

УДК 539.374; 621.983

Яковлев С. С.
Платонов В. И.
Исаева А. Н.
Черняев А. В.

ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ОБРАТНОЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК В РЕЖИМЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Совершенствование конструкций изделий ответственного назначения определяет применение высокопрочных материалов и изготовление деталей и узлов со специальными, зависящими от условий эксплуатации, характеристиками. Это вызывает необходимость изыскания новых принципов технологии, точности ее расчета и сближения на этой основе стадий проектирования изделий и технологической подготовки производства. К числу наиболее перспективных и принципиально новых технологических процессов, направленных на совершенствование современного производства, относятся процессы медленного горячего формоизменения в режиме вязкого течения материала [1–3].

В различных отраслях машиностроения широкое распространение нашли полые толстостенные осесимметричные детали, имеющие наружные и внутренние утолщения, которые изготавливаются механической обработкой трубных заготовок из высокопрочных материалов. Технологические принципы формоизменения трубных заготовок в режиме вязкого течения могут быть применены в производстве толстостенных осесимметричных деталей из анизотропных высокопрочных сплавов.

Трубный прокат, подвергаемый штамповке, как правило, обладает анизотропией механических свойств, которая может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивое протекание технологических процессов обработки металлов давлением при различных термомеханических режимах деформирования, в частности операций изотермического обратного выдавливания трубных заготовок [4–7].

Целью работы является выявление закономерностей изменения кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний заготовки, величины накопленных микрповреждений, неоднородности эквивалентной деформации и сопротивления материала деформированию в стенке осесимметричной детали, силовых режимов и предельных возможностей формообразования в зависимости от технологических параметров и анизотропии механических свойств материала заготовки на основе разработанной математической модели операции изотермического обратного выдавливания коническим пуансоном толстостенных анизотропных трубных заготовок в режиме кратковременной ползучести.

Рассмотрим операцию обратного выдавливания толстостенных трубных заготовок из анизотропного материала в режиме кратковременной ползучести коническим пуансоном с углом конусности α и степенью деформации $\varepsilon = 1 - F_1/F_0$, где F_0 и F_1 – площади поперечного сечения трубной заготовки и полуфабриката соответственно (рис. 1).

Материал заготовки принимается ортотропным, обладающим цилиндрической анизотропией механических свойств, подчиняющийся ассоциированному закону течения и уравнению состояния [1]:

$$\xi_e = B(\sigma_e / \sigma_{e0})^n,$$

где ξ_e и σ_e – эквивалентные скорость деформации и напряжение при ползучем течении материала;

n и B – константы материала, зависящие от температуры испытаний;

σ_{e0} – произвольная величина напряжений.

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{z\rho}}{\rho} = 0$$

с уравнениями связи между напряжениями и скоростями деформаций:

$$\sigma_z - \sigma_\theta = \frac{2}{3} \frac{\sigma_e}{\xi_e} \frac{(R_z R_\theta + R_z + R_\theta)(R_z \xi_z - R_\theta \xi_\theta)}{R_z R_\theta (1 + R_\theta + R_z)}; \quad \sigma_\theta - \sigma_\rho = \frac{2}{3} \frac{\sigma_e}{\xi_e} \frac{(R_z R_\theta + R_z + R_\theta)(\xi_\theta - R_z \xi_\rho)}{R_z (1 + R_\theta + R_z)};$$

$$\sigma_\rho - \sigma_z = \frac{2}{3} \frac{\sigma_e}{\xi_e} \frac{(R_z R_\theta + R_z + R_\theta)(R_\theta \xi_\rho - \xi_z)}{R_\theta (1 + R_\theta + R_z)}; \quad \tau_{\rho z} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_e}{\xi_e} \frac{(R_z R_\theta + R_z + R_\theta)}{R_{\rho z} R_z} \xi_{\rho z}$$

при следующем граничном условии:

$$\text{при } z = l \quad \Delta \sigma_z = \tau_{s\rho z} \sin \beta \cos \beta.$$

Граничные условия в напряжениях на контактных поверхностях пуансона и матрицы задаются в виде закона Кулона $\tau_{km} = \mu_m \sigma_{nm}$ и $\tau_{kn} = \mu_n \sigma_{nm}$, где μ_m и μ_n – коэффициенты трения на контактных поверхностях матрицы и пуансона.

