

В. Ю. Травин, Н. Д. Тутышкин

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ

*Тульский государственный университет, г. Тула, Россия*

*АО НПО «Сплав», г. Тула, Россия*

**Аннотация.** Приводятся анализ и моделирование процессов вытяжки осесимметричных изделий. Рассматриваются физико-механические аспекты и критерии пластической повреждаемости. При вытяжке с утонением стенки не происходит заметного изменения диаметра заготовки. Поэтому, деформация осесимметричной оболочки в окружном направлении мала по сравнению с линейными деформациями изменения длины и толщины оболочки. Это обстоятельство позволяет принимать при вытяжке с утонением условие плоской деформации.

**Ключевые слова:** макроуровень, мезоуровень, деформации, дефекты, повреждаемость, разрушение.

УДК: 539.214:669.14

DOI: 10.26293/chgpu.2019.39.1.010

Вытяжка с утонением стенки применяется для изготовления осесимметричных деталей, типа оболочек и корпусов. Особенностью напряженно-деформированного состояния (НДС) при вытяжке с утонением является наличие значительных по величине нормальных напряжений, на контактных поверхностях с деформирующим инструментом: матрицей и пуансоном [1].

При вытяжке с утонением стенки пластическая область деформации мала, по сравнению с размерами заготовки, и на протяжении почти всего процесса деформирования ограничена в осевом направлении с обеих сторон недеформируемыми участками стенок заготовки. Для примера на рис.1 показана схема вытяжки цилиндрической оболочки.

---

© Травин В. Ю., Тутышкин Н. Д., 2019

*Травин Вадим Юрьевич*

e-mail: mail@splav.org, кандидат технических наук, зам Генерального конструктора, АО НПО «Сплав», г. Саратов, Россия.

*Тутышкин Николай Дмитриевич*

e-mail: Nikolai.Tutyshkin@mail.ru, доктор технических наук, профессор, Тульский государственный университет, г. Тула, Россия.

Поступила 14.11.2018

Перемещение заготовки относительно матрицы в направлении движения пуансона приводит к тому, что силы трения, действующие на контактной поверхности заготовки с пуансоном, имеют направление, противоположное перемещению пуансона. На контактных поверхностях, кроме касательных, действуют и сжимающие нормальные напряжения. В осевом направлении возникают растягивающие напряжения, вызванные давлением пуансона на донную часть заготовки.

Так как вытяжка с утонением стенки ведется обычно в условиях хорошей смазки (коэффициент трения Кулона  $\mu < 0,2$ ), а нормальные напряжения на контактных поверхностях не превышают напряжения текучести, то касательные напряжения на контактных поверхностях значительно меньше предела текучести при сдвиге. В этих условиях нормальное напряжение на контактной поверхности незначительно отличается по величине от главного.

