

УДК 67

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОЙ РАЗГРУЗКИ
НА КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПЛОСКИХ ТРАЕКТОРИЯХ****Гараников Валерий Владимирович**
доктор технических наук**Гусакова Мария Андреевна**
соискатель**Суравков Игорь Андреевич**
соискатель

Тверской государственный технический университет, Тверь

author@apriori-journal.ru

Аннотация. В данной статье экспериментально исследована сложная разгрузка на плоских траекториях переменной кривизны типа логарифмической спирали, астроида при простых процессах. Экспериментально построены предельные поверхности текучести и нагружения. Обнаружена существенно большая кинематическая подвижность поверхности текучести (деформирования) в сравнении с поверхностью нагружения. Изменение начальной формы предельных поверхностей незначительно.

Ключевые слова: траектория, эксперимент, предельная поверхность, текучесть, логарифмическая спираль, астроида, разгрузка.

EXPERIMENTAL STUDY OF COMPLEX UNLOADING ON CURVED FLAT TRAJECTORIES

Garanikov Valery Vladimirovich
doctor of technical sciences

Gusakova Maria Andreevna
competitor

Suravkov Igor Andreevich
competitor

Tver State Technical University, Tver

Abstract. This article studied experimentally difficult unloading on flat trajectories of variable curvature such as a logarithmic spiral, astroid in simple processes. Experimentally constructed marginal yield surface and loading. It found no significant large kinematic mobility of the surface flow (deformation) in comparison with the surface loading. Change the initial form limiting surfaces slightly.

Key words: trajectory, experiment, limit surface, flowability, logarithmic spiral, astroid, unloading.

В данной работе приведены систематические экспериментальные исследования закономерностей изменения скалярных и векторных свойств металлов на плоских криволинейных траекториях напряжений и деформаций. Исследования выполнены на автоматизированном расчетно-экспериментальном комплексе [1]. Данный комплекс разработан группой авторов в лаборатории механических испытаний кафедры сопротивления материалов Тверского государственного технического университета под руководством профессора В.Г. Зубчанинова.

Комплекс состоит из нагружающей установки, реализующей трехпараметрическое воздействие на образец (осевая сила, кручение и внутреннее давление), датчиков усилий и деформаций, управляющей ЭВМ типа IBM PC и устройства связи с объектом (УСО). Механическая часть выполнена на базе испытательной машины ЦДМУ-30 и включает замкнутую силовую раму с размещенными на ней элементами крепления образца и приводами реализуемых усилий. В процессе автоматизации установки регулятор давления (РД) гидросистемы был дополнен приводом, управление которым осуществлялось программно с блока задающего параметры нагружения. Аналогично была проведена модернизация гидростанции внутреннего давления подводимого в образец. Механическая часть привода кручения была взята за основу. Более подробное описание комплекса представлено в монографиях [2; 3].

Образцы имели толщину стенки $h = 1$ мм, радиус срединной поверхности $R = 15,5$ мм, длину рабочей части $L = 6R$ и были изготовлены точением из одного прутка стали 9Х2. Методика испытаний подробно описана в работе [2]. Эксперименты по сложному деформированию материала осуществлены в плоскости Θ_1 - Θ_3 девиаторного подпространства деформаций А.А. Ильюшина по траекториям в виде логарифмической спирали и астроида в соответствии с зависимостями:

$$\Theta_1 = \Theta \cdot \cos \Theta, \quad \Theta_3 = -\Theta \cdot \sin \Theta, \quad \Theta = \Theta_0 \cdot \exp(-k \Theta), \quad (1)$$

$$\Theta_1 = \Theta_0 \cdot \cos^3 \Theta, \quad \Theta_3 = \Theta_0 \cdot \sin^3 \Theta, \quad (2)$$

где Θ_0 – уровень предварительной деформации, Θ – переменный радиус спирали, θ – угол, отсчитываемый от положительного направления оси Θ_1 против хода часовой стрелки; $k = \operatorname{tg} \beta = 1 / \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const}$; α – угол между касательной к траектории деформаций и ее радиус-вектором. На рис. 1 представлены реализованные траектории деформаций по логарифмическим спиральям.

