

## МОДЕЛЬ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ОБЪЁМНОЙ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛИ «ШЕСТЕРНЯ ВЕНЕЧНАЯ»

Борисов А.В.

*Аспирант*

*Липецкий Государственный Технический Университет*

*Кафедра «Штамповки»*

*Научный руководитель: д.т.н., проф. Володин И.М.*

Исследование технологических процессов горячей объёмной штамповки с помощью программ математического моделирования можно реализовать как последовательность расчетных экспериментов. Целью такого моделирования является получение информации, например, о влиянии факторов входа (температуры нагрева, коэффициента контактного трения и объёма заготовки) на энергосиловые параметры. Такая взаимосвязь может быть представлена в виде уравнения, которое позволяет анализировать влияние факторов на выходной параметр и может быть использовано как основа описания качества исследуемого процесса.

Качество технологического процесса можно рассматривать как совокупность выходных энергосиловых параметров.

Для проверки соответствия модели качества выполняются расчетные эксперименты в диапазоне варьирования факторов.

Метод планирования экспериментов предоставляет основу для построения математической и графической модели качества моделируемого процесса. Рассмотрим подробнее содержание метода [1].

Для описания общей формы математической модели используется полином первой степени, например, трехфакторный:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1x_2 + a_5x_1x_3 + a_6x_2x_3 + a_7x_1x_2x_3, \quad (1)$$

где:  $y$  – функция отклика;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – варьируемые факторы;  $a_0$  – среднее значение функции;  $a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты регрессии, учитывающие влияние каждого из факторов в отдельности;  $a_4, a_5, a_6$  – коэффициенты регрессии, учитывающие парное влияние факторов;  $a_7$  – коэффициент, учитывающий влияние всех трёх факторов.

Поиск уравнения (1) осуществляется через процедуру кодирования факторов. При этом уравнение (1) преобразуется к виду (2) а эксперимент выполняется по обобщенному плану таблицы 1.

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_4X_1X_2 + A_5X_1X_3 + A_6X_1X_3 + A_7X_1X_2X_3. \quad (2)$$

Таблица 1

План трехфакторного эксперимента

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y$	№ опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y$
1	+1	+1	+1	$Y_1$	5	+1	+1	-1	$Y_5$
2	-1	+1	+1	$Y_2$	6	-1	+1	-1	$Y_6$
3	+1	-1	+1	$Y_3$	7	+1	-1	-1	$Y_7$
4	-1	-1	+1	$Y_4$	8	-1	-1	-1	$Y_8$

Известны расчетные выражения для коэффициентов регрессии уравнения (2), полученные методом наименьших квадратов [1]:

$$\begin{aligned}
 A_0 &= \sum_{n=1}^8 \frac{X_1 \cdot Y_n}{n}; & A_1 &= \sum_{n=1}^8 \frac{X_{1n} \cdot Y_n}{n}; & A_2 &= \sum_{n=1}^8 \frac{X_{2n} \cdot Y_n}{n}; \\
 A_3 &= \sum_{n=1}^8 \frac{X_{3n} \cdot Y_n}{n}; & A_4 &= \sum_{n=1}^8 \frac{X_{1n} \cdot X_{2n} \cdot Y_n}{n}; & A_5 &= \sum_{n=1}^8 \frac{X_{1n} \cdot X_{3n} \cdot Y_n}{n}; \\
 A_6 &= \sum_{n=1}^8 \frac{X_{2n} \cdot X_{3n} \cdot Y_n}{n}; & A_7 &= \sum_{n=1}^8 \frac{X_{1n} \cdot X_{2n} \cdot X_{3n} \cdot Y_n}{n}.
 \end{aligned}$$

Уравнения (2) в кодовой форме характерны тем, что факторы в них имеют одинаковый диапазон изменения от -1 до +1, и коэффициенты регрессии  $A_1, A_2, A_3, \dots$  характеризуют соразмерное друг с другом влияние факторов в рамках одного процесса. Для сравнения степени влияния фактора по вариантам процесса например, по операциям штамповки, уравнение регрессии (2) преобразуем к относительному виду:

$$Y = A_0 \cdot (1 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_7 X_1 X_2 X_3),$$

$$\beta_1 = \frac{A_1}{A_0}, \beta_2 = \frac{A_2}{A_0}, \beta_3 = \frac{A_3}{A_0}, \dots \quad (3)$$

Здесь относительные коэффициенты регрессии позволяют сравнивать влияние факторов, как между собой, так и по вариантам процесса.

Можно выразить факторы через минимальный уровень и диапазон изменения:

$$\begin{aligned}
 X_1 &\supset X_{1\min} + \Delta_{X1} \supset -1+2; \\
 X_2 &\supset X_{2\min} + \Delta_{X2} \supset -1+2; \\
 X_3 &\supset X_{3\min} + \Delta_{X3} \supset -1+2.
 \end{aligned} \quad (4)$$

При этом минимальные значения факторов  $X_{1\min}$ ,  $X_{2\min}$  и  $X_{3\min}$  можно рассматривать как предельные значения достижимого качества входных факторов техпроцесса. Тогда  $\Delta_{X1}$ ,  $\Delta_{X2}$ ,  $\Delta_{X3}$  характеризуют отклонения от достижимого качества факторов (потери качества).