Осевая сила обратного выдавливания определяется следующим образом:

$$P_z = P_{z0} + P_{z1} + P_{z2},$$

$$\text{где } P_{z0} = 2\pi \int_{D_3/2-s_0}^{D_3/2} \sigma_z(\rho, \theta) \rho d\rho; \quad P_{z1} = \pi D_3 \int_0^l \mu_m \sigma_n dz; \quad P_{z2} = \pi \int_0^l (2\rho + d\rho) \mu_n \sigma_n \frac{dz}{\cos \alpha} \cos \alpha.$$

Исследовано влияние степени деформации, геометрии и скорости перемещения инструмента, анизотропии механических свойств материала заготовки и условий трения на инструменте на силу обратного выдавливания трубных заготовок из титанового ВТ6С ($T = 930^\circ C$) и алюминиевого АМг6 ($T = 450^\circ C$) сплавов. Механические характеристики исследуемых материалов приведены в работе [1]. Расчеты выполнены при $s_0 = 4$ мм; $D_3 = 40$ мм.

На рис. 2 приведены графические зависимости изменения относительной силы $\bar{P} = P / [\pi(D_3 - s_0)s_0\sigma_{z0}]$ от степени деформации ε при обратном выдавливании трубных заготовок из сплава ВТ6С. Здесь кривая 1 соответствует расчетам при скорости перемещения пуансона $V = 0,0005$ мм/с, кривая 2 – 0,001 мм/с, кривая 3 – 0,003 мм/с, кривая 4 – 0,005 мм/с. Из графиков видно, что с увеличением V относительная величина силы \bar{P} возрастает. При больших значениях ε с увеличением скорости перемещения пуансона \bar{P} возрастает интенсивнее.

Графические зависимости изменения относительной силы \bar{P} от угла конусности пуансона α при обратном выдавливании трубных заготовок из сплава АМг6 приведены на рис. 3. Установлено что с увеличением α от 10° до 50° относительная величина силы \bar{P} возрастает в 1,4...2,5 раза. Выявлены оптимальные углы конусности пуансона в пределах $20...25^\circ$, соответствующие наименьшей величине силы. Величина оптимальных углов конусности пуансона α с увеличением степени деформации ε смещается в сторону больших углов.

Исследовано влияние условий трения на инструменте на относительную силу \bar{P} обратного выдавливания. Коэффициент трения на пуансоне варьировался в пределах $\mu_n = 0,1...0,4$ при фиксированном коэффициенте трения на матрице $\mu_m = 0,1$. Установлено, что с ростом коэффициента трения на пуансоне μ_n величина относительной силы \bar{P} возрастает. Этот эффект проявляется существенно при больших величинах степени деформации ε . Так, при $\varepsilon = 0,1$ увеличение отношения μ_n/μ_m от 1 до 4 приводит к росту \bar{P} на 20 %, при $\varepsilon = 0,5$ – на 50 %. Анализ графических зависимостей и результатов расчета показывает,

что при увеличении D/s от 5 до 20 сила \bar{P} возрастает на 15–25 %, где меньшие значения соответствуют $\varepsilon = 0,1$, большие – $\varepsilon = 0,5$. Увеличение отношения D/s от 20 до 25 не оказывает существенного влияния на силу обратного выдавливания.