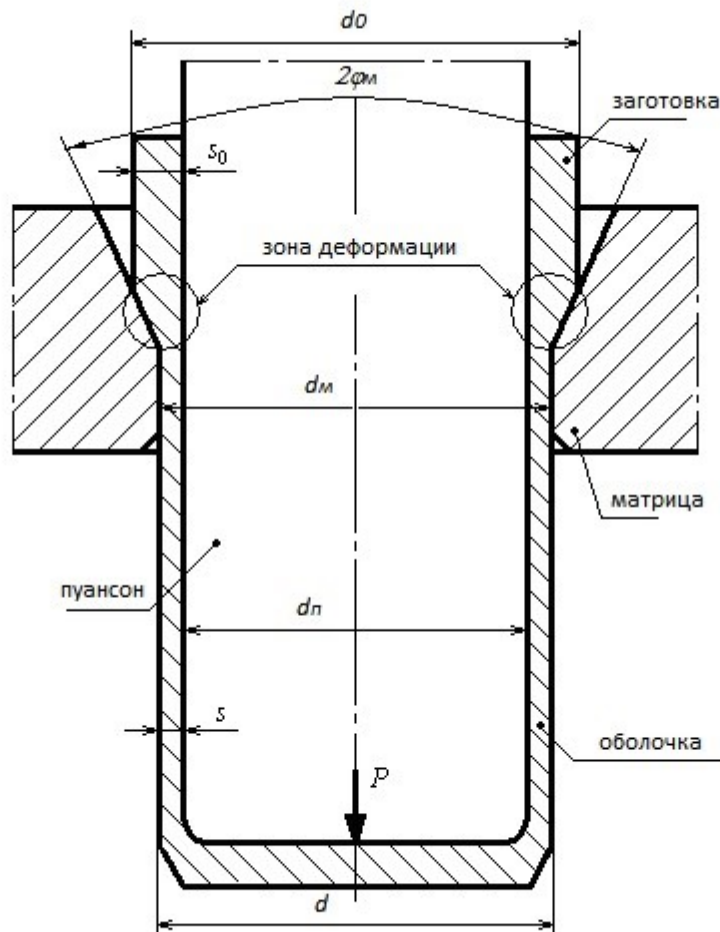


Рис. 1. Схема процесса вытяжки цилиндрической оболочки

Систематизированные исследования показали, что повреждаемость деформируемого материала на операциях вытяжки оказывает существенное влияние на её технологические параметры [2-5]. Экспериментальные исследования показывают, что повреждаемость материала в зонах интенсивной деформации существенно зависит от истории деформации и напряженного состояния. Моделирование повреждаемости на вытяжных операциях существенно расширяет применение экспериментальных данных в технологических расчетах.

Рассмотрим процесс вытяжки с утонением стенки цилиндрической оболочки (рис. 1). Технологическая сила ( $P$ ) передается пуансоном на донную часть оболочки и вызывает растягивающие осевые напряжения в стенках детали. Поэтому в процессе вытяжки материал испытывает преобладающие растягивающие деформации в состоянии пластичности. Это обстоятельство позволяет прогнозировать деформационную повреждаемость получаемых деталей при вытяжке с использованием полученных экспериментальных результатов при одноосном пластическом растяжении опытных образцов. основополагающие результаты, представленные в работе [6], подтверждают возможность использования экспериментально определенных материальных функций повреждаемости и пластического разрушения материала в процессах пластического формоизменения с непропорциональным нагружением и переменным параметром трехосности напряженного состояния.

В настоящей статье используется методика расчета накопленных деформаций при перемещении частиц материала вдоль траекторий в пластической области, основанная на отображении линий тока в плоскости скоростей течения. Эта методика позволяет установить распределение повреждаемости по толщине стенки готовой детали. Для расчета напряжений (и параметра трехосности напряженного состояния) в узловых точках пластической области решается краевая задача в смешанном виде, когда на контактной поверхности деформирующего инструмента (пуансона и матрицы) задаются напряжения в неявном виде, в виде связи между касательным и нормальным напряжениями.

Анализ процесса вытяжки с утонением стенки цилиндрической оболочки включает следующие этапы: формулировка основных уравнений и постановка краевых условий; определение напряжений и скоростей пластического течения; расчет накопленных деформаций и пластической повреждаемости материала.

**Основные уравнения и граничные условия.** При вытяжке цилиндрических деталей реализуется в общем случае осесимметричное НДС. Для полного представления об осесимметричном НДС достаточно определить, во-первых, поле напряжений и, во-вторых, поле скоростей пластического течения в одном меридиональном сечении деформируемого тела. При вытяжке с утонением цилиндрической оболочки с соотношениями ее толщины ( $s$ ) и диаметра ( $d$ )  $s/d \leq 0.05$  деформированное состояние является плоским, так как окружная деформация очень мала. Это обстоятельство позволяет свести задачу осесимметричной деформации цилиндрической тонкостенной оболочки к более частной задаче плоской деформации, то есть использовать частную форму для описания НДС в плоской системе декартовых координат  $x, y$ , (рис. 2) дифференциальными уравнениями равновесия (1), условием текучести Мизеса (2), условием соосности девiatorов скорости деформации  $\dot{\epsilon}_{ij}$  и напряжения  $s_{ij}$  (3) и условием несжимаемости (4):

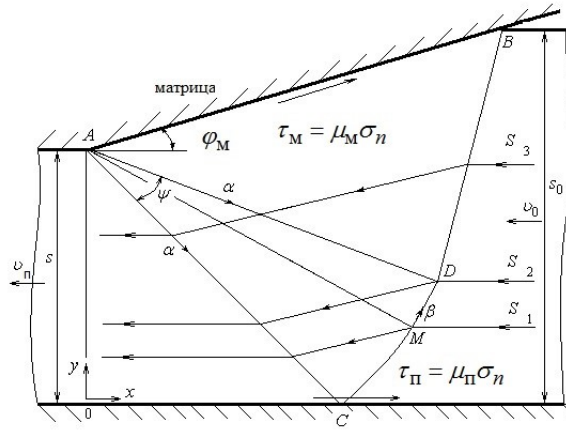


Рис. 2. Схема пластической области (краевые условия, поле линий скольжения и траектории движения частиц материала) для исходных данных:  $s_0/s = 1.6$ ,  $\varphi_M = 18^\circ$ ,  $\mu_\pi = 0.1$ ,  $\mu_M = 0.09$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{rz}^2 = 4\tau_s^2, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_x / \partial x - \partial v_y / \partial y}{\partial v_x / \partial y + \partial v_y / \partial x} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