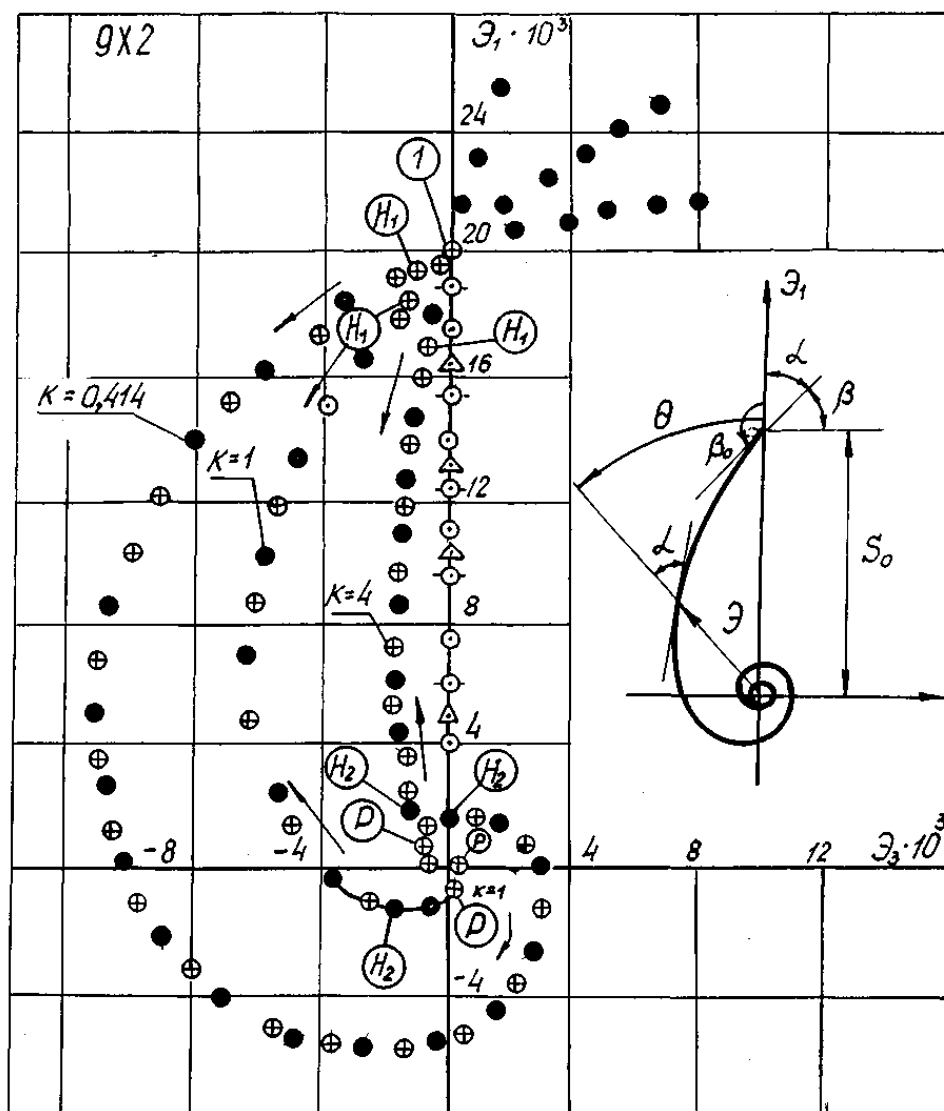


Рис. 1. Траектории по типу логарифмических спиралей

Предварительное простое нагружение осуществлялось до заданного уровня $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_0 = 0.02$, (кружки с точками), простой полной разгрузки (треугольники) и затем следовала простая полная разгрузка (треугольники) и повторное нагружение до прежнего уровня (кружки с внешними крестиками). После этого реализовывались программы сложного деформирования по логарифмическим спиралям с уменьшением модуля вектора деформаций \mathcal{E} (кружки с внутренними крестиками). Точка, отмеченная цифрой 1 в кружке, отвечает началу процесса сложной разгрузки ($dA < 0$) с углами излома траектории $\beta_0 = 166^\circ; 135^\circ; 112,4^\circ$ и началу про-