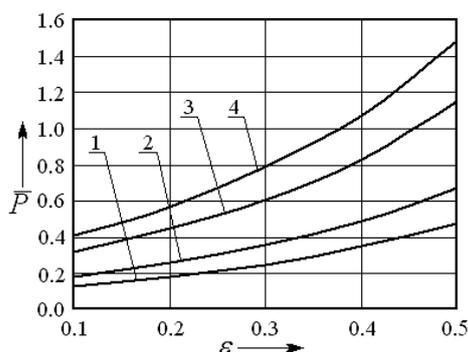


Рис. 2. Зависимости изменения \bar{P} от ε для сплава ВТ6С
($\alpha = 30^\circ$; $\mu_m = 0,1$; $\mu_n = 0,2$)

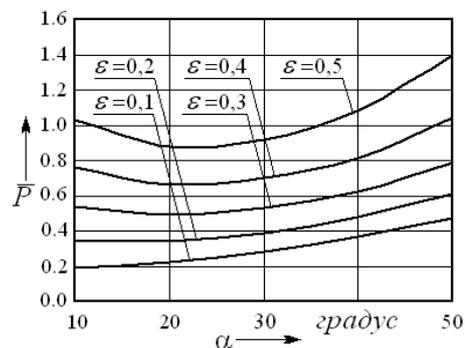


Рис. 3. Зависимости изменения \bar{P} от α для сплава АМг6
($V = 0,005$ мм/с; $\mu_m = 0,1$; $\mu_n = 0,2$)

Оценено влияние коэффициента нормальной анизотропии R на силовые режимы при обратном выдавливании трубных заготовок из сплавов ВТ6С и АМг6. Анализ результатов расчета показывает, что с увеличением R от 0,2 до 2 сила \bar{P} увеличивается на 30–50 %. Наиболее интенсивно рост \bar{P} проявляется при больших значениях угла конусности пуансона α . Выполнены исследования зависимости относительной силы \bar{P} от коэффициентов цилиндрической анизотропии R_z и R_θ , которые варьировались в диапазоне 0,2–2,0. Установлено, что с увеличением R_θ и уменьшением R_z относительная сила обратного выдавливания возрастает. Наименьшие значения силы \bar{P} наблюдаются при $R_\theta = 0,2$ и $R_z = 2,0$.

Предельные возможности формоизменения в процессах обработки металлов давлением, протекающих при различных температурно-скоростных режимах деформирования, часто оцениваются на базе феноменологических моделей разрушения. В зависимости от условий эксплуатации или последующей обработки изготавливаемого изделия уровень повреждаемости не должен превышать величины χ (первый критерий) [1, 8, 9]:

$$\omega_A = \int_0^t \frac{\sigma_e \xi_e dt}{A_{np}} \leq \chi; \quad \omega_e = \int_0^t \frac{\xi_e dt}{\varepsilon_{enp}} \leq \chi$$

для материалов, подчиняющихся энергетической и кинетической теориям ползучести и повреждаемости соответственно.

Здесь $A_{np} = A_{np}(\sigma/\sigma_e, \alpha, \beta, \gamma)$, $\varepsilon_{enp} = \varepsilon_{enp}(\sigma/\sigma_e, \alpha, \beta, \gamma)$ – удельная работа разрушения и предельная эквивалентная деформация; ω_A и ω_e – величина накопленных микроповреждений по энергетической и кинетической теории ползучести и повреждаемости; σ – среднее напряжение; $\sigma = (\sigma_\rho + \sigma_t + \sigma_z)/3$; α, β, γ – углы между первой главной осью напряжения относительно главных осей анизотропии x, y, z ; χ – величина, которая учитывает условия эксплуатации изделия или вида последующей термической обработки.

