

Рис. 3. Хронология загрузки центрального процессора и использования физической памяти

Библиографические ссылки

1. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М. : Мир, 1979. – 392 с.
2. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / А. М. Губертов, В. В. Миронов, Д. М. Борисов, В. Н. Баскаков ; под ред. акад. А. С. Коротева. – М. : Машиностроение, 2004.
3. Композиционные материалы : справочник / под ред. акад. В. В. Васильева. – М. : Машиностроение, 1990.

4. Суменков Н. Г., Еришова Н. Н. Программа расчета теплозащиты осесимметричных каналов сложной формы с учетом дополнительного мгновенного внутреннего тепловыделения и внешних потоков различной природы. Шифр программы П065 / ОАО «НПО "ИСКРА"». – Пермь, 2003.
5. Сегерлинд Л. Указ. соч.
6. Лурье А. И. Теория упругости. – М. : Наука, 1970. – 940 с.
7. Коваленко А. Д. Термоупругость. – Киев : Вища шк., 1975. – 215 с.

Получено 11.05.2016

УДК 621.735.3:621.983.31

П. М. Винник, кандидат физико-математических наук, доцент, Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург
К. М. Иванов, доктор технических наук, профессор, Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург
Г. А. Данилин, доктор технических наук, профессор, Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
 ФОРМИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ,
 ИЗГОТОВЛЕННЫХ ВЫТЯЖКОЙ С УТОНЧЕНИЕМ СТЕНКИ**

Современные задачи технологической подготовки предъявляют более жесткие требования к математическому аппарату моделирования процессов штамповки. Математические модели, используемые в современных системах технологической подготовки производства, должны быть комплексными и прогнозировать параметры качества изделия с заданной достоверностью.

С позиций разработанной в БГТУ «Военмех» информационно-системной идеологии [1] цели технологической подготовки производства задаются как области допустимых значений (ОДЗ) параметров

KX_{ij} , контролируемых в производстве, принадлежность которым соответствует достижению цели, и ущербов $E_v(KX_{ij})$ (определяются с учетом назначения детали) для всех v различных возможностей непопадания вектора параметров в область $\left\{ KX_{ij} \in [KX_{ij}]_{\gamma_{ij}} \mid i = 1, n; j = 1, m \right\}$ (n – число параметров; m – число этапов технологического процесса; $[KX_{ij}]_{\gamma_{ij}}$ – границы допустимых значений KX_{ij} ,

соответствующие доверительной вероятности γ_{ij} ; ущерб – снижение расчетных значений показателей качества изделия (брак) из-за несоответствия KX_{ij} требованиям $[KX_{ij}]_{\gamma_{ij}}$. Параметры KX_{ij} – показатели вероятностной природы, характеризующие свойства изделия в течение производственного процесса. Тогда полное достижение цели состоит в выполнении условий

$$\begin{aligned} & 1) \left\{ KX_{ij} \in [KX_{ij}]_{\gamma_{ij}} \mid i=1, n; j=1, m \right\}; \\ & 2) E_v(KX_{ij}) \xrightarrow{i=1, \dots, n, j=1, \dots, m, v=1, \dots, N} 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Итак, на стадии технологической подготовки производства необходимо осуществлять прогноз формирования контролируемых характеристик KX_{ij} с определенной доверительной вероятностью, а также выполнения условий (1).

При изготовлении изделий ответственного назначения (например, гильз стрелкового оружия) задается достаточно сложный комплекс контролируемых характеристик, включающий не только геометрические, метрологические параметры, но и закономерности их изменения. Так, для металлической гильзы задается закон изменения σ_b по ее длине с допуском. Одним из интегральных показателей, характеризующих физико-механические свойства, является степень деформации e_i . Для прогнозирования величин KX_{ij} необходим надежный математический аппарат расчета e_i в технологических процессах.

В статье рассмотрены модели формирования механических свойств в процессах вытяжки с утонением стенки. Взят один этап технологического процесса – вытяжка, то есть $m=1$. Есть зависимость между степенью деформации e_i по Ильюшину А. А., твердостью, микроструктурой и σ_b (см. [2–4]). Как параметры возьмем $KX_1 = e_i$ и KX_2 – форму, принимаемую после вытяжки слоем точек, до того – горизонтальным. Форма (кривая), описывает перемещения точек и связана с микротвердостью и микроструктурой.

В зависимости от назначения к изделиям предъявляются разные требования по степени деформации. Так, для колец подшипников требуется достижение определенной твердости на внутренней поверхности. Для предохранительных колпачков требования предъявляются к наружной поверхности, а для деталей, предназначенных к работе под внутренним давлением, требуется равномерность e_i по всей толщине стенки. Итак, $[KX_1]_{\gamma_1}$ имеет вид $e_{i0} \leq e_i \leq e_{i1}$.