тыкания поверхности текучести. Условием активного деформирования в работе приняты:

$$dA = \sigma \cdot dS \cdot \cos \nu_1 > 0 \quad (3)$$

где σ – модуль вектора напряжений, S – длина дуги траектории деформаций, ν_1 – угол сближения (угол между вектором напряжений и касательной к траектории деформаций). Так как $\sigma > 0$, $dS > 0$, то при угле сближения $\nu_1 < 90^\circ$ элементарная работа $dA > 0$.

После завершения скрутки спиралей к началу координат ($\mathcal{E} = 0$) происходила раскрутка траектории в обратном направлении, что отмечено на рисунке темными кружками. В последнем случае модуль вектора деформации \mathcal{E} монотонно возрастал.

На рис. 2 отражены скалярные свойства материала для одной из реализованных траекторий сложного деформирования.

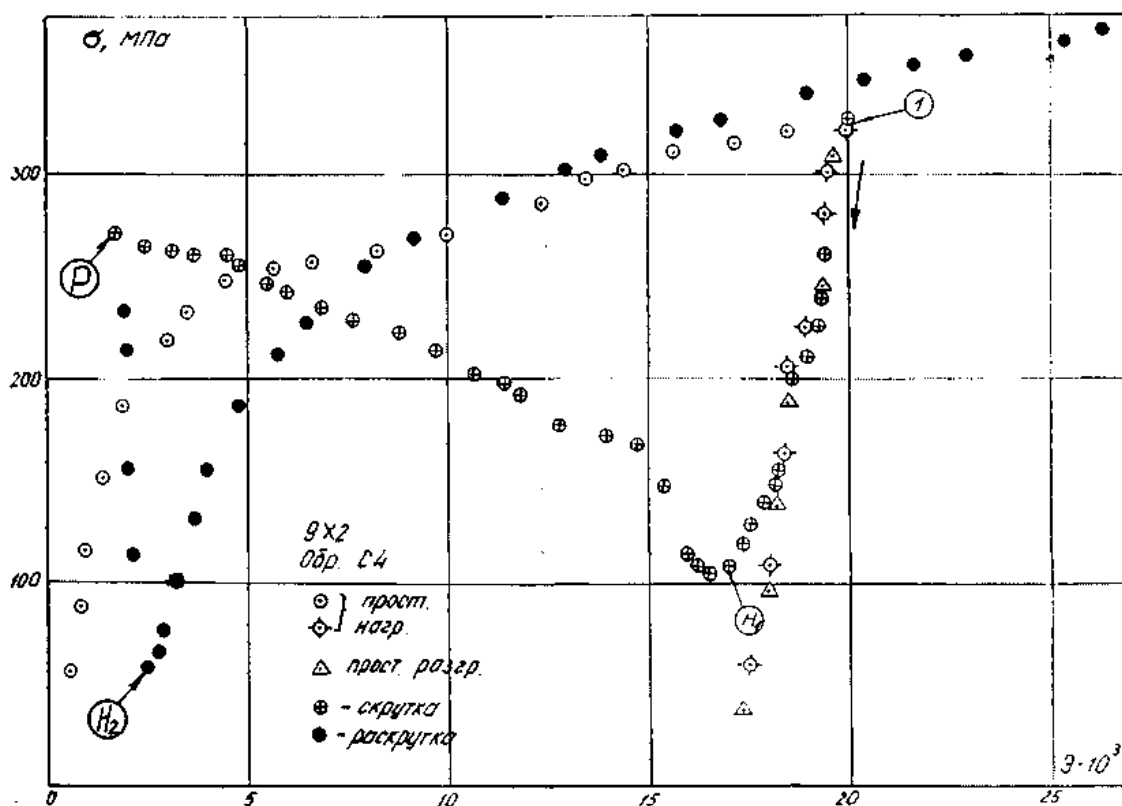


Рис. 2. Диаграмма деформирования ($k = 4$)

