

- энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии : ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200029077>. – Дата доступа: 15.09.2023.
6. Энергосберегающие, экологически чистые технологии теплоснабжения производственных и жилых помещений [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: <http://www.ekip-tnu.ru>. – Дата доступа: 09.04.2025.
 7. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии : ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ» [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200029077>. – Дата доступа: 15.09.2024.
 8. Здитовецкая, С. В. Оценка эффективности циклов парокомпрессионного теплового насоса с альтернативными хладагентами / С. В. Здитовецкая // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2022. – № 2. – С. 68–73.
 9. Толстый, О. В. Оценка термодинамической эффективности цикла теплового насоса / О. В. Толстый, О. Б. Тихонова, Д. В. Русяков. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 20 (124). – С. 207–210. – URL: <https://moluch.ru/archive/124/34307/>. – Дата доступа: 13.05.2025.
 10. Антипов, Ю. А. Влияние температур низкопотенциального источника и потребителя теплоты на эффективность теплового насоса / Ю. А. Антипов [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – Т. 20. № 1. – С. 14–19. DOI10.22363/2312-8143-2019-20-1-14-19.
 11. Калькулятор тепловых насосов [Электронный ресурс]. – URL: <https://e-solarpower.ru/kalkulyator-teplovyyh-nasosov>. – дата доступа: 09.11.2024.
 12. Диаграммы хладагента R134a [Электронный ресурс]. – URL: <http://holod-proekt.com/informants/refrigerants-diagrams/refrigerant-r134a-diagrams/>. – Дата доступа: 20.09.2024.

УДК 579.373

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПО ПЛОСКИМ ТРАЕКТОРИЯМ С КРИВОЛИНЕЙНЫМИ УЧАСТКАМИ

Алексеева Е. Г., к.т.н., доц.

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
г. Москва, Российская Федерация*

Реферат. Рассмотрена задача о сложном деформировании материала стали 45 по плоской трехзвенной траектории, содержащей прямолинейные и криволинейные звенья постоянной кривизны. При решении задачи используются общая и линеаризованная математические модели пластического деформирования материалов В. Г. Зубчанинова при сложном нагружении. Для верификации математических моделей результаты теоретических расчётов сравниваются с экспериментальными данными на экспериментальном комплексе СН-ЭВМ.

Ключевые слова: пластичность, траектория деформирования, экспериментальные данные, моделирование процесса деформирования

В теории процессов пластического деформирования А. А. Ильюшина [1, 2] определяющие соотношения математической модели, предложенной В. Г. Зубчаниновым для плоских траекторий примут вид

$$\begin{cases} \frac{dS_k}{d\tau} = M_1 \frac{d\Theta_k}{d\tau} + \dot{s} M \frac{S_k}{\sigma}, \\ \frac{d\Theta_1}{d\tau} = -\dot{s} \left(\frac{M_1}{\sigma} \sin \Theta_1 + \kappa_1 \right), \end{cases} \quad (1)$$

где S_k, Θ_k – компоненты векторов напряжений и деформаций в пятимерных девиаторных пространствах, σ – модуль вектора напряжений; κ_l – кривизна траектории деформаций; s – длина дуги траектории деформирования; ϑ_l – угол сближения (угол между вектором напряжений и касательной к траектории); τ – обобщенный параметр прослеживания процесса;

$$M = \frac{d\sigma}{ds} - M_1 \cos \vartheta_1, \quad M_1 = 2G_p + (2G - 2G_p^0) f^q e^{-\gamma \Delta s}, \quad (2)$$

Для функционалов процесса упругопластического деформирования в общей математической модели теории процессов предлагается использовать аппроксимации [3]

$$\begin{aligned} \sigma &= \Phi(s) + A f_0^p \Omega(s), \quad \frac{d\sigma}{ds} = \frac{d\Phi}{ds} + A f_0^p \Omega'(s), \\ M_1 &= 2G_p + (2G - 2G_p^0) f^q e^{-\gamma \Delta s}, \quad M = \frac{d\sigma}{ds} - M_1 \cos \vartheta_1. \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta s = s - s_0$; $2G$ – удвоенный модуль сдвига; $2G_p$ – удвоенный пластический модуль;

$$f = \frac{1 - \cos \vartheta_1}{2} \quad (4)$$

– функция сложности процесса, $\Omega(s)$ – функция, описывающая «нырок» напряжений,

$$\sigma = \Phi(s) = \begin{cases} \frac{2G}{\alpha} (1 - e^{-\alpha s}), & \text{при } 0 \leq s \leq s_*^T, \\ \sigma^T + 2G_*(s - s_*^T) + \sigma_* (1 - e^{-\beta(s - s_*^T)}), & \text{при } s > s_*^T, \end{cases} \quad (5)$$

– универсальная функция упрочнения, используемая для аппроксимации диаграмм прослеживания процессов и диаграмм деформирования при простом нагружении; $\sigma^T = \sqrt{2/3} \sigma_T$; σ_T – предел текучести при растяжении, $s_*^T = \Theta^T$ – соответствующая ему деформация; $A, p, q, \gamma, \beta, \alpha, G_*, \sigma_*$ – параметры, определяемые из базовых экспериментов. Индекс «нолик» относится к величинам в точке излома траектории.