Параметрическое представление компонент напряжений

$$\sigma_x = \sigma - \tau_s \sin 2\delta, \quad \sigma_y = \sigma + \tau_s \sin 2\delta, \quad \tau_{xy} = \tau_s \cos 2\delta \quad (5)$$

приводит уравнения (1) – (4) к следующему виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial x} - 2\tau_s \left( \frac{\partial \delta}{\partial x} \cos 2\delta + \frac{\partial \delta}{\partial y} \sin 2\delta \right) &= 0 \\ \frac{\partial \sigma}{\partial y} - 2\tau_s \left( \frac{\partial \delta}{\partial x} \sin 2\delta - \frac{\partial \delta}{\partial y} \cos 2\delta \right) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} + \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \operatorname{tg} 2\delta = 0, \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0. \quad (7)$$

Системы уравнений в напряжениях (6) и скоростях (7) относятся к гиперболическому типу и имеют по два попарно совпадающих семейства характеристических линий, описываемых дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \operatorname{tg} \delta \quad (\text{характеристики семейства } \alpha), \\ \frac{dy}{dx} &= -\operatorname{ctg} \delta \quad (\text{характеристики семейства } \beta), \end{aligned} \quad (8)$$

где параметр  $\delta$  представляет собой угол между осью  $x$  и касательной к характеристической линии семейства  $\alpha$  в каждой точке пластической области материала.

Характеристические линии совпадают с линиями скольжения и образуют в пластической области сетку взаимно ортогональных, вообще говоря, криволинейных линий  $\alpha$ ,  $\beta$ . Уравнения (6) и (7) в системе криволинейных координат  $\alpha$ ,  $\beta$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} d\sigma - 2\tau_s d\delta &= 0, & (\text{вдоль линий } \alpha), \\ d\sigma + 2\tau_s d\delta &= 0, & (\text{вдоль линий } \beta). \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} dv_\alpha - v_\beta d\delta &= 0, & (\text{вдоль линий } \alpha), \\ dv_\beta + v_\alpha d\delta &= 0, & (\text{вдоль линий } \beta). \end{aligned} \quad (10)$$

Соотношения в напряжениях (9) в интегральной форме:

$$\begin{aligned} \sigma/2\tau_s - \delta &= \xi(\beta), & (\text{вдоль линий } \alpha), \\ \sigma/2\tau_s + \delta &= \eta(\alpha), & (\text{вдоль линий } \beta), \end{aligned} \quad (11)$$

известны как интегралы пластичности Генки, а соотношения в скоростях (10) – как соотношения Гейрингер. Параметры  $\xi(\beta)$ ,  $\eta(\alpha)$  в соотношениях (11) определяются из граничных условий. Осредненное значение предела текучести при сдвиге  $\tau_s$  в соотношениях (11) можно определить из условия равенства плотности энергии пластического формоизменения упрочняемого материала и принимаемой модели идеально жестко-пластического материала.

Для определения НДС необходимо построить по уравнениям (8) поле линий скольжения в пластической области и определить в узловых точках по соотношениям (11) параметры напряжений  $\sigma/2\tau_s$ ,  $\delta$  и по соотношениям (10) компоненты скорости течения  $v_\alpha$ ,  $v_\beta$ . Решение уравнений (8) и (11) должно удовлетворять граничным условиям на контакте деформируемого материала с пуансоном и матрицей, которые обусловлены силами трения:

$$\tau_k = \mu\sigma_n, \quad (12)$$

где  $\tau_k$ ,  $\sigma_n$  – касательное напряжение и нормальное давление на контакте;  $\mu$  – коэффициент трения.