Предельные возможности формоизменения также оценены из условия, что максимальная величина осевого напряжения $|\sigma_{z \max}|$, передающегося на стенку, не должна превышать величины напряжения σ_{sz} (второй критерий):

$$|\sigma_{z \max}| \leq |\sigma_{sz}|; \sigma_{sz} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{R_z + R_z R_\theta + R_\theta}{R_\theta (R_z + 1)}} \sigma_e$$

и по условию устойчивости трубной заготовки из анизотропного материала в виде образования складок, полученного на основании статического критерия устойчивости (третий критерий) [1]:

$$\sigma_{z \text{ кр}} \leq |\sigma_z|; \sigma_{z \text{ кр}} = B_1 \bar{E}_k \left[\frac{\pi^2 h^2}{3H^2} + \frac{H^2}{4\pi^2 R_{cp}^2} \right],$$

где H, H_0 – высота цилиндрической части изделия и заготовки; $H = H_0 / e^{\varepsilon_z}$;

$\varepsilon_z = \ln(H_0 / H)$; $h = s_0 e^{\varepsilon_z}$;

R_{cp} – радиус заготовки по срединной поверхности;

V – скорость перемещения в меридиональном направлении;

$$\bar{E}_k = \frac{\{\bar{C}(R_i)|V|\}^{1/n}}{nB^{1/n}H^{1/n}\bar{C}(R_i)\frac{|V|}{H}dt}; B_1(R_i) = \frac{2(R_z + R_\theta + R_z R_\theta)(1 + R_\theta)}{3R_i(1 + R_\theta + R_z R_\theta)};$$

$$\bar{C}(R_i) = \sqrt{\frac{2(R_z + R_\theta + R_z R_\theta)}{3} \frac{(R_z R_\theta + R_\theta^2 + 2R_\theta + 1 + R_z^3)^{1/2} d\varepsilon_z}{R_\theta^{1/2}(1 + R_z + R_\theta)}}.$$

Исследовано влияние геометрии и скорости перемещения инструмента, анизотропии механических свойств материала и отношения начальных размеров заготовки на предельную степень деформации при обратном выдавливании трубных заготовок из сплавов ВТ6С и АМГ6, механические характеристики которых приведены в работе [2].

На рис. 4 представлены графические зависимости предельной степени деформации ε_{np} от угла конусности пуансона α для сплава АМГ6. Здесь кривые 1, 2, 3 соответствуют результатам расчетов по первому критерию при $\chi \leq 1$, $\chi \leq 0,65$ и $\chi \leq 0,25$ соответственно, кривые 4, 5 – по второму критерию при $\varepsilon_z = 0,04$ и $\varepsilon_z = 0,02$ соответственно и кривая 6 – по третьему критерию. Расчеты выполнены при $s_0 = 4$ мм; $D_3 = 40$ мм; $H_3 = 80$ мм; $\mu_n = 0,2$; $\mu_M = 0,1$.