Условиями на KX_2 могут быть функциональные неравенства на форму слоя.

По [5, (1.51, 1.52)] степень деформации e_i по Ильюшину А. А. вычисляется из уравнения в частных производных, которое зависит от проекции вектора скорости точки и интенсивности скоростей деформации \dot{e}_i . В [6, гл. 15] даны расчеты и анализ процесса вытяжки с утонением. Принято, что задача – плоская. Взята полярная система координат, ее начало – точка пересечения конусной поверхности матрицы и наружной поверхности пуансона. Полярная ось идет вверх. Здесь, как в [7], и в отличие от [8], очаг пластической деформации (ОПД) в радиальном направлении ограничен окружностями $r=b$ и $r=a$ ($a < b$); $e_{i0}(\varphi)$ – степень деформации, ранее приобретенная частицей, входящей в ОПД под углом φ ; $C = \beta(\mu_1/2 - \mu)/\alpha$; $C_1 = \beta\mu_1/2$; μ_1 – коэффициент трения по поверхности пуансона, μ – по поверхности матрицы (считаем, что $\mu < 1/\beta\sqrt{3} \approx 0,49987$) (принят закон Зибеля, см. [9, с. 94]); α – угол конусности матрицы; v_0 – скорость пуансона. Полагая $v_\varphi = 0$, находим $v_r = f(\varphi)/r$, где $f(\varphi) < 0$ – функция, определенная в [10] дифференциальным уравнением, зависящим от α и μ, μ_1 , затем \dot{e}_i . Базируясь на построениях из [11], находим

$$\begin{aligned} f(\varphi) &= -v_0 a \cdot e^{\frac{2(6C_1\varphi - 3C\varphi^2)}{(\sqrt{3-9C_1^2} + \sqrt{3-9(C_1-C\varphi)^2})}} \text{ и} \\ e_{i,fin}(\varphi) &= \sqrt{12} \left/ \left(3\sqrt{1-3(0,5\beta\mu_1(1-\varphi/\alpha) + \beta\mu\varphi/\alpha)^2} \right) \right. \times \\ & \quad \times \ln(b/a) + e_{i0}(\varphi). \end{aligned} \quad (2)$$

Вычислим форму слоя материальных точек, располагавшегося в верхней жесткой области горизонтально, после прохождения ОПД. В зависимости от угла φ входа в ОПД точки пройдут путь $A_1 A_2 A_3 A_4$ за разное время $t(\varphi)$. Их расположение определится временем выхода на l_0 . Для любого $0 \leq \varphi \leq \alpha$ (рис. 1)

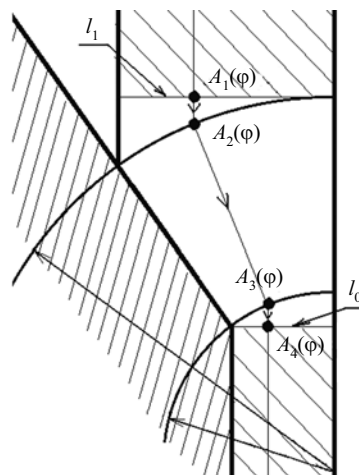


Рис. 1. Траектория движения материальной точки через ОПД

$$t(\varphi) = t_{A_4A_4}(\varphi) = (b^2 - a^2 \cdot \cos(\alpha)) / v_0 a + (b^2 - a^2)(-\cos(\varphi) - v_0 a / (v)) / v_0 a. \quad (3)$$

Так как $t'_{A_4A_4}(\varphi) > 0$ при всех $0 \leq \varphi \leq \alpha$, то время $t(\varphi)$ возрастает с ростом φ .

Форма ОДЗ коэффициентов трения μ_1, μ при ограничениях на e_i разных типов находится из (2). Неравенство вида $e_{i,fin}(\varphi) \leq e_{i1}$ при фиксированном φ задает полуплоскость, проходящую через $B = (k; 2k)$, где $k = \sqrt{3(e_{i1})^2 - 4 \ln^2(b/a) / 3\beta e_{i1}}$; при заданном интервале изменения φ – пересечение полуплоскостей. Различные формы ОДЗ μ_1, μ показаны на рис. 2.