В результате соотношения (11) отображают линии скольжения в плоскости  $\sigma$ ,  $\tau$  по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} \frac{\tau}{\tau_s} &= \cos 2 \left[ \frac{\sigma}{2\tau_s} - \xi(\beta) \right], & (\text{линии скольжения } \alpha) \\ \frac{\tau}{\tau_s} &= \cos 2 \left[ -\frac{\sigma}{2\tau_s} + \eta(\alpha) \right], & (\text{линии скольжения } \beta). \end{aligned} \quad (13)$$

**Определение напряжений и скоростей пластического течения.** Расчёт НДС (см. табл. 1) проводится для следующих исходных данных (рис. 1): материал заготовки – чистая листовая медь (99.97%); наружный диаметр и толщина стенки исходной заготовки  $d_0 = 20.80$  мм,  $s_0 = 1.0$  мм; рабочий диаметр пуансона и матрицы  $d_{\text{П}} = 18.72$  мм,  $d_{\text{М}} = 19.96$  мм; угол рабочего конуса матрицы  $2\varphi_{\text{М}} = 36^\circ$ ; коэффициент трения на контактной поверхности пуансона и матрицы  $\mu_{\text{П}} = 0.1$ ,  $\mu_{\text{М}} = 0.09$ .

В таблице приведены значения среднего напряжения (отнесенного к пределу текучести при сдвиге)  $\sigma/\tau_s$ , параметра трехосности напряженного состояния  $\bar{\sigma}$  и параметрического угла  $\delta$  в узловых точках, расположенных на границе пластической области.

На рис. 2 показано соответствующее поле линий скольжения, включая границы пластической области. Вдоль прямолинейных отрезков линий скольжения, согласно соотношениям (11), среднее напряжение остается постоянным; поэтому  $\sigma_C = \sigma_A$ ,  $\sigma_D = \sigma_B$  (см. табл.1).

Таблица 1. Значения параметров напряжений и скоростей пластического течения в граничных узловых точках

Узловые точки	$\sigma/\tau_s$	$\bar{\sigma}$	$\delta$	$v_x/v_0$	$v_y/v_0$	$v_\alpha/v_0$	$v_\beta/v_0$
A	0.012	0.009	- 0.834	-1.61	0	-1.08	-1.18
B	- 0.686	- 0.396	- 0.387	-1.00	0	-0.97	-0.35
C	0.012	0.009	- 0.834	-1.28	-0.30	-0.72	-1.18
D	- 0.686	- 0.396	- 0.387	-1.15	-.38	-0.97	-0.75

Установленное поле линий скольжения  $\alpha$ ,  $\beta$  определяет границы пластической области  $AC$  и  $BDC$  в меридиональном сечении детали. Поле траекторий максимальных касательных напряжений  $\tau_{\alpha\beta}$  позволяет определить с помощью уравнений (10) поле скоростей пластического течения (рис. 3). Поле скоростей пластического течения отображает узловые точки сетки материальных линий, совпадающих с линиями скольжения  $\alpha$ ,  $\beta$ . Это отображение позволяет найти вектор скорости  $\vec{v}$  и его составляющие  $v_x$ ,  $v_y$  (или  $v_\alpha$ ,  $v_\beta$ ) для каждой узловой точки пластической области. Например, радиус-вектор отображенной точки  $m$  является вектором скорости  $\vec{v}_M$  материальной частицы, совпадающей с точкой  $M$  поля линий скольжения, а его составляющие – компонентами скорости  $v_{\alpha M}$ ,  $v_{\beta M}$ . Поле скоростей соответствует краевому условию на контакте с матрицей:  $v_x = -v_M \cos \phi_M$ ,  $v_y = -v_M \sin \phi_M$ , где  $v_M = v_0 \cos \delta_D / v_0 \cos \delta_D / \cos(\phi_M - \delta_D)$  – модуль вектора скорости материала на контакте с матрицей, а также условию сплошности материала для принятой схемы плоской деформации:  $v_0 = (s_0/s)/v_{II}$ .

Граничные линии  $BDC$  и  $AC$  являются линиями разрыва скорости. При пересечении частицами материала граничных линий их скорость изменяется скачком, причем разрыв испытывает касательная составляющая скорости по отношению к направлению границы:  $\Delta v_\tau = v_\tau^+ - v_\tau^-$ , где  $v_\tau^-$ ,  $v_\tau^+$  – значения касательной составляющей скорости по обе стороны от границы. Физически линии разрыва скорости представляют собой тонкий пластический слой, в котором касательная скорость материала  $v_\tau$  сильно изменяется по толщине слоя, а нормальная скорость  $v_n$  постоянна (ее изменение привело бы к появлению трещины).

