УДК 621.77.016

Г.М. Журавлев, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (Тула) (e-mail: mcgeen4@gmail.com)

Н.Н. Сергеев, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (Тула) (e-mail: technology@tspu.tula.ru)

А.Е. Гвоздев, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (Тула) (e-mail: technology@tspu.tula.ru)

А.Н. Сергеев, д-р пед. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (Тула) (e-mail: ansergueev@mail.ru)

Е.В. Агеева, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: ageeva-ev@ yandex.ru)

Д.В. Малий, ФГБОУ ВО «ТГПУ им. Л.Н. Толстого» (Тула) (e-mail: maliydmitriy@yandex.ru)

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ПРОЦЕССОВ ВЫТЯЖКИ С УТОНЕНИЕМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА

Представленная система дифференциальных уравнений для анализа осесимметричного пластического течения процессов вытяжки с утонением из дилатирующего материала и использование точных методов решения позволяют проводить оценку силовых режимов с полным анализом напряженно-деформированного состояния.

На основе полученных полей распределения деформаций и напряжений с использованием пакета программ и положений механики рассеянной повреждаемости можно провести компьютерное моделирование процесса вытяжки с утонением и довольно точно рассчитать деформационную повреждаемость ω, существенно влияющую на эксплуатационные свойства готовых изделий и формирование эксплуатационных свойств в готовой детали.

Полученные результаты по изучению динамики повреждаемости позволяют сделать следующие выводы. При увеличении степени деформации от 0,27 до 0,57 накопленная повреждаемость увеличивается на величину 0,29, а также при увеличении угла конусности матрицы от 6^0 до 15^0 повреждаемость увеличивается на величину 0,05. При увеличении коэффициента трения заготовки-матрицы от 0,03 до 0,15 повреждаемость увеличивается на 0,08, а при увеличении коэффициента трения заготовки-пуансона от 0,03 до 0,15 повреждаемость уменьшается на величину 0,03.Выявлено, что повреждаемость материала неравномерно распределяется по толщине стенок детали. Наибольшая величина повреждаемости в слоях на контакте с инструментом. Увеличение повреждаемости в зоне контакта материала с пуансоном и матрицей связано с большими накопленными деформациями в этих зонах. Повреждаемость при степенях деформации на операциях вытяжке с утонением ψ_3=0,415, не превышающих допустимую, составляет примерно ω= 0,2..0,27. Наибольшая величина повреждаемости материала при изготовлении изделий из углеродистых сталей $\omega_{\max} = 0,55$ меньше величины допустимой повреждаемости [ω] = 0,65…0,7, при достижении которой возможно образование полостных дефектов. В целом умеренная повреждаемость материала готовых изделий объясняется рациональным выбором режимов обработки. Прогнозирование накопления поврежденности необходимо также для обеспечения требуемых механических свойств материала готового изделия.

***Ключевые слова:** дилатирующий материал, вытяжка, осесимметричный пластический процесс, система дифференциальных уравнений.*

***

Повышение эффективности существующих и разработка новых технологических процессов, обеспечивающих повышение качества выпускаемых изделий при снижении себестоимости и трудоемкости их производства, экономии материальных и энергетических ресурсов, является одной из основных тенденций современного машиностроения. Особое место в технологии изготовления многих изделий занимает обработка металлов давлением (ОМД), так как процессы пластического формообразования изделий являются очень эффективным технологическим методом производства заготовок и деталей. Традиционный макромеханический подход к проектированию и разработке процессов (ОМД) изделий с высокими эксплуатационными характеристиками далеко не всегда соответствует предъявляемым требованиям [1, 2]. Успешное решение этой проблемы требует использования связанного физико-механического подхода с прогнозированием макро- и мезоструктурных параметров обрабатываемых давлением материалов на основе современных положений теории пластичности и механики деформационной повреждаемости материалов [3].

Основные соотношения и реологические модели деформируемых тел в теории пластичности включают механические характеристики материалов, которые определяются на основе системы макро-опытов над макро-образцами. Закономерности изменения структуры металлов (микродефектов, величины зерна поликристаллических агрегатов, внутренней энергии упрочнения и т.д.) в макро-опытах не изучаются. Исследованию процессов пластического деформирования с использованием концепции повреждаемости посвящены работы российских ученых: Л.М. Качанова, Ю.Н. Работнова, В.В. Новожилова, С.И. Губкина, В.Л. Колмогорова, Г.Д. Деля, А.А. Богатова, В.А. Огородникова и др.

Основные уравнения и граничные условия осесимметричной пластической деформации

Анализ и моделирование процессов пластического формоизменения изделий с прогнозируемой деформационной повреждаемостью требует определения полей напряжений и деформаций, с учетом реологического поведения обрабатываемых материалов, с последующим прогнозированием их деформационной повреждаемости. Решение этих вопросов основывается на использовании связанной системы уравнений для механических и физико-структурных параметров пластически деформируемых материалов. Следуя выводам из проведенного обзора опубликованных работ, за основной физико-структурный параметр принимается параметр повреждаемости материала дефектами деформационного происхождения (ω).

В дальнейшем рассматриваются процессы осесимметричного пластического формоизменения. Для их анализа и моделирования используется система основных уравнений применительно к осесимметричной пластической деформации. Деформируемое тело принимаем изотропным, жесткопластическим. Перемещение инструмента при вытяжке происходит параллельно оси *z*. Силы инерции и массовые силы считаем пренебрежимо малыми по сравнению с силами, вызывающими пластическое течение металла. Пластическое течение рассматриваемого тела независимо от условия пластичности должно удовлетворять дифференциальным уравнениям равновесия сплошной среды в напряжениях:

– равновесия сплошной среды в напряжениях:

$$\begin{aligned}&\left(\frac{\partial\sigma_r}{\partial r}+\frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z}+\frac{\sigma_r-\sigma_\theta}{r}\right)=0;\\&\left(\frac{\partial\tau_{rz}}{\partial r}+\frac{\tau_{rz}}{r}+\frac{\partial\sigma_z}{\partial z}\right)=0;\end{aligned}\qquad(1)$$

уравнению неразрывности

$$\rho\left(\frac{\partial\upsilon}{\partial r}+\frac{\upsilon}{r}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)+\upsilon\frac{\partial\rho}{\partial r}+w\frac{\partial\rho}{\partial z}=0,\ (2)$$

где ρ – плотность среды, $\rho = \rho_0(\exp - \varepsilon)$; ρ_0 – начальная плотность; ε – объемная деформация (дилатансия), $\varepsilon = \int \dot{\varepsilon} dt$; $\dot{\varepsilon}$ – скорость дилатансии; t – время.

Напряженное состояние в любой точке сплошной среды определяется симметричным тензором напряжений:

$$T\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_r & 0 & \tau_{rz} \\ 0 & \sigma_\theta & 0 \\ \tau_{rz} & 0 & \sigma_z \end{pmatrix}.$$

Соответственно девиатор напряжений:

$$D_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_r - \sigma & 0 & \tau_{rz} \\ 0 & \sigma_\theta - \sigma & 0 \\ \tau_{rz} & 0 & \sigma_z - \sigma \end{pmatrix},$$

где σ – среднее напряжение, определяемое как:

$$\sigma = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z}{3}. \quad (3)$$

Интенсивность касательных напряжений определяется выражением

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + 6\tau_{rz}^2}. \quad (4)$$

Деформация каждой точки сплошной среды характеризуется тензором деформаций:

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_r & 0 & \frac{1}{2}\gamma_{rz} \\ 0 & \varepsilon_\theta & 0 \\ \frac{1}{2}\gamma_{rz} & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix}.$$

Его компоненты определяются выражениями:

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_r = \dfrac{\partial S_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \dfrac{S_r}{r}, \quad \varepsilon_z = \dfrac{\partial S_z}{\partial z}, \\ \gamma_{rz} = \dfrac{\partial S_r}{\partial z} + \dfrac{\partial S_z}{\partial r} \end{array} \right\}. \quad (5)$$

Дилатансия определяется линейным инвариантом тензора деформации - дилатансия (относительное изменение объема)

$$\varepsilon = I_1(T)_\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z. \quad (6)$$