Аналогичным образом можно выразить выходной параметр технологического процесса:

$$Y \supset Y_{\min} + \Delta_Y; \quad Y \supset Y_{\min}(1 + \partial_Y); \quad \partial_Y = \frac{\Delta_Y}{Y_{\min}}. \quad (5)$$

Минимальное значение отклика  $Y_{\min}$  можно рассматривать как предельное значение достижимого качества выходного параметра техпроцесса. Величина  $\Delta_Y$  характеризует отклонение от достижимого уровня качества (потерю качества) техпроцесса. Величина  $\partial_Y$  характеризует относительную потерю качества, она позволяет сравнивать процессы по уровню качества между собой.

Из выражения (5) следует:

$$\begin{aligned}
 \Delta Y &= Y_{\max} - Y_{\min}, \\
 Y_{\max} &= A_0 \cdot (1 + \beta_1 X_{1\max} + \beta_2 X_{2\max} + \beta_3 X_{3\max} \dots), \\
 Y_{\min} &= A_0 \cdot (1 + \beta_1 X_{1\min} + \beta_2 X_{2\min} + \beta_3 X_{3\min} \dots), \\
 \Delta Y &= A_0 \cdot (\beta_1 \Delta X_1 + \beta_2 \Delta X_2 + \beta_3 \Delta X_3 \dots).
 \end{aligned}$$

$$\Delta X_1 = \Delta X_2 = \Delta X_3 = 2, \Delta X_1 \Delta X_2 = \Delta X_1 \Delta X_3 = \Delta X_2 \Delta X_3 = 4, \Delta X_1 \Delta X_2 \Delta X_3 = 8.$$

$$\Delta Y = 2A_0 \cdot (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + 2\beta_4 + 2\beta_5 + 2\beta_6 + 4\beta_7) = 2A_0 B. \quad (6)$$

Выражение (6) связывает отклонение выходного параметра с отклонениями входных факторов. При этом каждому фактору будет соответствовать своя процентная доля (факторная доля) в отклонении выхода  $\Delta Y$ :

$$\delta_1 \% = 100\% \frac{A_1}{B}, \quad \delta_2 \% = 100\% \frac{A_2}{B}, \quad \delta_3 \% = 100\% \frac{A_3}{B}. \quad (7)$$

Таким образом, выражения (4), ... (7) можно рассматривать как математическую модель качества процесса. Эта модель имеет графический образ (рис.2).

На основе [2] выполнено исследование технологического процесса горячей объёмной штамповки детали «венечная шестерня» в условиях завода «КАМАЗ - Металлургия». Технологический процесс штамповки венечной шестерни включает в себя три перехода: осадку, предварительную штамповку и окончательную штамповку на КГШП усилием 63 МН за три последовательные операции [2,3]. На рисунке 1 приведены форма и размеры заготовки, операционных полуфабрикатов и детали после механической обработки.