Поле скоростей течения позволяет построить траектории движения частиц деформируемого материала. Произвольная линия тока  $s_T$  (проходящая через некоторую точку  $M$  на граничной линии  $BDC$ ) будет отображаться в плоскости скоростей ее годографом  $btca$ . Точка  $b$  определяет скорость частицы  $v_0$  до входа в пластическую область, точка  $t$  определяет ее скорость после пересечения граничной линии  $BDC$ , отрезок  $tc$  соответствует непрерывному изменению скорости при перемещении частицы в пределах централизованного веера  $ABC$ , точка  $a$  определяет скорость  $v_{II}$  после пересечения граничной линии  $AC$ . Годограф линий тока позволяет провести расчет накопления деформации частицами материала при их перемещении в пластической области.

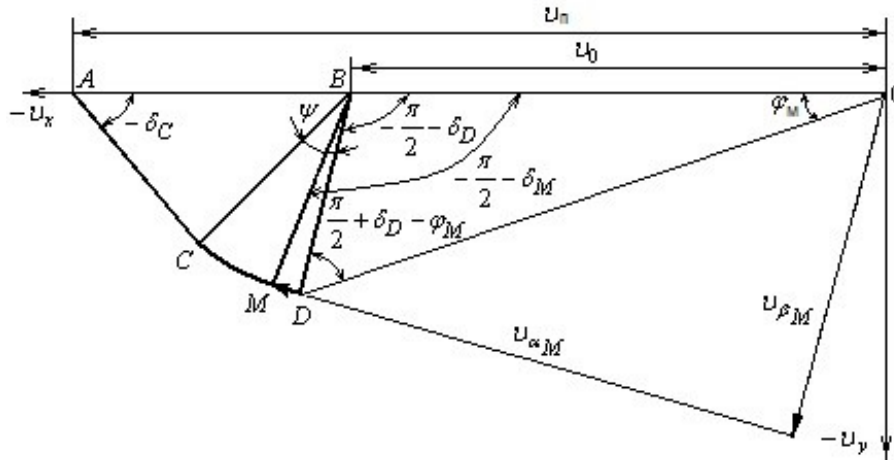


Рис. 3. Поле скоростей пластического течения

### Накопленные деформации и пластическая повреждаемость материала.

Интенсивность деформаций сдвига соответствует физическому сдвиговому механизму пластической деформации и оказывается удобной при изучении процессов пластического течения металлов методом линий скольжения и процесса развития повреждаемости порами в направлении полос скольжения [7].

В рассматриваемом процессе вытяжки материал накапливает пластическую деформацию, согласно годографу линии тока, следующим образом. Сначала, при пересечении граничной линии разрыва скорости  $BDC$ , материал получает “скачок” приращения деформации  $\Delta\Lambda_{BDC}$ . Далее, перемещение частицы в пределах пластической области  $ABC$  отображается отрезком  $mc$  годографа линии тока (рис. 3). Это позволяет определить приращение накопленной деформации  $\Delta\Lambda_{ABC}$  в пластической области  $ABC$  (до пересечения граничной линии  $AC$ ). Наконец, при пересечении граничной линии разрыва скорости  $AC$  на выходе из пластической области, материал получает “скачок” приращения деформации  $\Delta\Lambda_{AC}$ .

Суммарная накопленная частицами материала деформация

$$\varepsilon_i = \Lambda / \sqrt{3} = (\Delta\Lambda_{BDC} + \Delta\Lambda_{ABC} + \Delta\Lambda_{AC}) / \sqrt{3}. \quad (14)$$

Прогнозирование деформационной повреждаемости материала готовой детали проводилось на базе численного интегрирования определяющей зависимости

$$\omega = \int_0^{\Lambda} \frac{d\bar{\varepsilon}_{ii}(\Lambda)}{\bar{\varepsilon}_{ii\text{кр}}(\Lambda_{\text{пр}})}, \quad (15)$$

для нормированной меры повреждаемости  $\omega$  [8]. Входящие в интегральное соотношение (15) материальные функции  $\bar{\varepsilon}_{ii}(\Lambda)$  и  $\bar{\varepsilon}_{ii\text{кр}}(\Lambda_{\text{пр}})$  были ранее определены для разных материалов, в том числе для чистой меди. Входящая в зависимость (15) предельная деформация  $\Lambda_{\text{пр}}$  зависит от параметра трехосности напряженного состояния  $\bar{\sigma}$  и определяется по экспериментальной диаграмме пластичности  $\Lambda_{\text{пр}}(\bar{\sigma})$ , построенной

для изучаемых материалов. Экспериментальные зависимости  $\Lambda_{\text{пр}}(\bar{\sigma})$  вполне удовлетворительно описываются экспоненциальной функцией  $\Lambda_{\text{пр}} = B \exp[-c(\bar{\sigma})]$ , где  $B$ ,  $c$  – параметры, определяемые по экспериментальной кривой  $\Lambda_{\text{пр}}(\bar{\sigma})$ .

