

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕКУЧЕСТИ И НАГРУЖЕНИЯ НА ПЛОСКИХ ТРАЕКТОРИЯХ

Гараников В.В., Корнильев Е.О.

Тверской государственный технический университет, г.Тверь

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

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

RESEARCH OF THE BEHAVIOR OF LIMIT YIELD SURFACE AND LOADING ON FLAT TRAJECTORIES

Garanikov V.V., Kornilev E.O.

Tver State Technical University, Tver

Keywords: trajectory, limit surface, yield, mobility, logarithmic spiral, astroid.

Abstract. This article is devoted to experimental investigation of behavior of limit yield surface and loading on flat trajectories of variable curvature, that is type of logarithmic spiral, astroids in simple processes. It was detected significantly larger kinetic mobility of yield surface (deformation) as compared with loading surface. Change in initial form of limit surface is minor.

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 Зубчанинова В.Г.

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 \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3 девиаторного подпространства деформаций А.А.Ильюшина по траекториям в виде логарифмической спирали и астроида в соответствии с зависимостями:

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E} \cdot \cos \Theta, \quad \mathcal{E}_3 = -\mathcal{E} \cdot \sin \Theta, \quad \mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cdot \exp(-k \Theta), \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_0 \cdot \cos^3 \Theta, \quad \mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_0 \cdot \sin^3 \Theta, \quad (1)$$

где \mathcal{E}_0 - уровень предварительной деформации, \mathcal{E} - переменный радиус спирали, θ - угол, отсчитываемый от положительного направления оси \mathcal{E}_1 против хода часовой стрелки; $k = \text{tg } \beta = 1/\text{tg } \alpha = \text{const}$; α - угол между касательной к траектории деформаций и ее радиус-вектором. На рисунке 1 представлены реализованные траектории деформаций по логарифмическим спиральям.

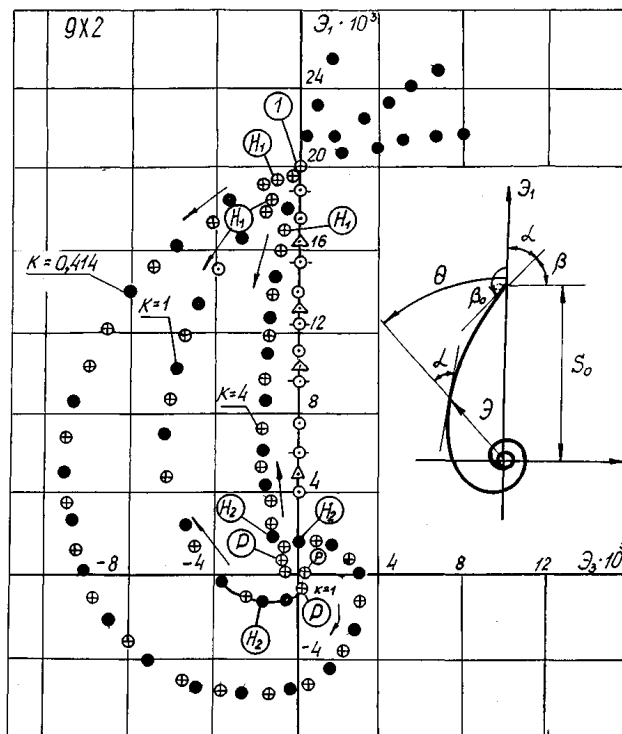


Рис. 1. Реализованные траектории деформаций по логарифмическим спиральям

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 протыкания 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.

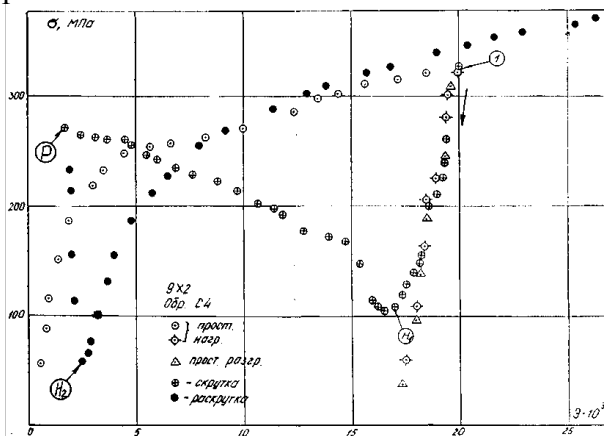


Рис. 2. Диаграмма деформирования ($k=4$)