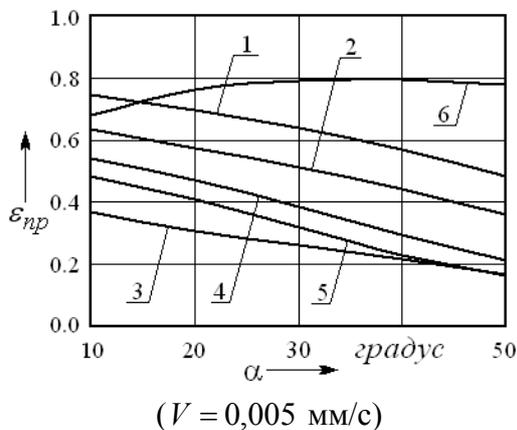


Рис. 4. Зависимости изменения ε_{np} от α для сплава АМГ6

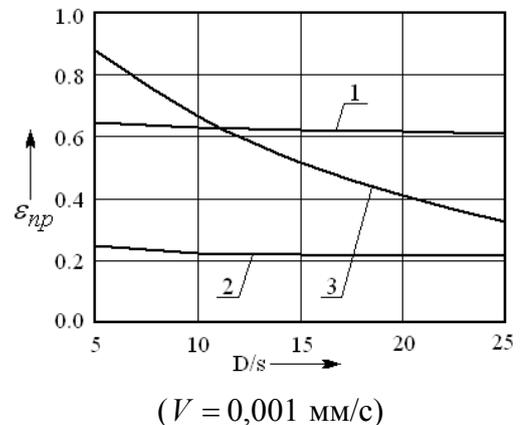


Рис. 5. Зависимости изменения ε_{np} от D/s для сплава ВТ6С

Анализ графиков и результатов расчета показывает, что при увеличении α с 10° до 50° величина ε_{np} уменьшается для сплава ВТ6С на 20 и 60 %, для сплава АМг6 – на 35 и 40 % по первому и второму критериям соответственно. По третьему критерию выявлены оптимальные углы конусности пуансона в пределах $20...30^\circ$ для сплава ВТ6С и $30...40^\circ$ для сплава АМг6, соответствующие наибольшей величине ε_{np} .

Выполнены исследования зависимости предельной степени деформации ε_{np} от отношения диаметра к толщине заготовки D/s (рис. 5). Предельные возможности формоизменения оценивались по величине накопленной повреждаемости при $\chi = 1$ (кривая 1), по максимальной величине осевого напряжения, соответствующей деформации стенки трубной заготовки при $\varepsilon_z = 0,04$ (кривая 2) и по условию устойчивости трубной заготовки из анизотропного материала в виде образования складок (кривая 3). Установлено, что при увеличении отношения D/s величина ε_{np} уменьшается, что говорит о менее благоприятных условиях деформирования. Наиболее значительно размеры заготовки сказываются на предельных степенях деформации, ограничивающихся третьим критерием. При увеличении D/s от 5 до 25 значения ε_{np} , полученные по третьему критерию, снижаются в 2,6 раза, по первому и второму критериям – на 5–15 %.

Исследовано влияние скорости перемещения пуансона V на предельную степень деформации ε_{np} при обратном выдавливании трубных заготовок из сплава АМг6, поведение которого описывается энергетической теорией ползучести и повреждаемости. Установлено, что с увеличением V от 0,001 мм/с до 0,005 мм/с величина ε_{np} уменьшается на 15–25 %.

Оценено влияние коэффициента нормальной анизотропии R и коэффициентов цилиндрической анизотропии R_z и R_θ , на предельные возможности формоизменения при обратном выдавливании трубных заготовок из сплавов ВТ6С и АМг6. Анализ результатов расчета показывает, что с увеличением R с 0,2 до 2,0 предельная степень деформации ε_{np} уменьшается на 15–20 %, 50–60 % и 25–30 % по первому, второму и третьему критериям соответственно. Установлено, что по первому критерию при $R_\theta = 0,2$ с увеличением R_z от 0,2 до 2,0 предельная степень деформации ε_{np} уменьшается на 20...25 %. При $R_\theta = 1,0$ и $R_\theta = 2,0$ имеется оптимум ε_{np} , соответствующий $R_z = 1,0$. Увеличение R_z от 0,2 до 2,0 и уменьшение R_θ от 2,0 до 0,2 приводит к росту предельной степени деформации в 2...3 раза по второму критерию и на 25–75 % по третьему критерию.

Оценено влияние технологических параметров и механических свойств материала на неоднородность распределения эквивалентной деформации $\delta_\varepsilon = (\varepsilon_{e\max} - \varepsilon_{e\min}) / \varepsilon_{e\min}$ и эквивалентного напряжения $\delta_\sigma = (\sigma_{e\max} - \sigma_{e\min}) / \sigma_{e\min}$ в очаге деформации операции обратного выдавливания трубных заготовок в режиме кратковременной ползучести. Здесь $\varepsilon_{e\max}$, $\varepsilon_{e\min}$ и $\sigma_{e\max}$, $\sigma_{e\min}$ – максимальная и минимальная величины эквивалентных деформаций и напряжений по толщине стенки детали. Установлено, что величины неоднородности эквивалентной деформации δ_ε и эквивалентного напряжения δ_σ в стенке детали с уменьшением угла конусности пуансона α и увеличением степени деформации ε падают, что говорит о более благоприятных условиях формирования механических свойств материала стенки изготавливаемого изделия. Увеличение угла конусности пуансона с 10° до 50° сопровождается ростом неоднородности эквивалентной деформации по толщине детали в 5...7 раз и ростом величины неоднородности эквивалентного напряжения в 3...6 раза для сплава