Задача определения напряжений по заданной траектории деформирования сведена к задаче Коши с известными начальными условиями для каждого участка аналитических траекторий. Определяющие соотношения (1) при заданных аппроксимациях были проинтегрированы численно методом Рунге–Кутты четвертого порядка точности.

В линеаризованной модели [3] процессов сложного пластического деформирования при активном процессе деформирования для плоских траекторий функционалы процесса определяются приближенными формулами

$$M_1 = \sigma \left(k + \frac{1}{s} \right), \quad M = \frac{d\sigma}{ds} - M_1 \cos \vartheta_1, \quad (6)$$

где $k = \text{const}$ – экспериментально определяемый параметр. Полученные результаты позволят оценить достоверность линеаризации при сравнении с данными эксперимента и расчетом по общей модели.

Экспериментальное исследование проведено на автоматизированном расчетно-экспериментальном комплексе СН-ЭВМ, реализующем трехпараметрическое воздействие на образец (осевое растяжение–сжатие, кручение и внутреннее давление). В качестве образца использована тонкостенная цилиндрическая оболочка из стали Ст3 в состоянии поставки, имеющая в рабочей части: длину $l = 110$ мм, толщину $h = 1$ мм и диаметр срединной поверхности $d = 31$ мм.

Программа эксперимента при жестком нагружении представляет собой в девиаторном пространстве деформаций $\Theta_1 - \Theta_3$ трехзвенную траекторию с прямолинейными и криволинейными участками постоянной кривизны. Согласно программе деформирования, приведенной на рисунке 1, на первом прямолинейном звене реализовывалось кручение до значения $s_0 = 2$ %, на втором звене происходил излом на 90° и реализовывалась траектория в виде окружности радиуса 2 %. На третьем звене после полного оборота окружности траектория

плавно без излома переходила в прямую линию, параллельную оси $\mathcal{E}_I$. На рисунках 1–4 приведены результаты расчетов и эксперимента по вышеизложенным математическим моделям.