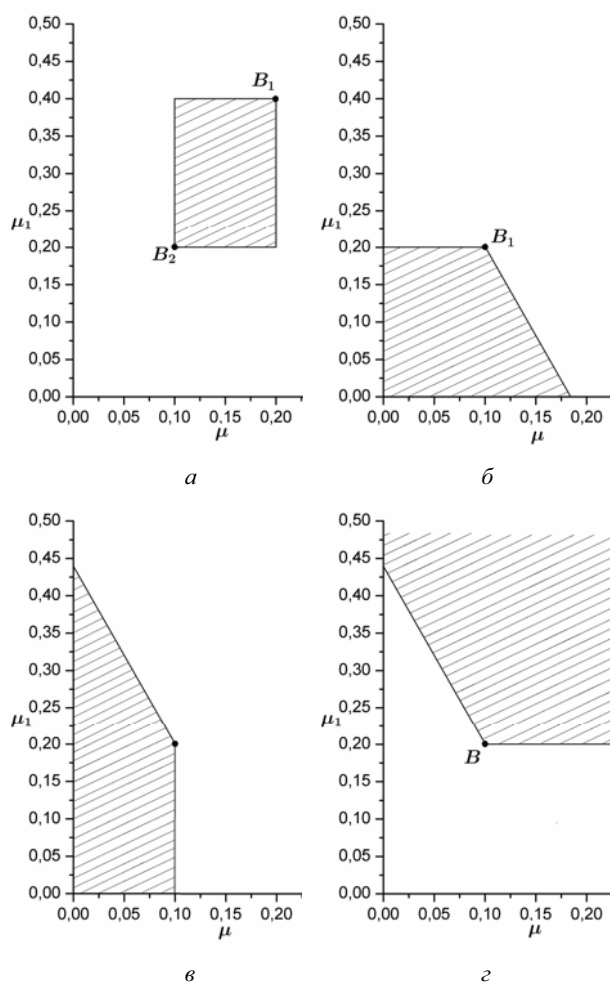


Рис. 2. ОДЗ коэффициентов μ_1, μ для различных условий: а – по всей толщине стенки требуем $e_{i2} \leq e_{i,fin}(\varphi) \leq e_{i1}$ (B_1 соответствует e_{i1} , $B_2 - e_{i2}$); б – при углах $0 \leq \varphi \leq \varphi_2$ (у внутренней поверхности) требуем $e_{i,fin}(\varphi) \leq e_{i1}$ (наклонная линия соответствует углу φ_2); в – при углах $\varphi_2 \leq \varphi \leq \alpha$ (у внешней поверхности) требуем $e_{i,fin}(\varphi) \leq e_{i1}$; г – при углах $0 \leq \varphi \leq \varphi_2$ требуем $e_{i2} \leq e_{i,fin}(\varphi)$

Ограничения на параметр KX_2 введем так. Рассмотрим горизонтальный слой. При вытяжке с утонением слой приобретает форму, определяемую (3). Оценим энергию деформации слоя. Главная часть энергии изгиба [12, с. 186; 11, с. 37] круглой пластинки пропорциональна величине $\int_{R_b}^{R_n} (w''(r))^2 r dr$ (R_b, R_n – внутренний и наружный радиусы; $w(r)$ – линия прогиба), то есть величине

$$W = \int_0^\alpha (t'' / \cos^2(\varphi) + t' \operatorname{tg}(\varphi) / \cos^2(\varphi))^2 \sin(\varphi) d\varphi$$

(учитываем, что $w(r(\varphi)) = v_0 t_{A_4A_4}(\varphi)$ и $r = R_b + b \sin(\varphi)$, пренебрегаем взаимодействием слоев, считаем слой кольцевой пластиной). Значения W для разных μ_1, μ показаны на рис. 3. В качестве ограничения на KX_2 примем (U_0 – заданный порог)

$$\int_0^\alpha (t'' / \cos^2(\varphi) + t' \operatorname{tg}(\varphi) / \cos^2(\varphi))^2 \sin(\varphi) d\varphi \leq U_0. \quad (4)$$

Для выполнения (4) нужно взять область между линиями, соответствующими U_0 на рис. 3. Находим ОДЗ, обеспечивающую выполнение условий и на KX_1 , и на KX_2 наложением областей из рис. 2 и рис. 3, б. Так как область на рис. 3, б для любого U_0 уже в направлении оси μ , чем в направлении оси μ_1 , то механические свойства детали, изготовленной вытяжкой с утонением, всегда чувствительнее к изменению μ , чем μ_1 . Взяв для оценки зависимости e_i от μ_1, μ отношение частных производных e_i по μ_1, μ , видим, что μ_1 сильно влияет на e_i у внутренней поверхности, μ – у наружной (по общим соображениям это ясно).

