РАЗДЕЛ IV. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Аксенов Л.Б.

Вероятностная оценка точности поковок, штампуемых на кривошипных горячештамповочных прессах*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Россия, Санкт-Петербург)*

doi: 10.18411/sr-10-12-2017-06

idsp: 000001:sr-10-12-2017-06

Аннотация

В статье представлен анализ влияния изменения значений технологических параметров на высоту поковок, штампуемых на кривошипных горячештамповочных прессах. Показано, что технологические параметры и высота штампуемых поковок являются случайными величинами подчиненными нормальному закону распределения. Для определения степени влияния технологических параметров и жесткости технологического процесса на точность поковок предложено использовать компьютерное моделирование. Приведена методика определения математического ожидания и дисперсии для случайной величины - высоты поковок, а также вероятности получения поковок заданной точности.

Ключевые слова: горячая штамповка, кривошипные прессы, точность поковок, компьютерное моделирование, жесткость поковки, вероятность

Точность поковок штампуемых на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП) существенно зависит от параметров технологического процесса и характеристик оборудования. Процесс штамповки на КГШП отличается от формообразующих процессов, осуществляемых на других видах оборудования [1]. Штамповка на КГШП процесс прогностический, т.е. формирование поковки происходит за один рабочий ход, и этот процесс никак не корректируется. Междуштамповая высота, устанавливаемая при настройке, в момент штамповки не регулируется, и погрешность в исходных параметрах заготовки неминуемо приводит к погрешностям в высоте поковок.

Высота поковки связана с усилием деформирования соотношением

$$h = H_0 + H_1 + \frac{P}{c}; \quad (1)$$

где H_0 - расстояние между рабочими поверхностями штампа при отсутствии усилия (Рис. 1а), H_1 - величина зазоров в прессе (определяется по характеристике жесткости пресса Рис. 1б); P - усилие штамповки; c – коэффициент жесткости системы пресс-штамп (тангенс угла наклона графика жесткости).

Усилие штамповки в открытых штампах в конечный момент формообразования поковки представляет собой функцию, зависящую от высоты поковки, размеров заготовки, условий деформирования, механических свойств материала и т.д. Отклонение этих параметров заготовки, характеризующих технологический процесс, от номинальных значений приводит к изменению усилия деформирования. Исследование вида этой функции было начато в работе [2], и продолжено с позиций теории вероятности в работе [3]. Однако трудности определения степени влияния каждого параметра на изменение величины усилия сдерживало возможности связать точность поковок со стабильностью технологических параметров.

В момент штамповки параметры штамповки принимают некоторые значения, заранее неизвестные, поэтому эти параметры можно трактовать как случайные величины. Таким образом, имеется система случайных величин $x_1, x_2, \dots, x_n$. Предположим, что их

распределение подчиняется нормальному закону, а их характеристики (математическое ожидание m_{xi} и среднеквадратичное отклонение известны σ_{xi}). В этом случае усилие штамповки будет представлять функцию от случайных величин $x_1, x_2, \dots, x_n$.

а.

б.

Рис. 1. Схема деформируемой системы пресс-штамп (а) и типового график жесткости этой системы (б)

Поскольку на все параметры штамповки наложены ограничения, определяемые технологией, то можно предположить, что они сравнительно мало отклоняются от среднего значения. Тогда справедливо представить усилие P в виде разложения в ряд Тейлора с оставлением членов только первого порядка малости

$$P = P_0 + \frac{\partial P}{\partial h}(h - h_0) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial P}{\partial x_i}(x_i - m_{xi}); \quad (2)$$

где P_0 - среднее усилие штамповки; $h_0 = H_0 + P_0/c$ - точное значение желаемой высоты поковки. x_i - значение i -го случайного технологического параметра, m_{xi} - математическое ожидание i -го случайного технологического параметра.

Решая уравнение (2) относительно h , с учетом (1) можно получить

$$h = H_0 + H_1 \frac{P}{c} = H_0 + \frac{P_0}{c} + \sum_{i=1}^n a_i(x_i - m_{xi}); \quad (3)$$

где $a_i = \frac{1}{c + \frac{\partial P}{\partial h}} \frac{\partial P}{\partial x_i}$ - функции, преобразующие погрешность параметра x_i в погрешность высоты поковки h .