После простого деформирования до уровня $\Theta = 0,02$ (кружочки), простой разгрузки (треугольники) и последующей простой догрузки (кружки с внешним крестиком) производилась сложная разгрузка по траектории в виде логарифмической спирали (кружки с внутренним крестиком). Буквой H_1 отмечен момент завершения пассивного процесса сложной разгрузки и начало нового активного процесса деформирования при продолжающейся скрутке траектории по логарифмической спирали. Как видим, экспериментальные точки, отвечающие сложной разгрузке (кружочки с внутренним крестиком) и простой (треугольники) практически совпадают. Это позволяет сделать важный вывод о том, что процессы разгрузки при сложном и простом деформировании практически друг от друга не отличаются вплоть до момента окончания «протыкания» поверхности текучести. После точки H_1 с началом активного процесса деформирования происходит резкое изменение характера зависимости модулей векторов напряжений σ и деформаций Θ . При уменьшении модуля вектора деформаций Θ происходит увеличение модуля вектора напряжений σ , т.е. происходит процесс упрочнения материала, и последующей упругой разгрузки при несколько увеличивающемся значении Θ , что также необычно. Затем при раскрутке траектории процесс деформирования снова становится активным.

На рис. 3 представлена реализованная траектория деформаций вида астроида. После простого нагружения (кружки с точкой), разгрузки (треугольники) и повторной нагрузки (кружки с внешними крестиками) до прежнего уровня $\Theta_1 = \Theta_0 = 0,02$, осуществлялось сложное деформирование по траектории в виде астроида. Точка, отмеченная буквой «А» в кружке, соответствует началу сложного процесса деформирования и сложной разгрузки. Стрелка указывает направление процесса. Условные символы в виде кружков с крестиком, полузатемненных и полностью темных отвечают соответственно первому, второму и третьему витку. Буквами « H_k » ($k = 1, 2, 3, 4$) отмечены точки начала активного процесса деформирования ($dA > 0$), который продолжается вплоть до очередной угловой точки.