В рассматриваемом процессе вытяжки материал накапливает пластическую повреждаемость следующим образом: сначала, при пересечении граничной линии разрыва скорости  $BDC$ , где материал получает “скачок” приращения эквивалентной деформации  $\Delta\varepsilon_{iBDC} = \Delta\Lambda_{BDC}/\sqrt{3}$ ; далее, в пределах пластической области  $ABC$  ( $\Delta\varepsilon_{iABC}$ ) и при пересечении граничной линии разрыва скорости  $AC$  на выходе из пластической области ( $\Delta\varepsilon_{iAC}$ ). Накапливаемая повреждаемость, в соответствии с представленной схемой деформации имеет вид:

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega_{BDC} + \Delta\omega_{ABC} + \Delta\omega_{AC},$$

где  $\omega_0$  – поврежденность материала в состоянии поставки.

На рис. 4 показаны зависимости меры повреждаемости  $\omega$  от интенсивности деформаций для траекторий движения частиц материала с начальной координатой  $y_0/s_0 = 0.2; 0.32; 0.67$ .

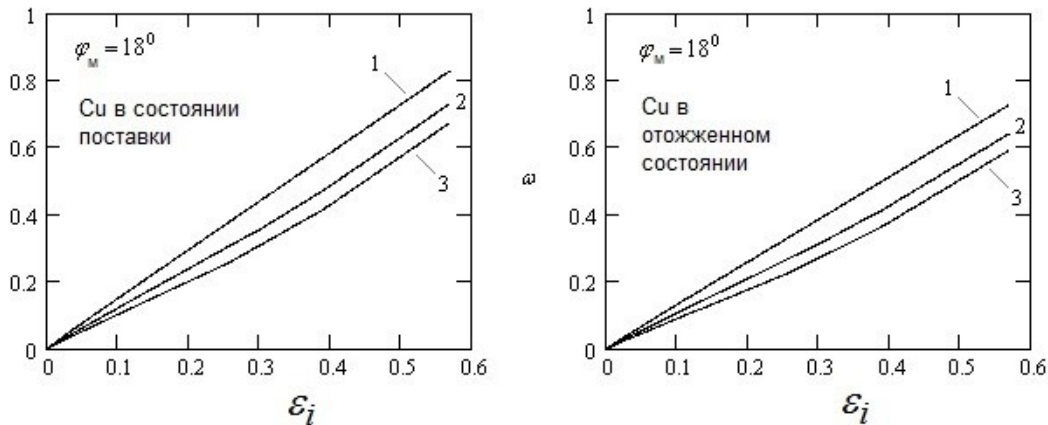


Рис. 4. Зависимость повреждаемости от интенсивности деформаций

Чистая листовая медь после рекристаллизационного отжига проявляет большую пластичность, чем в состоянии поставки. Соответственно материал готовой оболочки из отожженной меди будет иметь меньшую поврежденность ( $\omega = 0.59...0.73$ ) по сравнению с оболочкой из меди в состоянии поставки ( $\omega = 0.67...0.82$ ). Существенно также, что вдоль различных траекторий движения частиц накопление поврежденности происходит неравномерно и с разной интенсивностью. Это обстоятельство приводит к неравномерному распределению конечной поврежденности по толщине стенок готовой оболочки.

Рассмотрим возможность появления стадии коалесценции пор в пластической области. На рис. 5 приведены зависимости повреждаемости в начале коалесценции (слияния) пор ( $\omega_c$ ) от параметра трехосности напряженного состояния  $\bar{\sigma}$  при растяжении медных образцов с различной начальной объемной фракцией пор ( $f_0$ ).