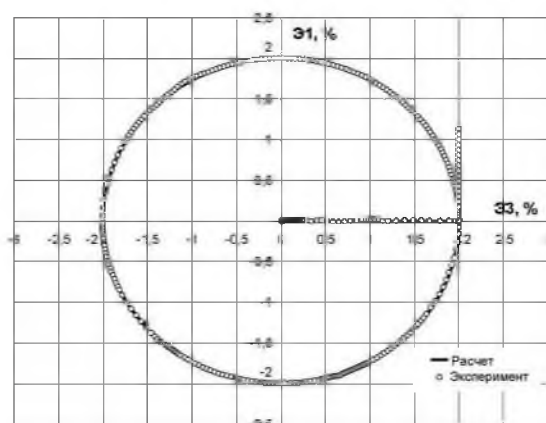


Рисунок 1 – Программа деформирования

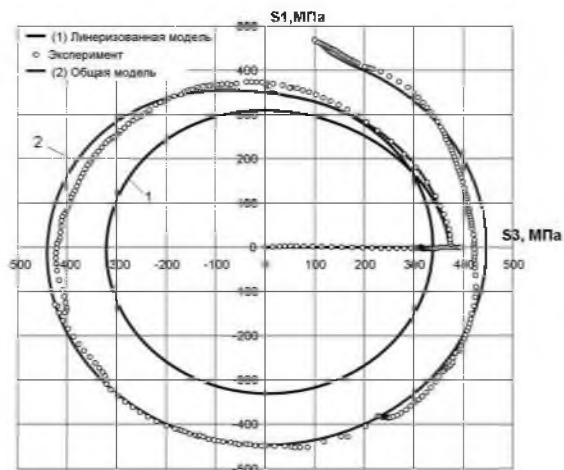


Рисунок 2 – Отклик в пространстве напряжений $S_I - S_3$

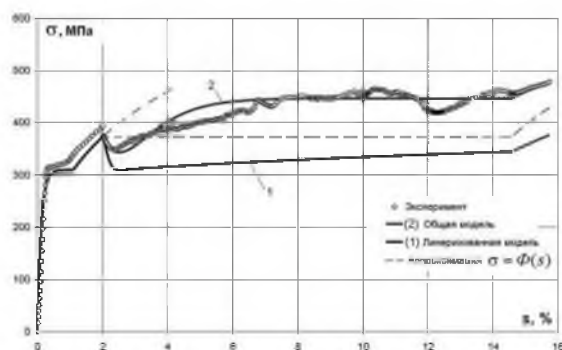


Рисунок 3 – Диаграмма прослеживания процесса деформирования $\sigma - s$

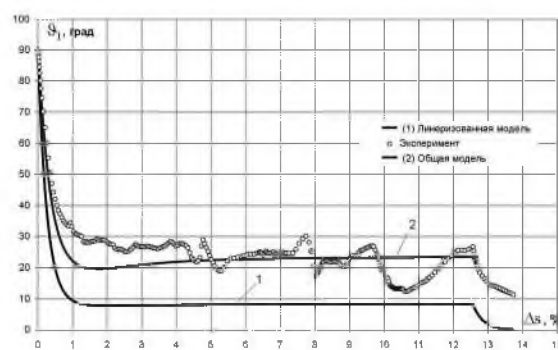


Рисунок 4 – Диаграмма $\theta_I - \Delta s$

Расчетные и экспериментальные результаты приводятся в векторном представлении напряжений и деформаций А. А. Ильюшина [1–2]. На рисунке 2 приведен отклик на реализованную траекторию деформирования в плоскости $S_I - S_3$ девиаторного пространства напряжений, на рисунке 3 приведена диаграмма $\sigma - s$. Цифрой 1 на рисунках обозначен расчет по линеаризованной модели, цифрой 2 – расчет по общей математической модели теории процессов. Экспериментальные точки отмечены кружочками.

Как видно из рисунков, численные расчеты с использованием метода Рунге–Кутты четвертого порядка точности по общей модели достаточно хорошо соответствуют экспериментальным данным. В этих расчетах параметры, входящие в аппроксимации функционалов процесса (3), были подобраны из условия соответствия экспериментальным данным. Линеаризованная модель дает большие отклонения как по скалярным, так и по векторным свойствам.

Приведенное сопоставление расчетных и экспериментальных данных дает основание считать, что общая математическая модель теории процессов В. Г. Зубчанинова [3] достоверно описывает закономерности поведения материала для данного класса траекторий. Расчет по линеаризованной модели при показателе сложности процесса (угле излома траектории) $\theta_o^I = 90^\circ$ не дает достоверных результатов.

1. Ильюшин, А. А. Основы общей математической теории. / А. А. Ильюшин. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 271 с.
2. Зубчанинов, В. Г. Математическая теория пластичности / В. Г. Зубчанинов. – Тверь, ТГТУ, 2003. – 300 с.
3. Зубчанинов, В. Г. Механика процессов пластических сред / В. Г. Зубчанинов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 352 с.

4.8 Технология машиностроения

УДК 621:658.512

ПОРЯДОК НАЗНАЧЕНИЯ СИСТЕМ РАБОЧИХ КООРДИНАТ WCS ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ОБРАБОТКИ ПАРТИЙ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Беляков Н. В.¹, к.т.н., доц., Попок Н. Н.², д.т.н., проф., Якушев М. А.¹, студ.

¹Витебский государственный технологический университет,
г. Витебск, Республика Беларусь

²Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
г. Новополоцк, Республика Беларусь

Реферат. В статье рассмотрены механизмы формирования погрешности схемы установки при обработке партий заготовок деталей на станках с ЧПУ. Предложена формализованная последовательность проектных процедур, при реализации которой создаются условия для минимизации погрешности схемы установки, а также определения рационального состава установочных и установочно-зажимных элементов для базирования заготовок на металлорежущих станках с ЧПУ.

Ключевые слова: базирование, схема установки, размерная настройка, погрешность, система координат, Work Coordinate System, WCS, ЧПУ.

При проектировании технологических наладок для обработки партии заготовок деталей на станках с ЧПУ важнейшее влияние на обеспечение точности линейных размеров и допусков расположения оказывает размещение системы рабочих координат (Work Coordinate System (WCS)) относительно конструктивных элементов заготовки (то есть собственной или базовой системы координат), а также ее положение относительно опорной (установочной) системы координат (привязанной к установочным элементам) [1]. При этом желательно совместить опорную систему координат с WCS, чтобы не создавать условия для возникновения погрешности схемы установки – меры несовпадения опорной системы координат и WCS. Причиной возникновения погрешности схемы установки являются погрешности размеров объекта производства, которые получены на этапах обработки, предшествующих рассматриваемому.

Например, на операции фрезерования уступов выполняются размеры A_2 , B_2 и C_2 (рис. 1), для чего с использованием команды G55 сформирована нулевая точка детали (размещена система координат WCS). При программировании и последующей обработке режущие кромки фрезы устанавливаются относительно нулевой точки на расстояния, соответствующие размерам настройки A_n , B_n и C_n . При выполнении размеров A_2 и B_2 оси Y_y и Z_y опорной системы координат не совпадают с осями Y и Z WCS. Следовательно, имеются условия для возникновения погрешности схемы установки по этим размерам. До рассматриваемой операции в направлении осей Y и Z ранее были выполнены размеры A_1 и B_1 с допусками TA_1 и TB_1 . Поскольку размеры настройки A_n и B_n остаются постоянными для всей обрабатываемой партии деталей и другие погрешности в данной задаче не учитываются, то A_2 и B_2 могут изменяться только в