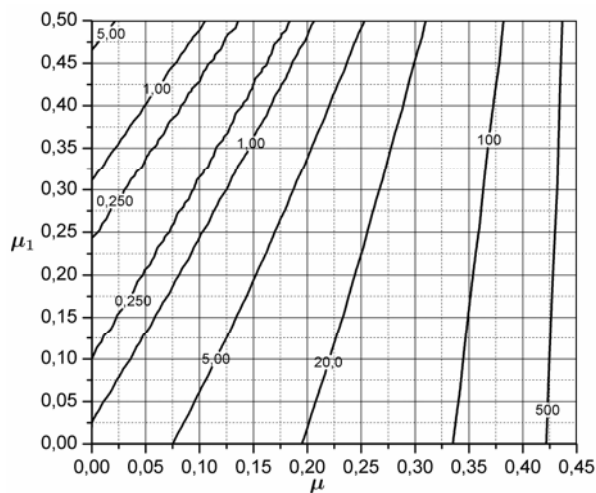
Учитывая рост коэффициентов μ_1, μ [14] в ходе процесса из-за вовлечения в процесс новых участков поверхности заготовки, форму ОДЗ, обеспечивающую изготовление детали с требуемыми механическими свойствами, а также резкое возрастание степени деформации e_i у наружной поверхности детали при увеличении трения по поверхности матрицы (e_i у наружной поверхности может в 2-3 раза превышать вычисленную по изменению площади поперечного сечения среднюю e_i) для надежного обеспечения качества изделий необходимо устойчивое управление величинами μ_1, μ , особенно μ .

Выводы

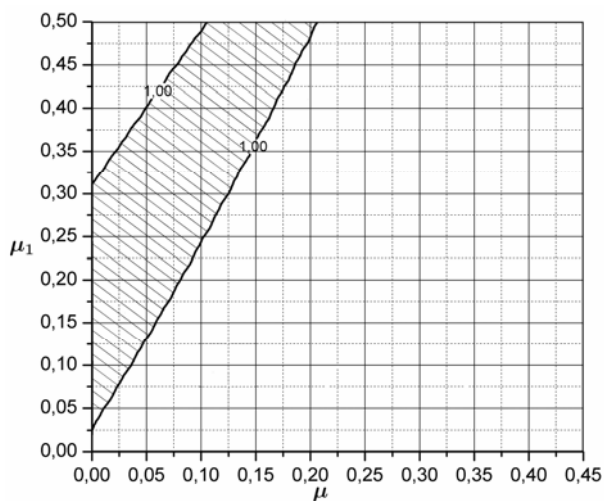
1. Установлена зависимость механических свойств детали, изготавливаемой вытяжкой с утонением стенки от коэффициентов трения по поверхностям матрицы и пуансона.

2. Вычислены области допустимых значений коэффициентов трения, обеспечивающие получение заданных механических свойств.

3. Показано, что трение по поверхности матрицы сильнее сказывается на механических свойствах, чем трение по поверхности пуансона.



а



б

Рис. 3. а – значения величины W ;
б – ОДЗ коэффициентов μ_1, μ для $U_0 = 1$

Библиографические ссылки

1. Афанасьев А. С., Вященко Ю. Л., Иванов К. М. Модернизация процессов создания комплексов вооружения с целью обеспечения гарантированных характеристик надежности, безопасности, рисков // Оборонная техника. – 2014. – № 10, – С. 32–45.
2. Установление соответствия между степенью деформации, твердостью и размерами элементов структуры железа и конструкционных сталей при большой пластической деформации различными способами / М. В. Дегтярев, Т. И. Чашухина, Л. М. Воронова, В. И. Копылов // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т 16, № 6. – С. 71–80.
3. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. – М. : Машиностроение, 1971. – 200 с.
4. Третьяков А. В., Зюзин В. И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. – М. : Металлургия, 1973. – 224 с.
5. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. – Л. : Машиностроение, 1978. – 368 с.
6. Воронцов А. Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – Т. 2. – 441 с.
7. Аверкиев Ю. А., Аверкиев А. Ю. Технология холодной штамповки. – М. : Машиностроение, 1989. – 304 с.
8. Травин В. Ю., Исаева А. Н. Оценка неоднородности деформации и механических свойств в стенке детали при вытяжке с утонением толстенных осесимметричных заготовок // Известия Тульского гос. ун-та. – Технические науки. – 2013. – Вып. 9, Ч. 2. – С. 393–397.
9. Воронцов А. Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – Т. 1. – 396 с.
10. Воронцов А. Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. – Т. 2.
11. Там же.
12. Вольмир А. С. Гибкие пластинки и оболочки. – М. : ГИТТЛ, 1956. – 419 с.
13. Авдонин А. С. Прикладные методы расчета оболочек и тонкостенных конструкций. – М. : Машиностроение, 1969. – 404 с.
14. Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Выбор коэффициентов трения для расчета технологических параметров штамповки выдавливанием // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2004. – № 1. – С. 23–26.