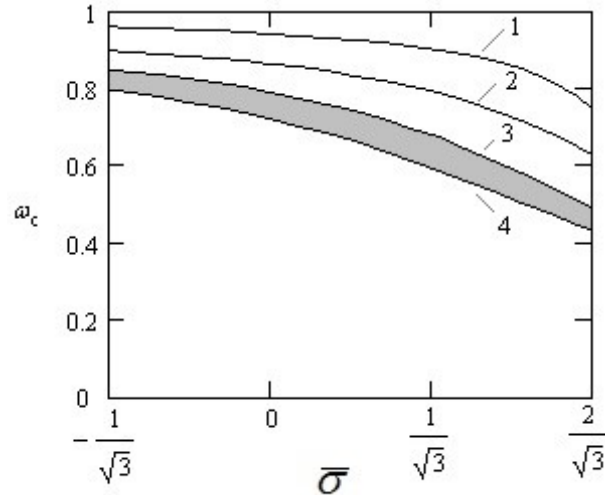


Рис. 5. Зависимость повреждаемости в начале коалесценции пор  $\omega_c$  от параметра  $\bar{\sigma}$  при растяжении медных образцов с различной начальной объемной фракцией пор ( $f_0$ ): 1 – для сплошных образцов с  $f_0 = 0.002$ ; 2 – для сплошных образцов с  $f_0 = 0.03$ ; полоса между 3 и 4 – для образцов с искусственными дефектами с  $f_0 = 0.4 \dots 0.45$

Зависимости  $\omega_c(\bar{\sigma})$  построены на основе литературных данных по пластической повреждаемости медных образцов. Опыты в интервале повышенных значений параметра  $\bar{\sigma} = [1; 2]$  проводились с насеченными образцами [9]. Исходя из экспериментальных данных, можно предположить, что коалесценция развивается от локализации мезоскопического пластического сдвига до режима утонения перемычек между порами, сопровождаемого пластической локализацией растяжения. Эта гипотеза подтверждается наблюдением стадии коалесценции, связанной с образованием микрополос сдвига [9] и обосновывает известный критерий начала коалесценции пор Броуна и Эмбери, основанный на явном мезомеханическом подходе. Зависимость  $\omega_c(\bar{\sigma})$  вполне удовлетворительно аппроксимируется функцией следующего вида:

$$\omega_c = \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg}(K(\bar{\sigma}) - C),$$

где  $K$  и  $C$  – параметры, рассматриваемые как функции объемной фракции пор  $f_0$  материала в исходном состоянии.

В рассматриваемом процессе вытяжки с начальной объемной фракцией пор  $f_0 = 0.002$  и реализуемого НДС ( $\bar{\sigma} = -1.188 \dots 0.021$ ) стадия коалесценции должна начаться при поврежденности  $\omega_c = 0.80 \dots 0.85$ . Прогнозируемые значения поврежденности материала готовой оболочки,  $\omega = 0.68 \dots 0.83$  – для чистой меди в состоянии поставки и  $\omega = 0.59 \dots 0.73$  – для отожженной меди (рис. 5), меньше величины  $\omega_c = 0.80 \dots 0.85$ . Следовательно, в рассматриваемом процессе вытяжки стадия коалесценция пор не наступит. Материал готовой оболочки будет иметь качественную микроструктуру, без полостных дефектов, образующихся в результате слияния пор.

Рассмотрим возможность снижения уровня деформационной повреждаемости материала готовой оболочки применением вытяжной матрицы с малым углом ( $\varphi_M =$

12°...13°) рабочего конуса. Пластическая область в зоне деформации будет в этом случае иметь значительно большую протяженность. Это приводит к «смещению» напряженного состояния в область отрицательных значений параметра  $\bar{\sigma}$  и, соответственно, к большей предельной деформации ( $\Lambda_{пр}$ ), по сравнению с вытяжкой через матрицы с большим углом рабочего конуса. Поле скоростей пластического течения является более равномерным и приводит к более равномерному нарастанию накопленных деформаций. Применение вытяжной матрицы с малым углом снижает поврежденность материала в состоянии поставки от значений  $\omega = 0.67...0.82$  до уровня  $\omega = 0.52...0.62$ . Применение этой матрицы для отожженного материала позволяет достичь минимального уровня поврежденности готовой оболочки  $\omega = 0.45...0.55$ . Естественно, что и при вытяжке оболочки через матрицу с малым углом конусности стадия коалесценции пор не наступит и материал готовых изделий будет иметь вполне качественную микроструктуру.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ренне И. П., Рогожин В. Н., Кузнецов В. П., Тутьшкин Н. Д. Вытяжка с утонением стенки. Тула, 1970. – 141 с.
- [2] Тутьшкин Н. Д. Кинетический подход к анализу и проектированию интенсивных процессов обработки давлением изделий с прогнозируемыми свойствами // Тульский политехнический ин-т. Тула, 1991. 32 с.: ил. Библиогр. назв. Деп. в ВНИИТЭМР 12.03.91., № 10.
- [3] Тутьшкин Н. Д. Теоретические основы и проектирование интенсивных процессов обработки давлением изделий с прогнозируемыми свойствами: Диссертация докт. техн. наук – Защищена 24.05.94; утв. 09.12.94; 05940001392. Тула, 1993. 459 с.
- [4] Тутьшкин Н. Д., Ефремова Н. Е., Травин В. Ю., Хавов В. Б. Структурные параметры деформируемых материалов при обработке давлением. Тула: Тул. гос. ун-т. 1997. 24 с.: ил. Библиогр.: 18 назв. – Деп. в ВИНТИ 01.12.97, № 3503 В97.
- [5] Травин В. Ю. Анализ повреждаемости деформируемого материала и степеней деформации на операциях вытяжки // Теория, технология, оборудование и автоматизации обработки металлов давлением и резанием. Тула: Тул. гос. ун-т, 1999. Вып. 2. С. 189 – 194.
- [6] Zapara M. A., Tutyshkin N. D., Muller W. H., Wille R. A study of ductile damage and failure of pure copper. Part II: Analysis of the deep drawing process of a cylindrical shell // Technische Mechanik. 2012. V. 32. P. 631–648.
- [7] Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. М.: Металлургия, 1971. 264 с.
- [8] Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
- [9] Pardoen T., Doghri I., Delannay F. Experimental and numerical comparison of void growth models and void coalescence criteria for the prediction of ductile fracture in copper bars // Acta Mater. 1998. V. 46. P. 541-552.