Скорость деформации в любой точке сплошной среды определяется тензором скоростей деформаций:

$$T_{\dot{\varepsilon}} = \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_r & 0 & \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{rz} \\ 0 & \dot{\varepsilon}_\theta & 0 \\ \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{rz} & 0 & \dot{\varepsilon}_z \end{pmatrix}.$$

Его компоненты определяются следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{\varepsilon}_r = \dfrac{\partial \upsilon}{\partial r}, \quad \dot{\varepsilon}_\theta = \dfrac{\upsilon}{r}, \quad \dot{\varepsilon}_z = \dfrac{\partial w}{\partial z}, \\ \dot{\gamma}_{rz} = \dfrac{\partial \upsilon}{\partial z} + \dfrac{\partial w}{\partial r} \end{array} \right\}. \quad (7)$$

Скорость дилатансии (скорость относительного изменения объема)

$$\dot{\varepsilon} = I_1(T_{\dot{\varepsilon}}) = \dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_\theta + \dot{\varepsilon}_z. \quad (8)$$

Интенсивности скорости деформации сдвига:

$$H = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_r - \dot{\varepsilon}_\theta)^2 + (\dot{\varepsilon}_\theta - \dot{\varepsilon}_z)^2 + (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_r)^2 + \frac{3}{2}\dot{\gamma}_{rz}^2}. \quad (9)$$

Интенсивность скорости деформации определяется

$$\dot{e}_i = H/\sqrt{3}. \quad (10)$$

Соотношение между напряжениями и скоростями деформации для осесимметричных процессов строятся на основе гипотезы о подобии и коаксиальности девиаторов напряжений и тензора скоростей деформации.

$$T_{\dot{\varepsilon}} = \lambda D_\sigma = \lambda(\sigma_{ij} - \sigma), \quad (11)$$

где λ – коэффициент, пропорциональный мощности пластической деформации, равный отношению интенсивности скорости деформации сдвига H к удвоенной интенсивности касательных напряжений 2T, т.е. $\lambda = H/2T$.

Для осесимметричного напряженного состояния дилатирующей сплошной изотропной среды используем условие текучести Грина в виде эллипса, тогда r = 2 (рис.1.).

$$f = \frac{(\sigma + c)^2}{a^2} + \frac{T^2}{b^2} = 1, \quad (12)$$

$$c=\frac{R_к^2\left(R_c-R_p\right)}{2\left(3R_к^2-R_cR_p\right)};$$

$$a=\sqrt{c^2+\frac{2cR_cR_p}{3\left(R_c-R_p\right)}};\qquad(13)$$

$$b=\frac{aR_к}{\sqrt{a^2-c^2}},$$

где $R_p, R_c, R_к$ – напряжения текучести в экспериментах по одноосному растяжению, одноосному сжатию и кручению цилиндрических образцов.

В теории пластичного формоизменения имеются соотношения ассоциированного закона течения:

$$\frac{\partial\upsilon}{\partial r}=\lambda\left[\frac{2(\sigma+c)}{3a^2}+\frac{\sigma_r-\sigma}{b^2}\right],\qquad(14)$$

$$\frac{\upsilon}{r}=\lambda\left[\frac{2(\sigma+c)}{3a^2}+\frac{\sigma_\theta-\sigma}{b^2}\right],\qquad(15)$$

$$\frac{\partial w}{\partial z}=\lambda\left[\frac{2(\sigma+c)}{3a^2}+\frac{\sigma_z-\sigma}{b^2}\right],\qquad(16)$$

$$\frac{\partial\upsilon}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial r}=4\lambda\frac{\tau_{rz}}{b^2}.\qquad(17)$$

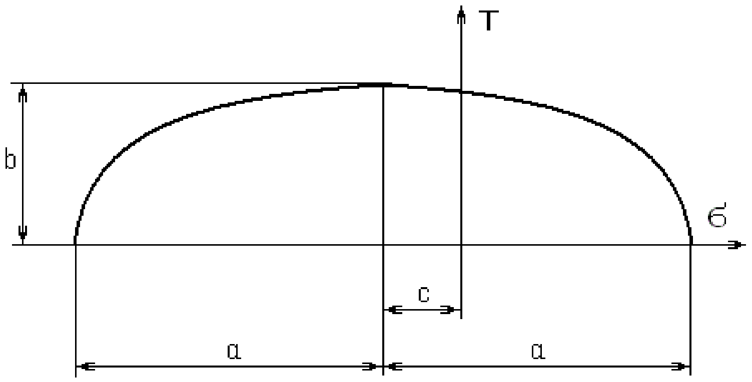


Рис. 1. Условие пластичности Грина

Приведенные основные соотношения (1) – (17) используются при последующем анализе и моделировании и содержат восемь уравнений относительно восьми неизвестных функций: четыре компонента напряжений $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{rz}$, два компонента вектора скорости υ, w, плотность ρ и скалярную функцию λ. Система уравнений приводится к системе уравнений в напряжениях. С этой целью система уравнений дополняется соответствующими граничными условиями в напряжениях и скоростях.

В механике деформируемого твердого тела получило распространение представление о поврежденности как величине ω, описывающей накопление дефектов в процессе деформации

Нормированная величина поврежденности $\omega\in[0;1]$, где границы интервала соответствуют исходному состоянию материала ($\omega=0$) и моменту макроразрушения ($\omega=1$).

С моментом образования макротрещины связывается момент достижения критической величины пластического разрыхления $\varepsilon_{iiкр}$ на макроуровне. В результате кинетическое уравнение принимает следующий вид:

$$\frac{d\omega}{dt}=\frac{\dot\varepsilon_{ii}}{\varepsilon_{iiкр}},\qquad(18)$$

где $\dot\varepsilon_{ii}$ – скорость пластической дилатансии на макроуровне.

Кинетическое уравнение (18) с учетом связи между пластической дилатансией $\bar{\varepsilon}_{ii}$ и накапливаемой деформацией сдвига макроэлемента Λ, имеет следующий вид:

$$\frac{d\omega}{dt}=\frac{[\bar{\varepsilon}_{ii}(\Lambda)]'H}{\bar{\varepsilon}_{iip}(\Lambda_{пр})}, \qquad (19)$$

где $\Lambda_{пр}$ – предельная степень деформации сдвига, соответствующая моменту разрушения; штрих означает дифференцирование по параметру Λ; $H=d\Lambda/dt$ – интенсивность скоростей деформации сдвига.

Более конкретный вид кинетического уравнения (19) (с учетом входящих в него материальных функций $\bar{\varepsilon}_{ii}(\Lambda),\Lambda_{пр}(\bar{\sigma})$) определяется на основе системы экспериментов. Материальная функция $\bar{\varepsilon}_{ii}(\Lambda)$ для изучаемого материала и заданных температурно-скоростных условий деформации определяется на основе экспериментального анализа распределения дефектов деформационного происхождения и его изменения во времени процесса деформирования. Материальная функция $\Lambda_{пр}(\bar{\sigma})$ представляет собой известные диаграммы пластичности [4] для разных материалов и определяется на основе разнотипных опытов (на растяжение, осадку, сдвиг и т.д.).