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

После простого деформирования до уровня $\mathcal{E} = 0,02$ (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 \mathcal{E} . При уменьшении модуля вектора деформаций \mathcal{E} происходит увеличение модуля вектора напряжений σ , т.е. происходит процесс упрочнения материала, и последующей упругой разгрузки при несколько увеличивающемся значении \mathcal{E} , что также необычно. Затем при раскрутке траектории процесс деформирования снова становится активным.

На рисунке 3 представлена реализованная траектория деформаций вида астроида.

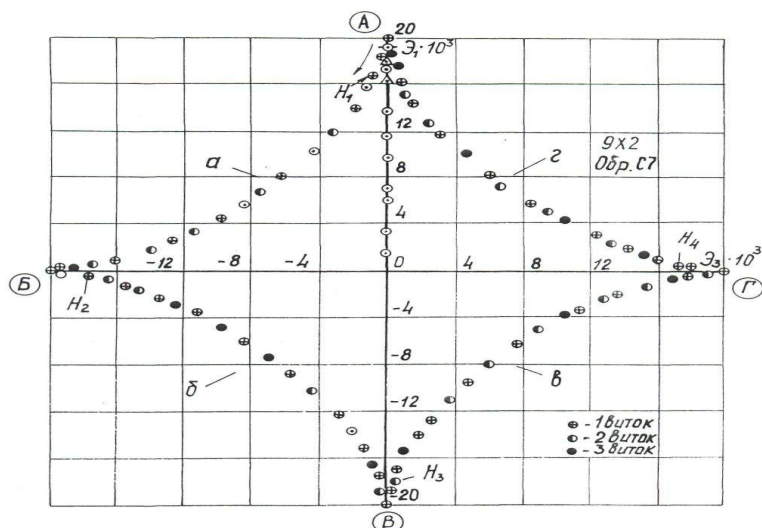


Рис. 3. Траектория деформаций типа астроида

После простого нагружения (кружки с точкой), разгрузки (треугольники) и повторной нагрузки (кружки с внешними крестиками) до прежнего уровня $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_0 = 0,02$, осуществлялось сложное деформирование по траектории в виде астроида. Точка отмеченная буквой "А" в кружке соответствует началу сложного процесса деформирования и сложной разгрузки. Буквами " H_k " ($k=1,2,3,4$) отмечены точки начала активного процесса деформирования ($dA > 0$), который продолжается вплоть до очередной угловой точки.

На рисунок 4 представлена диаграмма деформирования для астроида. В первой и второй четверти диаграммы деформирования для первого и второго витка различаются, затем это различие уменьшается. Как видно из данного рисунка 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. Что полностью находится в соответствии с концепциями представленными ранее

в работах [4-6]. Данные петли для первого витка в процессе деформирования по участкам астроида несколько смещаются в направлении оси σ , что связано с упрочнением материала.