W. Y. Travin, N. D. Tutyshkin

## EXPERIMENTAL ANALYSIS OF DEFORMATION DAMAGE

*Tula State University, Tula, Russia*

*AO NPO «Splav», Tula, Russia*

**Abstract.** The analysis and modeling of processes of drawing of axisymmetric products. Deals with physical and mechanical aspects and criteria plastic power-demote. When drawing with wall thinning there is no noticeable change in diameter of the workpiece. Therefore, the deformation of an axisymmetric shell in the circumferential direction is small compared to the linear strain change in the length and thickness of the shell. This circumstance allows to make when the hood with thinning the plane strain condition.

**Keywords:** macro-level, meso-level, deformations, defects, damage, destruction

## REFERENCES

- [1] Renne I. P., Rogozhin V. N., Kuznetsov V. P., Tutyshkin N. D. Hood with wall thinning. Tula, 1970. 141 p.
- [2] Tutyshkin N. D. Kinetic approach to the analysis and design of intensive processes of pressure treatment of products with predictable properties // Tula Polytechnic Institute. Tula, 1991. 32 pp., Ill. – Bibliography name Dep. in VNIITEMR 12.03.91., № 10.
- [3] Tutyshkin N. D. Theoretical foundations and design of intensive processes processing by pressure of products with predicted properties: the Dissertation of the Dr. tech. Sciences – Protected on 24.05.94; approved 09.12.94; 05940001392. Tula, 1993. 459 s.
- [4] Tutyshkin N. D., Efremova N. E., Travin V. Yu., Havov V. B. Structural parameters of deformable materials during pressure treatment. Tula: Toole. state Univ., 1997. 24 pp., Ill. Bibliogr. : 18 titles. Dep. in VINITI 01.12.97, No. 3503 B97.
- [5] Travin V. Yu. Analysis of the damage to the deformable material and degrees deformations on drawing operations // Theory, technology, equipment and automation of metal forming and cutting. Tula: Tul. state Univ., 1999. Vol. 2. p. 189–194.
- [6] Zapara M. A., Tutyshkin N. D., Muller W. H., Wille R. A study of ductile damage and failure of pure copper – Part II: Analysis of the cylindrical shell // Technische Mechanik. 2012. v. 32. P. 631–648.
- [7] Ekobori T. Physics and mechanics of destruction and strength of solid bodies / T. Ekobori. M. : Metallurgy, 1971. 264 p.
- [8] Kachanov L. M. Foundations of the theory of plasticity. M. : Science, 1969. 420 p.
- [9] Pardoen T., Doghri I. , Delannay F. Experimental and numerical comparison of void growth models and void coalescence criteria for ductile fracture in copper bars // Acta Mater. 1998. v. 46. P. 541–552.

---

*Travin Wadim Yurievich*, Ph. D., AO NPO «Splav», Tula, Russia.

*Tutyshkin Nikolai Dmitrievich*

e-mail: nikolai.tutyshkin@mail.ru, Dr. Sci. Eng., Professor, Tula State University, Tula, Russia.