Для определения материальной функции $\Lambda_{пр}(\bar{\sigma})$ для изучаемых материалов используются известные экспериментальные данные [5]. Для построения материальной функции $\Lambda_{пр}(\bar{\sigma})$ удобно ввести в рассмотрение направляющий девиатор напряжений $\bar{D}_\sigma=D_\sigma/\sqrt{I_2(D_\sigma)}$ [4], модуль которого $\sqrt{I_2(\bar{D}_\sigma)}=1$. Таким образом, пластичность металла с заданным химическим составом, структурой μ_{k0} для фиксированных температурно-скоростных условий обработки $\dot{e}_{ij0}$, T_0 зависит от тензорных функций напряжений

$$\Lambda_{пр}=\Lambda_{пр}\left[I_1(T_\sigma)\frac{\bar{D}_\sigma}{D_\sigma},I_3(D_\sigma)\left(\frac{\bar{D}_\sigma}{D_\sigma}\right)^3,\dot{e}_{ij0},T_0,\mu_{k0}\right], \qquad (20)$$

где отношение $\bar{D}_\sigma/D_\sigma$ выполняет роль масштабного фактора напряженного состояния. Для прикладных расчетов пластичности металлов используется характеристика среднего напряжения $\bar{\sigma}=\frac{1}{3}I_1(T_\sigma)\frac{\bar{D}_\sigma}{D_\sigma}$, то есть $\Lambda_{пр}=\Lambda_{пр}(\bar{\sigma})$. Для построения зависимости $\Lambda_{пр}=\Lambda_{пр}(\bar{\sigma})$ разработана методика проведения разнотипных испытаний на растяжение, сжатие и выдавливание под гидростатическим давлением, что обеспечивает варьирование параметра трехосности напряженного состояния $\bar{\sigma}$.

При анализе процессов пластического формоизменения удобно использовать аналитическую аппроксимацию диаграмм пластичности, например зависимость [4, 5]

$$\Lambda_{пр}=B_{пр}\exp(-c_{пр},\bar{\sigma}), \qquad (21)$$

где $B_{пр}$, $c_{пр}$ – модульный и степенной параметры, определяемые по двум опорным точкам диаграммы пластичности.

С целью повышения точности расчетов при анализе нестационарных процессов ОД с сильным изменением напряженного состояния целесообразно использовать трехпараметрическую модель пластичности:

$$\Lambda_{пр}=A_{пр}\exp(-\bar{\sigma})+B_{пр}\exp(-c_{пр}\bar{\sigma}), \qquad (22)$$

где параметры $A_{пр},B_{пр},c_{пр}$ находят по трем опорным точкам: 1 $[(\bar{\sigma})_1,\Lambda_{пр1}]$, 2 $[(\bar{\sigma})_2,\Lambda_{пр2}]$, 3 $[(\bar{\sigma})_3,\Lambda_{пр3}]$ диаграммы пластичности.

Параметр $A_{пр}$ определяется из решения уравнения:

$$\frac{\ln[\Lambda_{\text{пр}i}-A_{\text{пр}}e^{-(\bar\sigma)_i}]-\ln[\Lambda_{\text{пр}k}-A_{\text{пр}}e^{-(\bar\sigma)_k}]}{\ln[\Lambda_{\text{пр}k}-A_{\text{пр}}e^{-(\bar\sigma)_k}]-\ln[\Lambda_{\text{пр}j}-A_{\text{пр}}e^{-(\bar\sigma)_j}]}=$$
$$=\frac{(\bar\sigma)_i-(\bar\sigma)_k}{(\bar\sigma)_k-(\bar\sigma)_j},$$
$$(i,j,k=1,2,3).$$

Параметры $c_{\text{пр}}$ и $B_{\text{пр}}$:

$$c_{\text{пр}}=\frac{\ln[\Lambda_{\text{пр}i}-A_{\text{пр}}e^{-(\bar\sigma)_i}]-\ln[\Lambda_{\text{пр}j}-A_{\text{пр}}e^{-(\bar\sigma)_j}]}{(\bar\sigma)_j-(\bar\sigma)_i},$$
$$B_{\text{пр}}=\exp[\ln\left(\Lambda_{\text{пр}k}-A_{\text{пр}}e^{-(\bar\sigma)_k}\right)+c_{\text{пр}}(\bar\sigma)_k].$$

При расчете следует стараться принимать симметричное расположение опорных точек по оси $\bar\sigma$: $(\bar\sigma)_1=-(\bar\sigma)_3$, $(\bar\sigma)_2=0$. Искомые параметры в этом случае

$$A_{\text{пр}}=\frac{\Lambda^2_{\text{пр}2}-\Lambda_{\text{пр}1}\Lambda_{\text{пр}3}}{2\Lambda_{\text{пр}2}-\Lambda_{\text{пр}1}e^{-(\bar\sigma)_3}-\Lambda_{\text{пр}}e^{(\bar\sigma)_3}},$$
$$B_{\text{пр}}=\Lambda_{\text{пр}2}-A_{\text{пр}},$$
$$c_{\text{пр}}=\frac{1}{(\bar\sigma)_3}\ln\frac{\Lambda_{\text{пр}1}-A_{\text{пр}}e^{(\bar\sigma)_3}}{B_{\text{пр}}}.$$

Сформулирована система основных уравнений, описывающая пластическое формоизменение материала с учетом деформационной повреждаемости, в том числе система основных уравнений, описывающая осесимметричное формоизменение материалов с прогнозируемой повреждаемостью. На основе используемых физических представлений о повреждаемости пластически деформируемых металлов введены связанные с ними основные соотношения и кинетическое уравнение повреждаемости, включающее модальную характеристику объемной деформации и её связь с накапливаемой деформацией сдвига.

Моделирование процесса пластического формоизменения материала

Рассмотрим задачу моделирования процесса пластического формоизменения материала при вытяжке осесимметричных деталей с прогнозированием их деформационной повреждаемости.

Расчет силовых параметров осуществим с учетом дилатансии материала и решим эту задачу с использованием метода локальных вариаций в процессе вытяжки с утонением стенки цилиндрической заготовки.

Выписанные соотношения для осесимметричного пластического формоизменения позволяют составить основное энергетическое уравнение, которое характеризует состояние материала при данных условиях обработки. Энергетический функционал, который полностью характеризует состояние деформируемой среды в данных условиях обработки, представляет собой разность мощностей внутренних и внешних сил, действующих на систему. Под мощностью внутренних сил понимаются затраты мощности пластической деформации и мощности сил трения на контактной границе с инструментом, определяемые выражением:

$$W_{\text{внешн.}}=W_{\text{внутр.}}=W_{\text{пл.}}+W_{\text{тр.}},\qquad(23)$$

где $W_{\text{пл.}}$ – пластическая компонента мощности; $W_{\text{тр.}}$ – компонента мощности сил трения;

Таким образом, с учетом всего выше изложенного, общее выражение функционала, описывающего состояние деформируемой среды в произвольный момент времени, имеет вид:

$$\Phi=\int\limits_V\left(\sigma\dot\varepsilon+TH\right)dV+\int\limits_F f\tau_S\left[v_K\right]dF_K+\int\limits_S\bar X\bar V dS=0.\qquad(24)$$

Функционал (24) используется для расчета силовых параметров процессов пластического формоизменения дилатирующих сред (минимальной мощности сил пластической деформации и соответствующей данной мощности действительного поля, составляющей скорости перемещения), при статических скоростях деформации.

Результаты, получаемые вышеописанным методом, должны удовлетворять следующим условиям:

– граничным условиям для напряжений: $\sigma_{ij} \cdot n_j = X_i$;

– условию пластичности: $f\left(\sigma_{ij}\right) \le 0$;

– граничным условиям для скоростей: $\upsilon_i = V_0$;

– начальным условиям для скоростей:

$$\upsilon_i\big|_{t=0} = V_0\left(t_0\right),$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; X_i – компоненты вектора поверхностной нагрузки; υ_i – составляющая скорости течения металла; n_j – компоненты нормали к рассматриваемой поверхности тела; V_0 – скорости деформирования; t_0 – начальный момент времени.

