараников Валерий Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой технической механика	Garanikov Valery Vladimirovich – doctor of technical sciences, head of the department of technical mechanics
Корнильев Егор Олегович – старший преподаватель кафедры технической механика	Korniliev Egor Olegovich – senior lecturer of the department of technical mechanics
mexanika06@mail.ru	

Received 20.12.2024