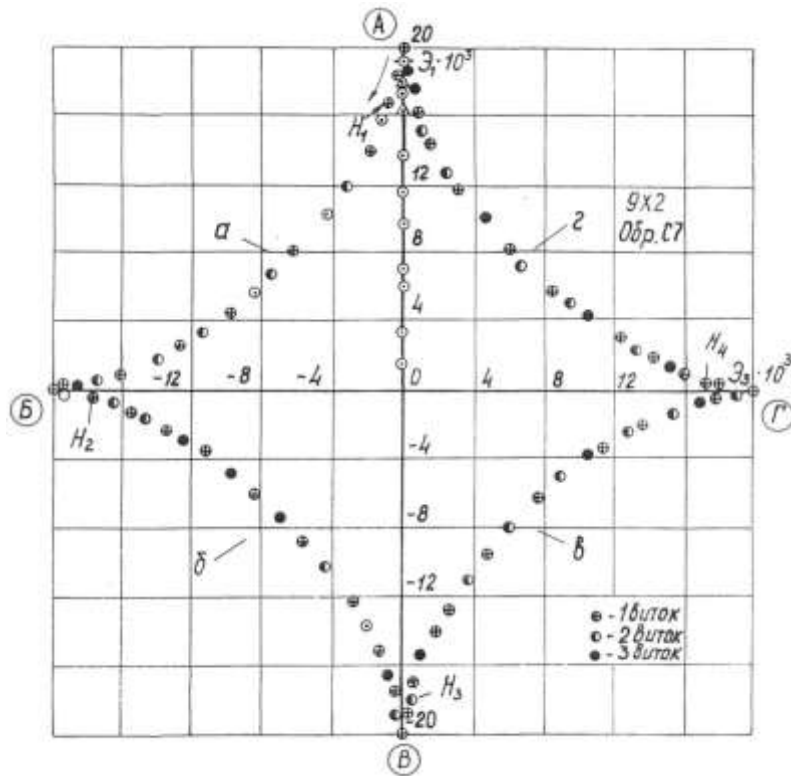


Рис. 3. Траектория деформаций типа астроида

На рис. 4 представлен отклик на данную траекторию деформаций в виде траектории напряжения. На данном рисунке показаны экспериментальные точки для первых двух витков астроида (первый виток – кружки с крестиком; второй – полутемный кружок). Цифры 1 и 2 в кружках отвечают соответственно началу первого и второго витка.

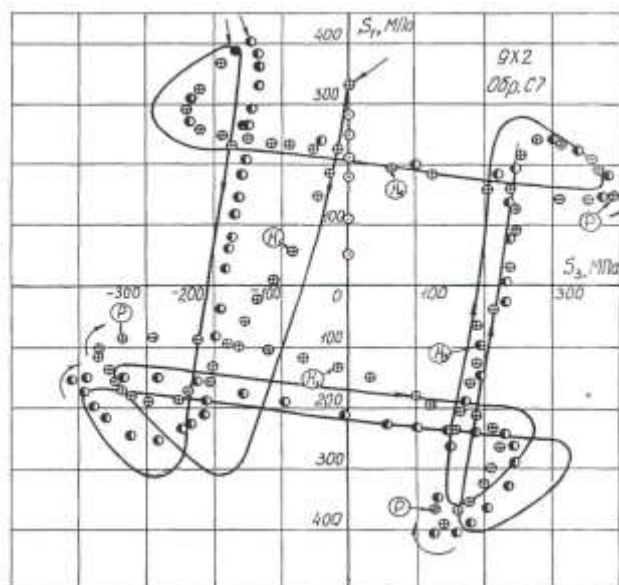


Рис. 4. Траектория напряжения

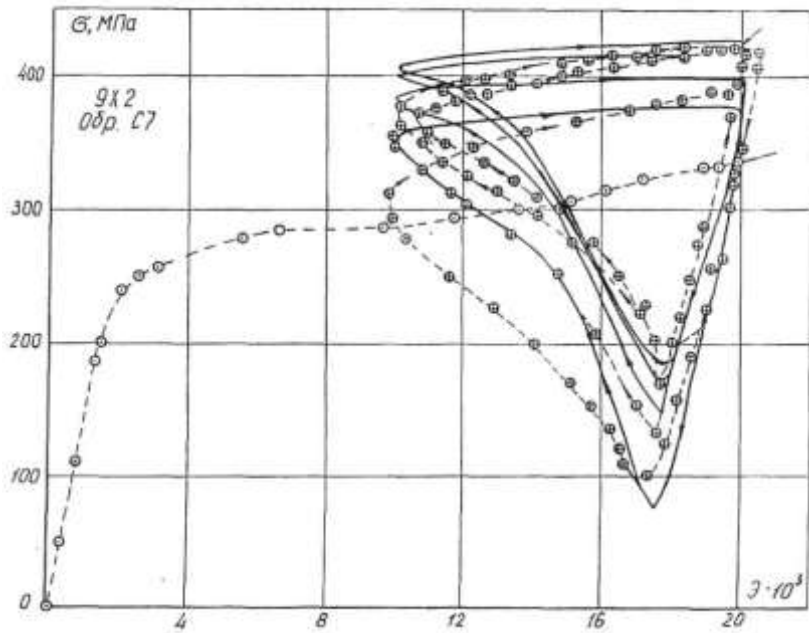


Рис. 5. Диаграмма деформирования материалов

В первой и второй четверти диаграммы деформирования для первого и второго витка различаются, затем это различие уменьшается и в конце второго витка они практически совпадают. Как видно из рис. 5, Экспериментальные точки, отвечающие участкам сложной и простой разгрузки, практически совпадают, что позволяет распространить ранее сделанный вывод о совпадении законов сложной и простой разгрузки для логарифмической спирали также и на траекторию в виде астроида. Данные петли для первого витка в процессе деформирования по участкам астроида несколько смещаются в направлении оси σ , что связано с упрочнением материала.