Процесс вытяжки с утонением стенки цилиндрических полуфабрикатов представляет собой нестационарное динамическое формоизменение заготовки. Однако, принимая допущение об отсутствии инерционных сил, можно рассматривать задачу как квазистатическую. Проведем, в качестве примера, расчет мощности пластической деформации для процесса вытяжки с утонением стенки с исходными данными (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1

Исходные данные вытяжек для решения методом локальных вариаций

Операция	$R_п$, мм	S_0, мм	$S_к$, мм	V_0, мм/с	dr dz, мм	h, мм/с	ρ, кг/м3	σ_S, Мпа	$\mu_М$ $\mu_П$
Вытяжка	67,1	9,9	6,0	200	0,3 1,7	0,9	7850	240	0,03 0,07

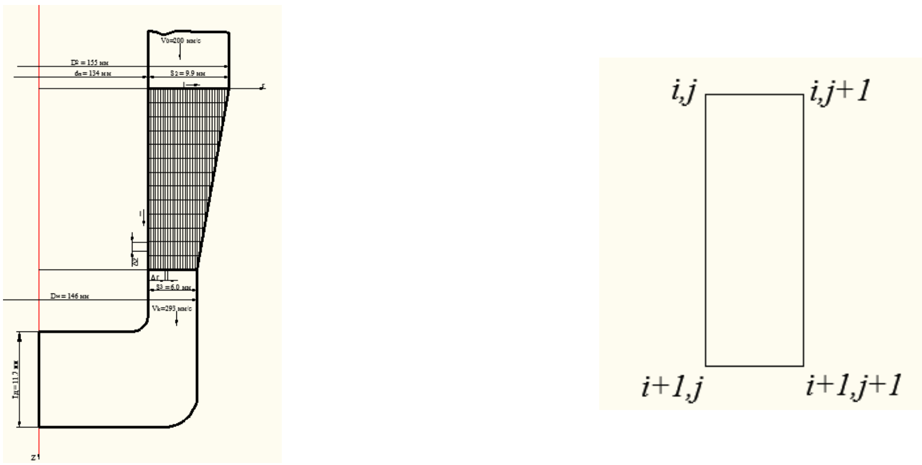


Рис. 2. Расчетная схема вытяжки с утонением стенки

Создано программное обеспечение расчета мощности деформации. Программа предназначена для нахождения минимума функционала и соответствующему этому минимуму полю составляющей скорости перемещения вдоль оси r –

итоговое минимальное значение мощности пластической деформации W; технологическая сила; удельная сила и соответствующее ей действительное кинематическое поле υ_{ij}, составляющей скорости перемещения вдоль оси r для узловых точек.

По полученной мощности деформации определяется:

1. Технологическая сила $P = W/V$,

где W – мощность пластической деформации; V – скорость деформирования.

2. Удельная сила деформирования

$q = P/F$,

где F – площадь поперечного сечения выходного материала.

В результате проведенного расчета получены следующие значения:

– технологическая сила P ;

– удельная сила деформирования q ;

и значения υ_{ij} – составляющей скорости перемещения вдоль оси r для узловых точек в мм/с.

Таблица 2

Полученные результаты силовых режимов

Операция	Мощность, Вт	Технологическая сила, кН	Удельная сила, МПа
Вытяжка	217772	1089	356

Удельная сила удостоверена условию допустимых значений удельной силы $q < [q] = 1700\,\text{МПа}$.

Полученные значения действительной составляющей скорости υ_{ij} перемещения вдоль оси r для узловых точек в мм/с, являются исходными данными для дальнейшего анализа напряженно-деформированного состояния.

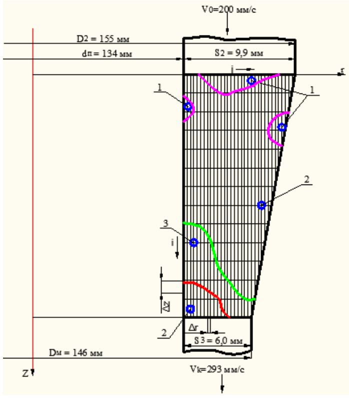
Анализ напряженно-деформированного состояния

Проведение расчетов по определению энергосиловых параметров процесса вытяжки не дает полного представления о возможностях пластического формоизменения, о качестве получаемых полуфабрикатов. Изготовление ответственных деталей требует точного выбора режимов обработки. Поэтому необходимо проводить анализ напряженно-деформированного состояния с учетом неоднородности их распределения, то есть осуществлять полное исследование процесса.

Исследование процесса объемной деформации осуществляется с использованием значения поля $\upsilon_{i,j}$ - составляющей скорости перемещения вдоль оси r для узловых точек (в миллиметрах на секунду), по которой определятся поле $w_{i,j}$ - составляющей скорости перемещения вдоль оси z, используя условие неразрывности. Краевые значения $w_{i,j}$ определяются исходя из граничных и начальных условий.

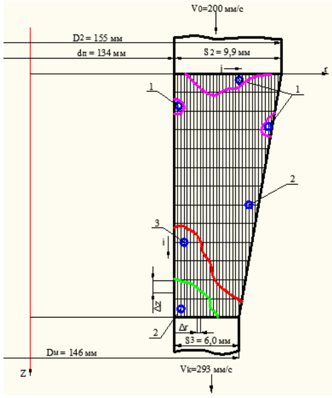
Кроме этого, для каждой точки поля определяются компоненты скоростей деформации $\dot{\varepsilon}_r, \dot{\varepsilon}_\theta, \dot{\varepsilon}_z, \dot{\gamma}_{rz}$, интенсивность скорости деформации сдвига H и интенсивность скорости деформации $\dot{\varepsilon}_i = H/\sqrt{3}$.

Для нахождения численных значений компонент тензора скоростей деформаций была разработана программа, которая представлена в среде программирования ДЕЛЬФИ 7.0. Результаты расчета представлены на рис. 3.



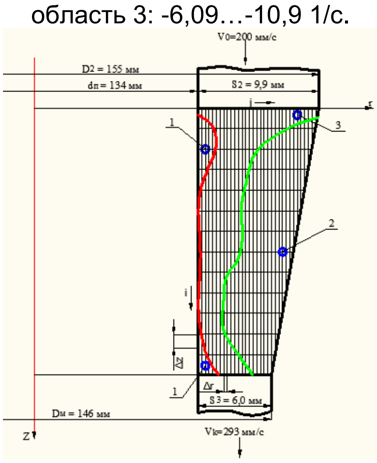
$\dot{\varepsilon}_r$

Область 1: -0,247…-1,32 1/с;
область 2: -1,32…-6,09 1/с;
область 3: -6,09…-10,9 1/с.



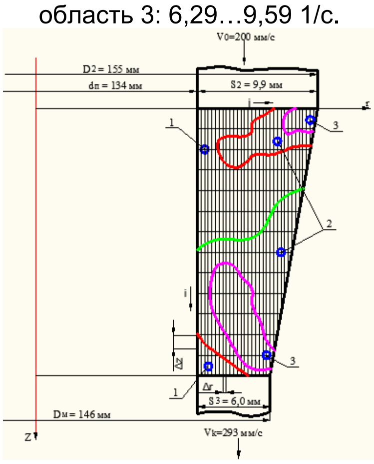
$\dot{\varepsilon}_z$

Область 1: 0,303…1,35 1/с;
область 2: 1,35…6,29 1/с;
область 3: 6,29…9,59 1/с.



$\dot{\varepsilon}_\theta$

Область 1: -0,0312…-0,0318 1/с;
область 2: -0,0318…-0,221 1/с;
область 3: -0,221…0,473 1/с.



$\dot{\gamma}_{rz}$

Область 1: -1,34…1,32 1/с;
область 2: 1,32…3,99 1/с;
область 3: 3,99…9,31 1/с.

Рис. 3. Распределение скоростей деформации в очаге деформации

Значения скоростей перемещений вдоль осей *r* и *z* используются для определения перемещений на этапе. В течение малого промежутка времени среда получает малую деформацию, определяемую перемещениями:

$$S_r = \int_0^t \upsilon \cdot dt, \qquad S_z = \int_0^t w \cdot dt \ . \qquad (25)$$

Промежуток времени Δt определяется из реального процесса, т. е.:

$$\Delta t = \frac{h_{вн}}{V_{ср}} ,$$

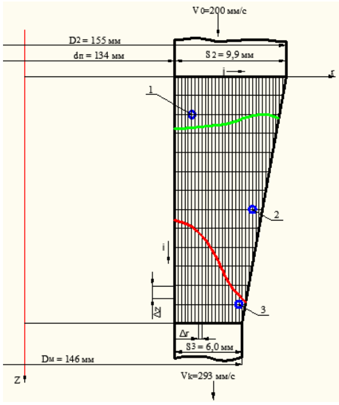
где $h_{вн}$ – глубина внедрения инструмента в металл заготовки; $V_{ср}$ — средняя скорость деформирования.