При условии некоррелируемости случайных величин среднеквадратичное отклонение высоты поковки от размера h будет [4]

$$\sigma_h = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_{xi}^2}. \quad (4)$$

Будем считать, что поковка точная, если выполняется условие

$$h_{min} \leq h \leq h_{max}; \quad (5)$$

где h_{min} , h_{max} - минимально и максимально допустимая высота поковки соответственно.

Из предположения нормального закона распределения случайных величин $x_1, x_2, \dots, x_n$ следует, что их линейная функция h также будет распределена по нормальному закону [4]. Это справедливо также, если технологические параметры имеют распределения, отличные от нормального, но среди них нет доминирующих. Тогда вероятность того, что высота поковки будет находиться в диапазоне от h_{min} до h_{max} , определяется

$$p(h_{\min} \leq h \leq h_{\max}) = \Phi\left(\frac{\Delta h}{2\sigma_h}\right); \quad (6)$$

где Φ – функция Лапласа (интеграл вероятностей); $\Delta h = h_{\max} - h_{\min}$.

Согласно предельным теоремам теории вероятности, практически рассеивание случайной величины не превышает трех среднеквадратичных отклонений от среднего значения. Следовательно, общий диапазон рассеивания высоты поковок может быть принят равным $6\sigma_h$. Тогда условие, что все штампуемые поковки будут удовлетворять заданной степени точности, примет вид

$$\sigma_h \leq \frac{\Delta h}{6}. \quad (7)$$

Исследования подтверждают предположение о нормальном законе распределения высоты штампуемых на КГШП поковок. Пример гистограммы и выравнивающей кривой нормального распределения случайной величины – высоты поковки заготовки турбинной лопатки показан на рис. 2. Видно, что правило 3σ для этого распределения выполняется.

а.

б.

Рис. 2. Гистограмма и выравнивающая кривая нормального распределения для случайной величины высоты поковок (а) заготовок турбинных лопаток (б)

Для того чтобы обеспечить наибольшую вероятность получения точных поковок, следует выбирать $h_0 = m_h = \frac{h_{\max} + h_{\min}}{2}$; т.е. математическое ожидание высоты поковки m_h в контролируемом месте должно быть равно середине допуска. Например, если требуемый размер высоты поковки $20^{+1,5}_{-0,5}$, то $h_0 = (21,5 + 20,5) : 2 = 21$ мм.

Использование формул для оценки вероятности получения точных поковок в зависимости от диапазонов изменения технологических параметров требует знания частных производных $\frac{\partial P}{\partial x_i}$, представляющих степень влияния параметра x_i и производной $\frac{\partial P}{\partial h}$, отражающей жесткость технологического процесса. Все эти параметры входят в традиционные формулы расчета потребного усилия штамповки [5, 6]. Однако эти формулы получены при значительных упрощениях и их дифференцирование по отдельным параметрам не всегда оправдано. Экспериментальное определение этих производных трудно реализуемо, так как требуется точной фиксации значений всех параметров в момент штамповки. Современные возможности моделирования процессов горячей объемной штамповки в расчетных комплексах QFORM [7], Simufact Forming [8], Deform [9] и др., где используются адекватные модели процесса горячего деформирования, позволяют получить достаточно точные значения искомых производных. Для этого следует провести варианты расчеты при малом отклонении

каждого из параметров от номинального значения с фиксацией величины усилия деформирования.

С целью определения влияния изменения технологических параметров на величину усилия штамповки детали «барабан» и прогнозирования распределения штампуемых поковок по высоте было осуществлено компьютерное моделирование процесса в расчетном комплексе Deform 2D (Рис. 3).

Рис. 3 Компьютерное моделирование процесса горячей штамповки детали «барабан»: высота поковки $h=7,0$ мм, температура штамповки $T=11500^{\circ}\text{C}$, усилие штамповки 28,7 МН

В качестве технологического параметра была выбрана только температура штамповки, как наиболее влиятельного фактора, т.е. принято, что $i=1$ и $x_1=T$, где T – температура заготовки (начальная температура штамповки). Моделирование было проведено при разных значениях температуры заготовок и при разной высоте штампуемых поковок (Табл. 1).