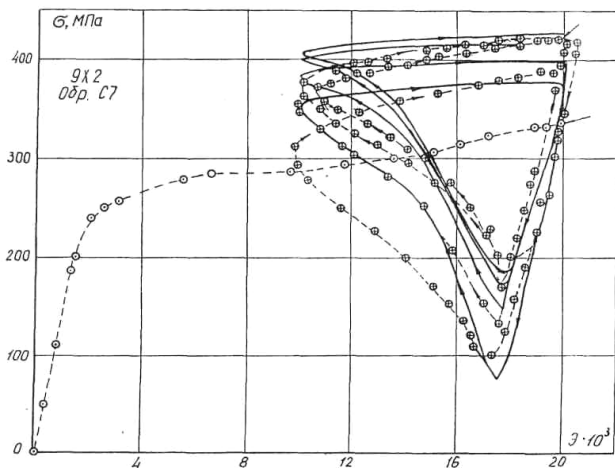


Рис. 4. Диаграмма деформирования

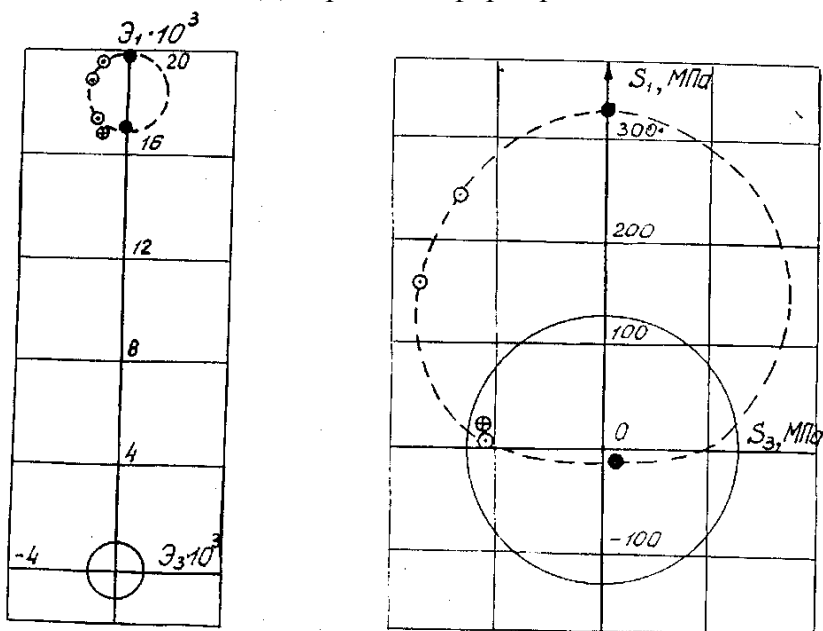


Рис. 5. Поверхности текучести и нагружения

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 рисунке 5. 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 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.

Список литературы

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(08702).
2. Гараников В.В., Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: Монография. Книга 1: Процессы сложного деформирования. Тверь: ТГТУ, 2003. 172 с.
3. Гараников В.В., Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: Монография. Книга 2: Процессы сложного нагружения. Тверь: ТГТУ, 2004. 184 с.
4. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: Изд-во МГУ, 1990. 310 с.
5. Зубчанинов В.Г. Механика процессов пластических сред. М.: Физматлит, 2010. 352с.
6. Зубчанинов В.Г. Определяющие соотношения теории неупругих процессов в пространстве напряжений. Сообщение 2: экспериментальные основы // Проблемы прочности. 1992. №6. С.3-12.

References

1. Zubchaninov V.G Automated system for the study of elastic- viscous-plastic properties of materials under complex loading. The decision on granting the certificate on useful model / V.G. Zubchaninov, A.V. Akimov, N.L. Ohlopkov. M.: VNIIGPE, 1997. No/ 97108023/(0088702).
2. Garanikov V.V., Zubchaninov V.G., Ohlopkov N.L. Experimental plasticity: A monograph. Book 1: The processes of complex deformation. Tver: TSTU, 2003. 172 p.
3. Garanikov V.V., Zubchaninov V.G., Ohlopkov N.L. Experimental plasticity: A monograph. Book 2: Complex Loading Processes. Tver: TSTU, 2004. 184 p.
4. Ilyushin A.A. Continuum mechanics. M.: Moscow State University Publishing House, 1990. 310 p.
5. Zubchaninov V.G. Mechanics of processes of plastic media. M.: Fizmatlit, 2010. 352p.
6. Zubchaninov V.G. Constitutive relations of the theory of inelastic processes in stress space. Communication 2: experimental foundations // Problems of strength. 1992. No. 6. P.3-12.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Гараников Валерий Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедры «Техническая механика», mexanika06@mail.ru	Garanikov Valeriy Vladimirovich – doctor of technical sciences, professor, head of department «Technical mechanics», mexanika06@mail.ru
Корнильев Егор Олегович – ассистент кафедры «Техническая механика»	Kornilyev Egor Olegovich – assistant of department «Technical mechanics»
Тверской государственный технический университет, г.Тверь, Россия	Tver State Technical University, Tver, Russia

Получена 30.09.2021