Скорость деформирования при вытяжке на механическом прессе определяется как скорость перемещения ползуна пресса и принималась $V_{ср}$ = 200 мм/с.

При малых деформациях компоненты относительных удлинений и относительный сдвиг для осесимметричного процесса определяются выражениями (5). Значение интенсивности деформации:

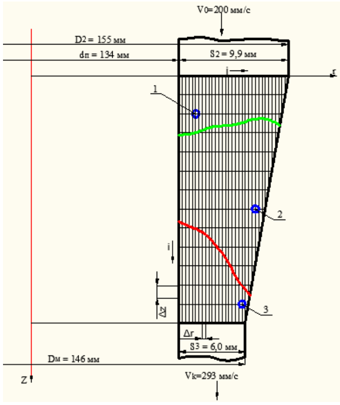
$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{\left(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta\right)^2 + \left(\varepsilon_\theta - \varepsilon_z\right)^2 + \left(\varepsilon_z - \varepsilon_r\right)^2 + \tfrac{3}{2}\gamma_{rz}^2} \ . \ (26)$$

Для нахождения численных значений компонент тензора деформаций была разработана программа, которая представлена в среде программирования ДЕЛЬФИ 7.0. Результаты расчета представлены на рис. 4.



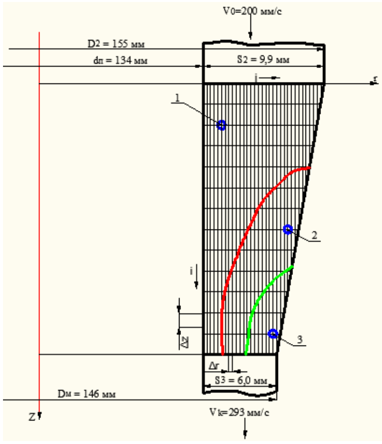
ε_r

Область 1: -0,0485…-0,0715 мм/мм;
область 2: -0,0715…-0,311 мм/мм;
область 3: -0,311…-0,551 мм/мм.



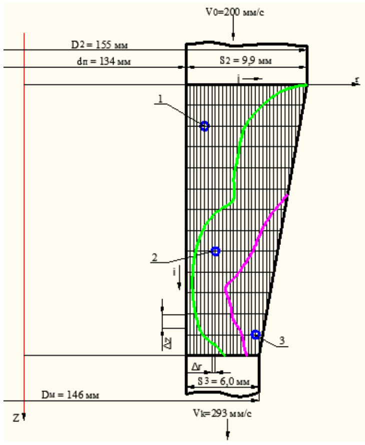
ε_z

Область 1: 0,0253…0,0918 мм/мм;
область 2: 0,0918…0,326 мм/мм;
область 3: 0,326…0,560 мм/мм.



ε_θ

Область 1: -0,0053…-0,0233 мм/мм;
область 2: -0,0233…-0,0413 мм/мм;
область 3: -0,0413…-0,0593 мм/мм.



γ_{rz}

Область 1: -0,098…0,050 мм/мм;
область 2: 0,050…0,198 мм/мм;
область 3: 0,198…0,346 мм/мм.

Рис. 4. Распределение деформаций в очаге деформации

Используя кинематические и деформационные характеристики, можно определить напряженное состояние, т. е. осуществить расчет напряжений. Для этого система уравнений приводится к системе уравнений в напряжениях и дополняется соответствующими граничными условиями в напряжениях и скоростях.

Определяем отличные от нуля компоненты тензора напряжений:

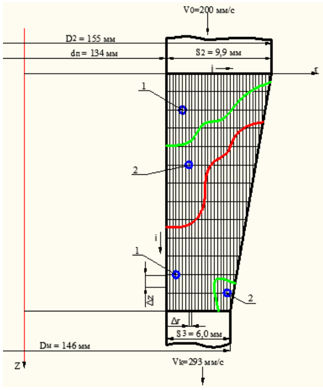
$$\sigma_r = \left(\sigma - \frac{2}{3}\frac{\dot{\varepsilon}T}{H}\right) + \frac{2T}{H}\dot{\varepsilon}_r,$$

$$\sigma_\theta = \left(\sigma - \frac{2}{3}\frac{\dot{\varepsilon}T}{H}\right) + \frac{2T}{H}\dot{\varepsilon}_\theta;$$

$$\sigma_z = \left(\sigma - \frac{2}{3}\frac{\dot{\varepsilon}T}{H}\right) + \frac{2T}{H}\dot{\varepsilon}_z, \ \tau_{rz} = \frac{2T}{H}\dot{\gamma}_{rz}.$$

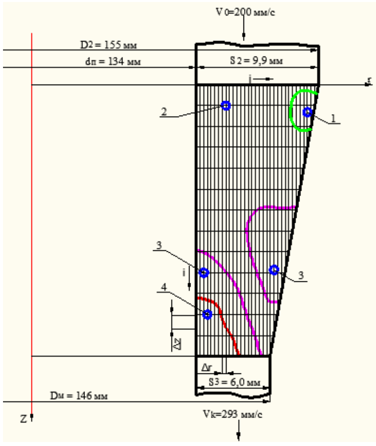
Таким образом, получаем полную картину кинематического состояния пластического течения.

Для нахождения численных значений компонент тензора напряжений была разработана программа, которая представлена в среде программирования ДЕЛЬФИ 7.0.Полученные результаты о напряжениях приведены в области очага деформации (рис.5).



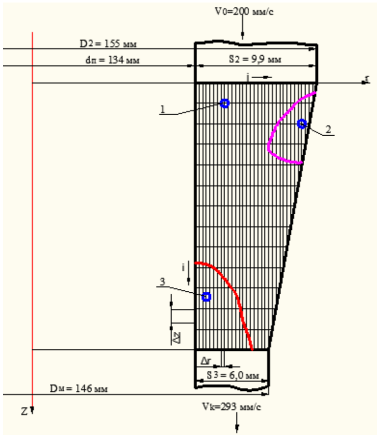
σ_R

Область 1: -308…-481 МПа;
область 2: -481…-653 МПа.



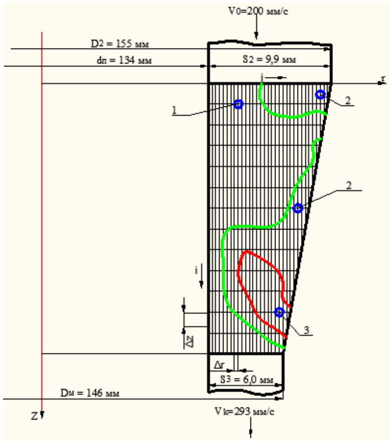
σ_Z

Область 1: 0…40 МПа;
область 2: 40…151 МПа;
область 3: 151…342 МПа;
область 4: 342…533МПа.



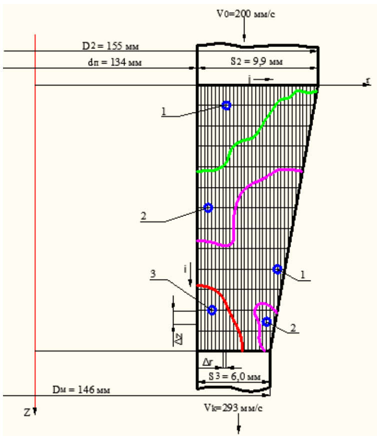
σ_θ

Область 1: -119…-286 МПа;
область 2: -286…-453 МПа;
область 3: -47…-119 МПа.



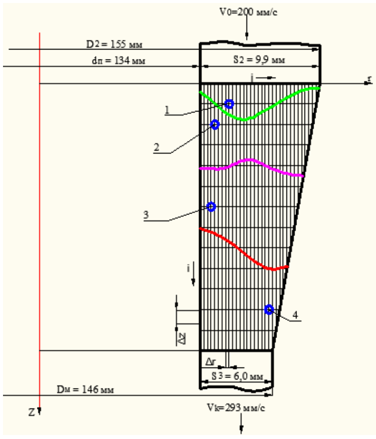
τ_{RZ}

Область 1: -53,6…89 МПа;
область 2: 89…161 МПа;
область 3: 161…232 МПа.