Табл. 1

Результаты моделирования зависимости усилия штамповки от высоты и температуры поковки

Варьируемый параметр	Значение параметра	Усилие штамповки, МН
Температура штамповки ($^{\circ}\text{C}$) (высота поковки $h=7,0$ мм)	1100	33,3
	1150	28,7
	1200	25,7
Высота поковки (мм) (температура заготовки $T=1150^{\circ}\text{C}$)	6,5	32,4
	7,0	28,7
	7,5	24,4

Проведенное компьютерное моделирование позволило определить частные производные, отражающие влияние жесткости технологического процесса $c_T = \frac{\partial P}{\partial h}$ и изменения температуры штамповки $\frac{\partial P}{\partial T}$ на точность поковок. Для рассматриваемой поковки получается $\frac{\partial P}{\partial h} = 8,0 \frac{\text{МН}}{\text{мм}}$, $\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{0,076 \text{ МН}}{\text{град}}$. Значения жесткости прессов хорошо изучены и эти данные предоставляются заводами изготовителями. Если выбрать для штамповки рассматриваемой поковки КГШП с номинальным усилием 40 МН, то жесткость этого пресса будет составлять 5 МН/мм. Для диапазона рассеивания случайной величины температура штамповки – 1000°C среднеквадратичное отклонение высоты поковок от размера h_0 будет $\sigma h = 0,097$ мм, а диапазон рассеивания случайной величины высоты поковки ($6\sigma h$) составит 0,58 мм. Это весьма малый диапазон и такой высокой точности штамповки способствует высокая жесткость технологического

процесса сТ, свойственная процессам штамповки низких поковок. У поковок с большим отношением наименьшей высоты к диаметру жесткость процесса будет ниже, а соответственно, точность меньше.

Выводы:

- Установлено, что параметры, определяющие усилие штамповки, и высота поковок являются случайными величинами и подчиняются нормальному закону распределения.
- Диапазон рассеивания высоты штампуемых поковок определяется диапазоном рассеивания случайных параметров, жесткостью прессы и жесткостью технологического процесса (жесткостью штампуемой поковки). При одинаковом разбросе значений технологических параметров точность поковок повышается с увеличением их жесткости. Наибольшей жесткостью обладают низкие поковки с малым значением отношения высоты к наибольшему размеру, а наименьшей высокие.
- Степень влияния отдельных технологических параметров на изменение усилия штамповки и жесткость технологического процесса могут быть определены путем компьютерного моделирования процесса, что позволяет на этапе проектирования технологических процессов прогнозировать точность штамповки.
- На примере процесса горячей штамповки заготовки детали «барабан» показаны этапы прогнозирования с применением компьютерного моделирования параметров (математического ожидания и дисперсии) распределения случайной величины высоты поковок.

1. Бочаров Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование. – М.: «Академия», 2008. – 480 с.
2. Ланской Е.Н., Банкетов А.Н. Элементы расчета деталей и узлов кривошипных прессов.- М.: Машиностроение, 1966.- 380 с.
3. Аксенов Л.Б. Системное проектирование процессов штамповки. – Л.: Машиностроение. Ленингр.отд-ние, 1990, - 240 с.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 4-е изд., стереотип. - М.: Наука, Физматгиз, 1969 - 576 с.
5. Технология и оборудованиековки и объемной штамповки.- Под редакцией Е.И. Семенова: Машиностроение, 1978. 311с. с ил.
6. Голенков В. А., Дмитриев А. М., Кухарь В. Д., Радченко С. Ю., Яковлев С. П., Яковлев С. С. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением. М.: Машиностроение, 2004. — 464 с.
7. Электронный ресурс: <http://www.qform3d.ru> . Дата обращения 10.10.2017.
8. Simufact Simulation of Manufacturing: Simufactforming. Электронный ресурс: <https://www.simufact.com/module-hot-forging.html> . Дата обращения 05.10.2017.
9. DEFORM Design Environment for FORMing. Электронный ресурс: <http://www.deform.com> . Дата обращения 10.10.2017.

Ардт П.Э., Рагозина М.А., Грищенко И.А.

Модель системы управления транспортным контейнером

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф.

Решетнёва

(Россия, Красноярск)

doi: 10.18411/sr-10-12-2017-07

idsp: 000001:sr-10-12-2017-07

Аннотация

Предложена модель системы управления транспортным контейнером. Описана компьютерная модель системы управления транспортным контейнером, созданная с