АМг6 и в 4...7 раз для сплава ВТ6С. Показано, что с увеличением коэффициента нормальной анизотропии R от 0,2 до 2 неоднородность эквивалентной деформации δ_ε возрастает на 20–40 %, а неоднородность эквивалентного напряжения δ_σ возрастает в 1,4...2,8 раза.

Выполнены экспериментальные исследования влияния скорости перемещения и угла конусности инструмента на силу обратного выдавливания. Сравнение теоретических расчетов и экспериментальных данных по силовым режимам операции изотермического обратного выдавливания толстостенных трубных заготовок указывает на удовлетворительное их согласование (расхождение не превышает 10...15 %).

Работа выполнена по государственному заданию Министерства образования и науки Российской Федерации на 2012–2014 годы и грантам РФФИ.

ВЫВОДЫ

Выявлены закономерности изменения кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний заготовки, величины накопленных микрповреждений, неоднородности эквивалентной деформации и сопротивления материала деформированию в стенке осесимметричной детали, силовых режимов и предельных возможностей формообразования в зависимости от технологических параметров, скорости перемещения пуансона, геометрических размеров заготовки и детали и анизотропии механических свойств материала заготовки на основе разработанной математической модели операции изотермического обратного выдавливания коническим пуансоном толстостенных трубных заготовок, обладающих цилиндрической анизотропией механических свойств, протекающих в условиях осесимметричного нерадиального течения материала, в режиме кратковременной ползучести.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов* / С. П. Яковлев, В. Н. Чудин, Я. А. Соболев, С. С. Яковлев, В. И. Трегубов, С. Н. Ларин / под ред. С. С. Яковлева. М. : Машиностроение, 2009. – 352 с.
2. *Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести* / С. С. Яковлев, С. П. Яковлев, В. Н. Чудин, В. И. Трегубов, А. В. Черняев / под ред. С. С. Яковлева. – М. : Машиностроение, 2009. – 412 с.
3. *Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. Т. 4. Листовая штамповка* / под общ. ред. С. С. Яковлева ; ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2010. – 732 с.
4. *Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов* / С. П. Яковлев, В. Н. Чудин, С. С. Яковлев, Я. А. Соболев. – М. : Машиностроение, 2004. – 427 с.
5. *Гречников Ф. В. Деформирование анизотропных материалов* / Ф. В. Гречников. – М. : Машиностроение, 1998. – 446 с.
6. *Яковлев С. П. Обработка давлением анизотропных материалов* / С. П. Яковлев, С. С. Яковлев, В. А. Андрейченко. – Кишинев : Квант, 1997. – 331 с.
7. *Яковлев С. С. Теория и технология штамповки анизотропных материалов* / С. С. Яковлев, В. Д. Кухарь, В. И. Трегубов ; под ред. С. С. Яковлева. – М. : Машиностроение, 2012. – 400 с.
8. *Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением* / В. Л. Колмогоров. – Екатеринбург : Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. – 836 с.
9. *Богатов А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов* / А. А. Богатов. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с.

Яковлев С. С. – д-р техн. наук, проф. ТулГУ;
Платонов В. И. – канд. техн. наук, доц. ТулГУ;
Исаева А. Н. – аспирант ТулГУ;
Черняев А. В. – д-р техн. наук, доц. ТулГУ.

ТулГУ – Тульский государственный университет, г. Тула, Россия.

E-mail: mpf-tula@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 22.02.2013 г.