σ

Область 1: -38…-205 МПа;
область 2: -205…-372 МПа;
область 3: 129…-38 МПа.



σ_i

Область 1: 327…408 МПа;
область 2: 408…489 МПа;
область 3: 489…570 МПа;
область 4: 570…652 МПа.

Рис. 5. Распределение напряжений в очаге деформации

Накопленные деформации и пластической повреждаемости материала

При изготовлении деталей с высокими эксплуатационными свойствами должно выполняться условие, в соответствии с которым допустимая деформация определяется допустимым уровнем поврежденности микропорами. В этом случае для расчета операционных степеней деформации необходимо использовать модель изменения поврежденности деформируемого материала.

В современных инженерных расчетах при решении технологических задач пользуются степенной зависимостью между пластическим разрыхлением ε_{ii} и накапливаемой деформацией Λ.

Математически степенная модель пластического разрыхления имеет следующий вид:

$$\varepsilon_{ii} = b\Lambda^{a}, \tag{27}$$

где b – модуль; a – степенной показатель пластического разрыхления.

Построение зависимости пластического разрушения $\varepsilon_{kk}(\Lambda)$ производилось следующим образом.

Девиаторная деформация определялась по известной зависимости

$$\Lambda = \sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{\left(\varepsilon_1-\varepsilon_2\right)^2+\left(\varepsilon_2-\varepsilon_3\right)^2+\left(\varepsilon_3-\varepsilon_1\right)^2}, \tag{28}$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные компоненты тензора деформаций.

Пластическая дилатансия

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\Delta V - \Delta V_0}{\Delta V_0}, \tag{29}$$

где $\Delta V_0, \Delta V$ - выделенный элементарный объем деформируемого материала в начальный и текущий моменты деформации.

Главные компоненты деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ определялись с использованием правила аддитивного суммирования приращений деформации:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1 &= \int_{s_{0M}} d\varepsilon_1(s) = \int_{l_{10}}^{l_1} \frac{dl_1}{l_1} = \ln\frac{l_1}{l_{10}},\\
\varepsilon_2 &= \int_{s_{0M}} d\varepsilon_2(s) = \int_{l_{20}}^{l_2} \frac{dl_2}{l_2} = \ln\frac{l_2}{l_{20}},\\
\varepsilon_3 &= \int_{s_{0M}} d\varepsilon_3(s) = \int_{l_{30}}^{l_3} \frac{dl_3}{l_3} = \ln\frac{l_3}{l_{30}},
\end{aligned} \tag{30}$$

где $l_{10}, l_{20}, l_{30}\ l_1, l_2, l_{30}$ – линейные размеры элементарного объема в направлении главных осей 1, 2, 3 в начальный и текущий моменты растяжения образца.

Элементарный объем в начальный момент деформации представляет собой элементарный прямоугольный параллелепипед со сторонами l_{10}, l_{20}, l_{30} и объемом $\Delta V_0 = l_{10}l_{20}l_{30}$. В процессе деформации при простом нагружении этот элемент преобразуется в прямоугольный параллелепипед объемом $\Delta V = l_1 l_2 l_3$. Это обстоятельство позволяет определить дилатансию макроэлемента через сумму главных деформаций:

$$\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3 = \ln\frac{l_1}{l_{10}} + \ln\frac{l_2}{l_{20}} + \ln\frac{l_3}{l_{30}} = $$

$$= \ln\frac{l_1 l_2 l_3}{l_{10}l_{20}l_{30}} = \ln\frac{\Delta V}{\Delta V_0}.$$

Из зависимостей (29) и (30) следует, что дилатансия

$$\frac{\Delta V - \Delta V_0}{\Delta V_0} = \exp\left(\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3\right) - 1 \cong \varepsilon_{ii} =$$

$$= \varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3 \ \left(\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3 \ll 1\right).$$

Определяется линейным инвариантом деформаций ε_{ii} или объемной фракцией пор f_v: $\varepsilon_{ii} = f_v - f_{v0}$, где f_{v0} – объемная фракция пор в начальный момент времени.

Измеряемые линейные размеры макроэлемента по этапам деформирования опытных образцов позволяют построить зависимости $\varepsilon_{ii}(\Lambda)$.

Параметры b и a в зависимости определяются по опытным зависимостям $\varepsilon_{ii}(\Lambda)$ следующим образом (рис. 6.). Составлялись уравнения по точкам в момент достижения предельной деформации $\Lambda_{пр}$ и в момент деформации около $\Lambda_{пр}/2$. Решив 2 уравнения с двумя неизвестными b и a, получим результаты:

$$a = \ln\left(\frac{\varepsilon_{пр1}}{\varepsilon_{пр2}}\right) \Bigg/ \ln\left(\frac{\Lambda_{пр1}}{\Lambda_{пр2}}\right) = \ln\left(\frac{\varepsilon_{пр1}}{\varepsilon_{пр2}}\right) \Bigg/ \ln(2)$$

и $b = \dfrac{\varepsilon_{пр1}}{\Lambda_{пр1}^{a}}$.

Определенные параметры дилатансии приведены в таблице 3.

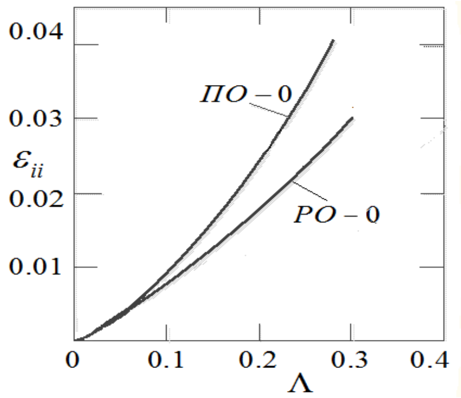


Рис. 6. Зависимость пластической дилатансии макроэлемента от его девиаторной деформации (слева – сталь 10 в состоянии поставки; справа – сталь 10 после рекристаллизационного отжига)

Таблица 3

Определенные параметры дилатансии

Параметры пластической дилатансии	Малоуглеродистая сталь10 в состоянии поставки	Малоуглеродистая сталь 10 после отжига
	Наименование экспериментальных образцов	
	ПО-0	РО-0
a	1,25	1,28
b	0,212	0,152

В зависимости от величины степенного показателя различают: линейную модель $a = 1$ и нелинейную модель $a \succ 1$ для процессов с жесткой схемой напряженного состояния. Согласно степенной зависимости предельная степень деформации $\Lambda_{пр}$ связана с критической величиной пластического разрыхления $\varepsilon_{ii\,кр}$ соотношением, а приращение пластического разрыхления

$$d\varepsilon_{ii} = ba\Lambda^{a-1}d\Lambda .$$

Для меры повреждаемости, получаем

$$d\omega = a\frac{\Lambda^{a-1}}{\Lambda_{пр}^{a}}d\Lambda \qquad (31)$$

или в интегральной форме

$$\omega = \int_{0}^{\Lambda_1} \frac{a\Lambda^{a-1}}{\Lambda_{пр}^{a}}d\Lambda , \qquad (32)$$

где $\Lambda_{пр} = \Lambda_{пр}(\bar{\sigma})$ устанавливается по диаграмме пластичности или расчет по аппроксимационной функции.

В.Л. Колмогоровым разработана методика определения предельной степени деформации по результатам испытаний: на растяжение, кручение, изгиб и осадку. Вид испытания должен соответствовать исследуемому процессу.

При решении технологических задач удобно пользоваться аналитической аппроксимацией диаграмм пластичности. Диаграммы пластичности вполне удовлетворительно аппроксимируются следующей функцией:

$$\Lambda_{пр} = \chi \exp\left(\lambda \bar{\sigma}\right), \qquad (33)$$

где χ, λ – коэффициенты, определяемые из аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов и зависят от химического состава и структуры металла.

Для получения χ, λ проведены обработки результатов механических испытаний образцов при различном гидростатическом давлении р. Показатель а, характеризующий модель пластического разрыхления при различном напряженном состоянии, получается в опытах на знакопеременное кручение цилиндрических образцов под гидростатическим давлением.