На основе результатов экспериментальных исследований сложной разгрузки на траекториях вида логарифмической спирали, астроида, а также опытов при простых процессах, экспериментально построены предельные поверхности текучести и нагружения, которые представлены на рис. 6. Сплошными линиями показаны начальные поверхности текучести и нагружения при допуске на остаточную деформацию при растяжении $\epsilon = 0.005\%$. Условные символы отвечают испытаниям по траекториям типа логарифмической спирали (кружки с точкой), астроида –

кружок с крестиком. Темные кружки соответствуют испытаниям на простое растяжение, сжатие до возникновения активного упругопластического процесса. Пунктирная линия является огибающей экспериментальных точек и представляет новое положение поверхностей нагружения и текучести. Обнаружена существенна большая кинематическая подвижность поверхности текучести (деформирования) в сравнении с поверхностью нагружения, а также незначительное изменение начальной формы предельных поверхностей.

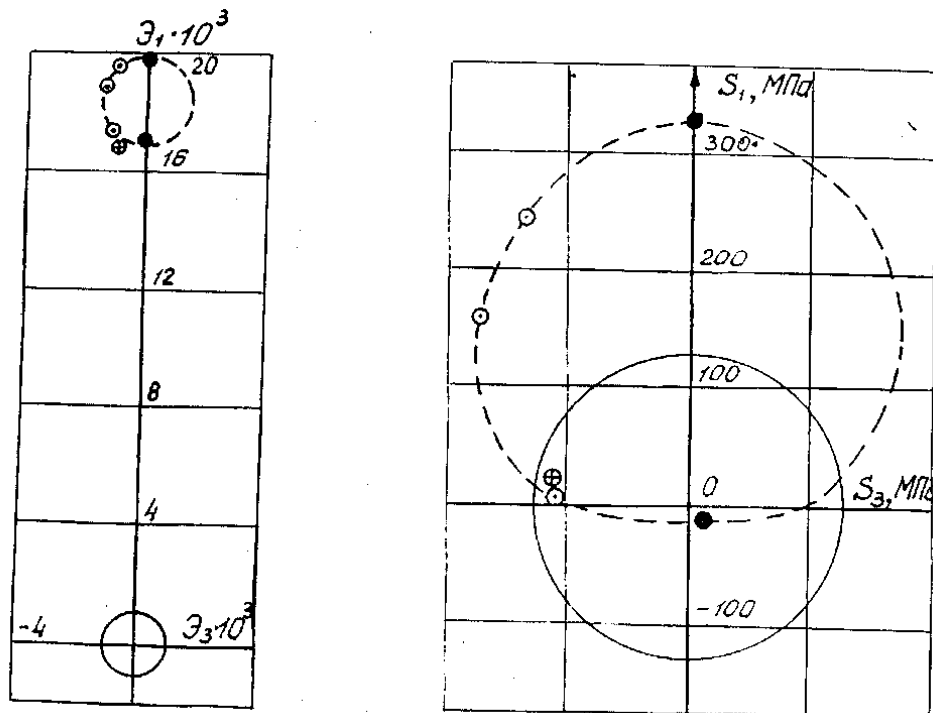


Рис. 6. Поверхности текучести и нагружения

Список используемых источников

1. Зубчанинов В.Г. Автоматизированный комплекс для исследования упруговязкопластичных свойств материалов при сложном нагружении. Решение о выдаче свидетельства на полезную модель / В.Г. Зубчанинов, А.В. Акимов, Н.Л. Охлопков. М.: ВНИИГПЭ, 1997. № 97108023/20(008702).
2. Гараников В.В., Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: Монография. Кн. 1: Процессы сложного деформирования. Тверь: ТГТУ, 2003, 172 с.
3. Гараников В.В., Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: Монография. Кн. 2: Процессы сложного нагружения. Тверь: ТГТУ, 2004, 184 с.