Диаграммы пластичности для многих металлов известны.

Коэффициенты χ, λ параметры зависимости, находимые по двум экспериментальным точкам 1 $((\bar{\sigma})_1;\Lambda_1)$ и 2 $((\bar{\sigma})_2;\Lambda_2)$ диаграммы пластичности:

$$\lambda = \frac{\ln \Lambda_1 - \ln \Lambda_2}{(\bar{\sigma})_1 - (\bar{\sigma})_2},$$

$$\chi = \frac{\Lambda_1}{\exp(\lambda(\bar{\sigma})_1)} = \frac{\Lambda_2}{\exp(\lambda(\bar{\sigma})_2}.$$

Значения коэффициентов χ, λ для диаграмм пластичности стали 10 (рис. 7) приведены в таблице 4.

Накопленная степень деформации сдвига определяется по формуле

$$\Lambda = \int_0^{\tau} H dt,$$

где Н – интенсивность деформации сдвига.

По предложенной методике была определена деформационная повреждаемость в стенке при вытяжке с утонением. Результаты проведенного расчета представлены на рис. 8.

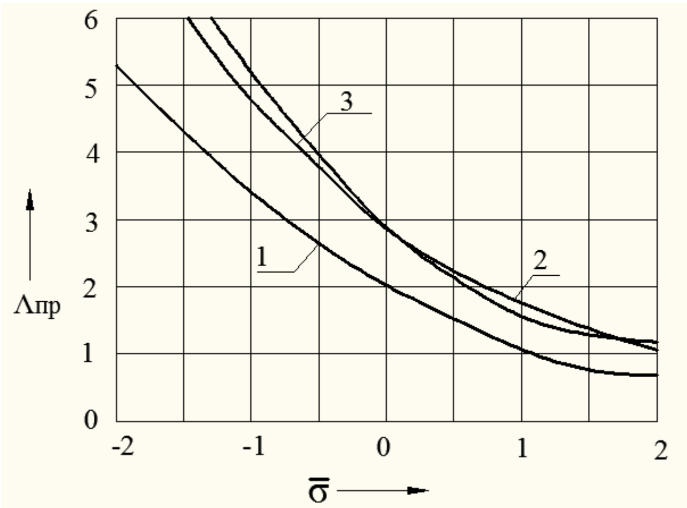


Рис. 7. Диаграммы пластичности конструкционных материалов в состоянии поставки:
1 – сталь 10; 2 – латунь 68; 3 – сплав АМг-2

Таблица 4

Значения коэффициентов χ, λ для диаграмм пластичности стали 10

Материал	Экспериментальные точки		χ	λ
	1	2		
Сталь 11ЮА	$(\bar{\sigma})_1 = -0{,}5$ $\Lambda_1 = 2{,}6$	$(\bar{\sigma})_2 = 0{,}5$ $\Lambda_2 = 1{,}5$	1,975	-0,55

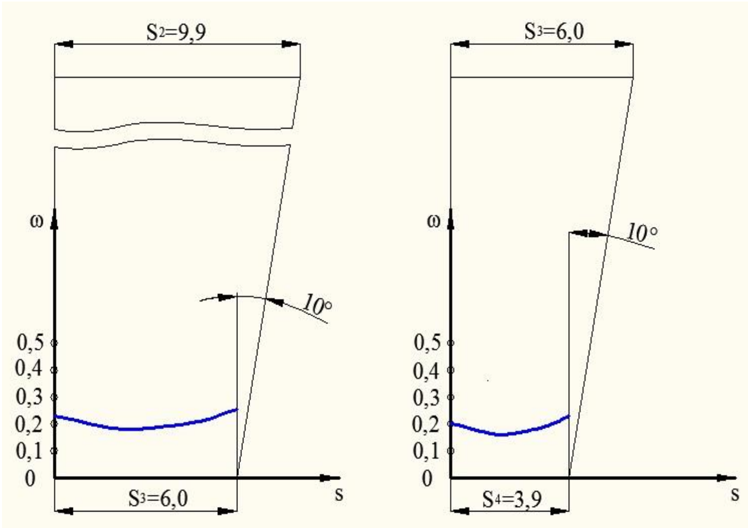


Рис. 8. Распределение повреждаемости по толщине стенки на выходе из зоны деформации

Выводы

1. Выписанная система дифференциальных уравнений для анализа осесимметричного пластического течения процессов вытяжки с утонением из дилатирующего материала и использование точных методов решения, позволяют проводить оценку силовых режимов с полным анализом напряженно-деформированного состояния.

2. На основе полученных полей распределения деформаций и напряжений с использованием пакета программ и положений механики рассеянной повреждаемости, можно провести компьютерное моделирование процесса вытяжки с утонением и довольно точно рассчитывать деформационную повреждаемость ω, существенно влияющую на эксплуатационные свойства готовых изделий и формирование эксплуатационных свойств в готовой детали.

3. Полученные результаты по изучению динамики повреждаемости позволяют сделать следующие выводы. При увеличении степени деформации от 0,27 до 0,57 накопленная повреждаемость увеличивается на величину 0,29, а также при увеличении угла конусности матрицы от 6^0 до 15^0 повреждаемость увеличивается на величину 0,05. При увеличении коэффициента трения заготовки-матрицы от 0,03 до 0,15 повреждаемость увеличивается на 0,08, а при увеличении коэффициента трения заготовки-пуансона от 0,03 до 0,15 повреждаемость уменьшается на величину 0,03. Выявлено, что повреждаемость материала неравномерно распределяется по толщине стенок детали. Наибольшая величина повреждаемости в слоях на контакте с инструментом. Увеличение повреждаемости в зоне контакта материала с пуансоном и матрицей связано с большими накопленными деформациями в этих зонах. Повреждаемость при степенях деформации на операциях вытяжке с утонением $\psi_3 = 0{,}415$, не превышающих допустимую, составляет примерно $\omega = 0{,}2..0{,}27$. Наибольшая величина повреждаемости материала при изготовлении изделий из углеродистых сталей $\omega_{max} = 0{,}55$ меньше величины допустимой повреждаемости [ω] = 0,65…0,7, при достижении которой возможно образование полостных дефектов. В целом умеренная повреждаемость материала готовых изделий объясняется рациональным выбором режимов обработки. Прогнозирование накопления поврежденно-

сти необходимо также для обеспечения требуемых механических свойств материала готового изделия, что важно для разработки ресурсосберегающих технологий [6-14].

Список литературы

1. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И. Технологические методы повышения надежности деталей машин: справочник. – М.: Машиностроение, 1995. – 302 с.

2. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. – 312 с.

3. Комплексные задачи теории пластичности / Н. Д. Тутышкин, Ю. В. Полтавец, А. Е. Гвоздев [и др.]; под ред. Н. Д. Тутышкина, А. Е. Гвоздева. - Тула: Шар, 1999. - 378 с.

4. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением. – Екатеринбург: Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. - 836 с.

5. Богатов А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов: учебное пособие для вузов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2002. – 329 с.

6. Постановка задачи расчета деформационной повреждаемости металлов и сплавов / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, В.И. Золотухин, Д.А. Проворов // Производство проката. – 2015. – №10. – С. 18–26.

7. Влияние деформационной поврежаемости на формирование механических свойств малоуглеродистых сталей / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // Производство проката. – 2015. – № 12. – С. 9-13.

8. Расчет деформационной повреждаемости в процессах обратного выдавливания металлических изделий / А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлёв, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев // Технология металлов. – 2016. – №1. – С.23-32.

9. Механические свойства конструкционных и инструментальных сталей в состоянии предпревращения при термомеханическом воздействии / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, О.В. Кузовлева, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Деформация и разрушение материалов. – 2013. – № 11. – С. 39-42.

10. Особенности протекания процессов разупрочнения при горячей деформации алюминия, меди и их сплавов / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, Д.Н. Боголюбова, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Материаловедение. – 2014. – № 6. – С. 48-55.

11. Условия проявления нестабильности цементита при термоциклировании углеродистых сталей / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, А.В. Маляров, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, М.Е. Пруцков // Материаловедение. – 2014. – № 10. – С. 48-55.

12. Роль процесса зародышеобразования в развитии некоторых фазовых переходов первого рода / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, И.В. Тихонова, А.Г. Колмаков // Материаловедение. – 2015. – № 1. – С. 15-21.

13. Макаров Э.С., Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М. Теория пластичности дилатирующих сред: монография / под ред. проф. А.Е. Гвоздева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Тула: Изд-во ТулГу, 2015. – 337 с.

14. Противоизносные свойства консистентного смазочного композиционного материала, содержащего смесь гидросиликатов магния / В. В. Медведева, А. Д. Бреки, Н. А. Крылов, С. Е. Александров, А. Е. Гвоздев, Н. Е. Стариков, Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, Д. В. Малий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2016. – №. 2 (19). – С. 30−40.

Получено 26.07.16

G.M. Zhuravlev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Tula State University (Tula) (e-mail: mcgeen4@gmail.com)

N.N. Sergeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University(Tula) (e-mail: technology@tspu.tula.ru)

A.E. Gvozdev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula) (e-mail: technology@tspu.tula.ru)

A.N. Sergeev, Doctor of Pedagogic Sciences, Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula) (e-mail: ansergueev@mail.ru)

E.V. Ageeva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: ageeva-ev@ yandex.ru)

D.V. Maliy, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula) (e-mail: maliydmitriy@yandex.ru)

PHYSICO-MECHANICAL APPROACH TO THE ANALYSIS OF STRETCHING PROCESSES WITH THINNING OF CYLINDRICAL PRODUCTS AND THE PREDICTION OF DEFORMATION MATERIAL DAMAGEABILITY

The paper presents a system of differential equations for the analysis of axisymmetric plastic flow of stretching processes with thinning from dilatant material and the use of accurate solving methods. It allows us to assess force conditions with full analysis of the stress-strain state.

Based on the obtained fields of strain and stress distribution and using the program package and the provisions of continuous damage mechanics, it is possible to conduct computer simulations of the stretching process with thinning and quite accurately calculate deformation damage ω *that significantly affects the operational properties of finished products and the formation of operational properties in the finished part.*

The results obtained by the study of dynamics of damage allow us to draw the following conclusions. With increasing degree of strain from 0.27 to 0.57, the accumulated damage increases by the amount of 0.29, and with increasing the taper angle of matrix from 60 to 150 damage increases by the value of 0.05. When you increase the coefficient of friction of workpiece-matrix from 0.03 to 0.15, the damage increases by 0.08, and while increasing the friction coefficient of workpiece-punch from 0.03 to 0.15 damage reduces by the amount of 0,03. We have revealed that material damageability is not evenly distributed across the wall thickness of a part. The highest amount of damage is in the layers being in contact with the tool. The increase of damageability in the contact area of material with a punch and a matrix is associated with large accumulated strain in these zones. Damage at the degrees of deformation at the operations of stretching with thinning ψ_3 *=0,415 not exceeding the allowable degree is approximately* ω *= 0,2..0,27. The highest value of the material damageability in the manufacture of products made of carbon steel* $\omega_{\max} = 0{,}55$ *is less than the magnitude of permissible damageability [ω] = 0,65…0,7 at which the formation of cavernous defects is possible. Overall, moderate damageability of material of finished products is due to rational choice of processing modes. Prediction of damage accumulation is also needed to ensure the required mechanical properties of the material of finished products.*

Key words: *dilatant material, stretching, axisymmetric plastic process, the system of differential equations.*

***

References

1. Kuznecov N.D., Cejtlin V.I., Volkov V.I. Tehnologicheskie metody povyshenija nadezhnosti detalej mashin: spravochnik. – M.: Mashinostroenie, 1995. – 302 s.

2. Kachanov L. M. Osnovy mehaniki razrushenija. – M.: Nauka, 1974. – 312 s.

3. Kompleksnye zadachi teorii plastichnosti / N. D. Tutyshkin, Ju. V. Poltavec, A. E. Gvozdev [i dr.]; pod red. N. D. Tutyshkina, A. E. Gvozdeva. - Tula: Shar, 1999. - 378 s.

4. Kolmogorov V. L. Mehanika obrabotki metallov davleniem. – Ekaterinburg: Ural'skij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet (UPI), 2001. - 836 s.

5. Bogatov A. A. Mehanicheskie svojstva i modeli razrushenija metallov: uchebnoe posobie dlja vuzov. – Ekaterinburg: GOU VPO UGTU – UPI, 2002. – 329 s.

6. Postanovka zadachi rascheta deformacionnoj povrezhdaemosti metallov i splavov / G.M. Zhuravlev, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeev, V.I. Zolotuhin, D.A. Provoto-

rov // Proizvodstvo prokata. – 2015. – №10. – S. 18–26.

7. Vlijanie deformacionnoj povrezhdaemosti na formirovanie mehanicheskih svojstv malouglerodistyh stalej / G.M. Zhuravlev, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeev, D.A. Provotorov // Proizvodstvo prokata. – 2015. – № 12. – S. 9-13.

8. Raschet deformacionnoj povrezhdaemosti v processah obratnogo vydavlivanija metallicheskih izdelij / A.E. Gvozdev, G.M. Zhuravljov, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeev // Tehnologija metallov. – 2016. – №1. – S.23-32.

9. Mehanicheskie svojstva konstrukcionnyh i instrumental'nyh stalej v sostojanii predprevrashhenija pri termomehanicheskom vozdejstvii / A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, O.V. Kuzovleva, N.N. Sergeev, I.V. Tihonova // Deformacija i razrushenie materialov. – 2013. – № 11. – S. 39-42.

10. Osobennosti protekanija processov razuprochnenija pri gorjachej deformacii aljuminija, medi i ih splavov / A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, D.N. Bogoljubova, N.N. Sergeev, I.V. Tihonova // Materialovedenie. – 2014. – № 6. – S. 48-55.

11. Uslovija projavlenija nestabil'nosti cementita pri termociklirovanii uglerodistyh stalej / A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, A.V. Maljarov, N.N. Sergeev, I.V. Tihonova, M.E. Pruckov // Materialovedenie. – 2014. – № 10. – S. 48-55.

12. Rol' processa zarodysheobrazovanija v razvitii nekotoryh fazovyh perehodov pervogo roda / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeev, I.V. Minaev, I.V. Tihonova, A.G. Kolmakov // Materialovedenie. – 2015. – № 1. – S. 15-21.

13. Makarov Je.S., Gvozdev A.E., Zhuravlev G.M. Teorija plastichnosti dilatirujushhih sred: monografija / pod red. prof. A.E. Gvozdeva. – 2-e izd., pererab. i dop. – Tula: Izd-vo TulGu, 2015. – 337 s.

14. Protivoiznosnye svojstva konsistentnogo smazochnogo kompozicionnogo materiala, soderzhashhego smes' gidrosilikatov magnija / V. V. Medvedeva, A. D. Breki, N. A. Krylov, S. E. Aleksandrov, A. E. Gvozdev, N. E. Starikov, N. N. Sergeev, A. N. Sergeev, D. V. Malij // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii. – 2016. – №. 2 (19). – S. 30−40.

УДК 004.032.26; 615.4

С.А. Филист, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: sfilist@gmail.com)

К.Д. Али Кассим, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: kaboosd@mail.ru)

А.А. Кузьмин, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: ku3bmin@gmail.com)

О.В. Шаталова, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск)

Е.А. Алябьев, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: sfilist@gmail.com)

ФОРМИРОВАНИЕ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ СЛОЖНОСТРУКТУРИРУЕМЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОКОН И НЕЙРОСЕТЕВЫХ СТРУКТУР

Самоорганизующиеся нейросетевые структуры предназначены для выделения на изображении сегментов заданного класса. Актуальность в разработке интеллектуальных систем классификации сложноструктурируемых изображений возникает при обработке рентгенограмм. Для классификации сложноструктурируемых изображений предложены компьютерные технологии, построенные на методологии бустинга.