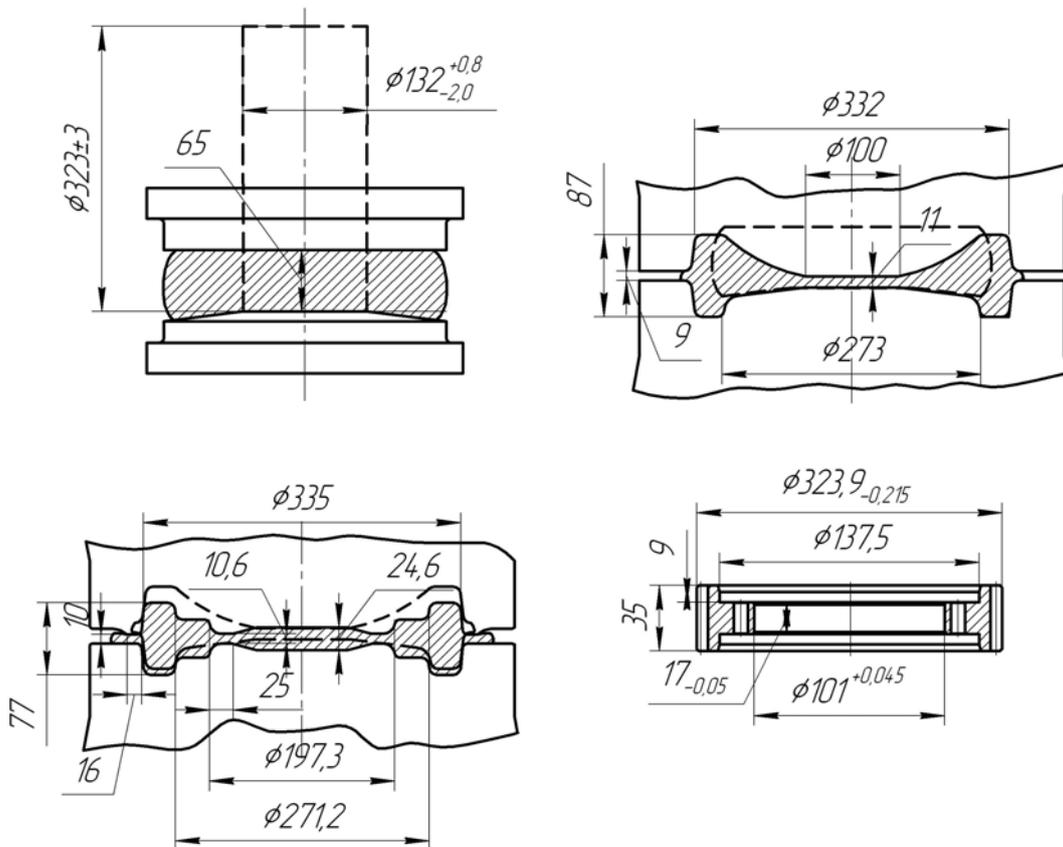


Рис. 1 Технологический процесс ГОШ поковки венечной шестерни: форма и размеры заготовки, полуфабрикатов и детали

Моделирование процесса выполнено по геометрическим размерам и форме применяемого инструмента и заготовки. Материал поковки сталь - 20ХГНМ. Температура штампов 200°С. Коэффициент теплопередачи от заготовки к штампу 0,017 [5].

Приняты следующие крайние значения факторов: температура заготовки (950°С, 1050°С), коэффициент контактного трения (0,30 и 0,75), объём горячей заготовки (4244 см<sup>3</sup> и 4512 см<sup>3</sup>). Меньший объём является минимальным из допуска на сортовой прокат и отрезку. Как показало моделирование и практика, он обеспечивает полное оформление поковки. Большой объём рассчитан по допускам на сортовой прокат и отрезку.

Факторы температуры и объема преобразованы к виду относительных безразмерных величин. Принято кодирование факторов: наименьшее значение каждого из факторов принято (-1), наибольшее (+1) (таблица 2). В таблице 3 приведены план и результаты моделирования.

Таблица 2

Представление факторов в плане эксперимента

Наименование факторов	Температура заготовки		Коэффициент трения		Объём заготовки	
	+ X <sub>1</sub>	- X <sub>1</sub>	+ X <sub>2</sub>	- X <sub>2</sub>	+ X <sub>3</sub>	- X <sub>3</sub>
Кодовое значение						
Размерное значение	1050°С	950°С	0,75	0,30	4421 см <sup>3</sup>	4164 см <sup>3</sup>
Безразмерное значение	1,105	1,0	2,5	1	1,062	1,0

Таблица 3

План и результаты моделирования параметров по операциям базовой технологии

№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>P1</sub>	Y <sub>P2</sub>	Y <sub>P3</sub>	№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>P1</sub>	Y <sub>P2</sub>	Y <sub>P3</sub>
1	+	+	+	8,54	22,33	67,66	5	+	+	-	7,77	19,24	38,80
2	-	+	+	10,36	28,00	70,06	6	-	+	-	9,81	24,60	48,22
3	+	-	+	7,08	20,07	55,32	7	+	-	-	6,95	14,78	34,83
4	-	-	+	9,17	23,96	68,68	8	-	-	-	8,56	18,32	43,54

Y<sub>P1</sub>, Y<sub>P2</sub>, Y<sub>P3</sub> - сила деформирования соответственно первой, второй и третьей операций штамповки (МН).

В результате моделирования получены следующие уравнения регрессии с факторами в кодах:

$$\begin{aligned}
 Y_{P1} &= 8,53 - 0,945X_1 + 0,59X_2 + 0,258X_3 - \\
 &\quad - 0,02X_1X_2 - 0,033X_1X_3 + 0,072X_2X_3 + 0,088X_1X_2X_3; \\
 Y_{P2} &= 21,413 - 2,308X_1 + 2,13X_2 + 2,178X_3 - \\
 &\quad - 0,45X_1X_2 - 0,082X_1X_3 - 0,555X_2X_3 + 0,005X_1X_2X_3; \\
 Y_{P3} &= 53,389 - 4,236X_1 + 2,796X_2 + 12,041X_3 + \\
 &\quad + 1,281X_1X_2 + 0,296X_1X_3 + 0,634X_2X_3 + 1,47X_1X_2X_3.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Для оценки соответствия полученных моделей сравним результаты расчета силы деформирования по уравнению (8) с результатами при моделировании (табл.4) для значений фактов температуры и трения в середине диапазона.

Выражения (8) можно упростить:

$$\begin{aligned} Y_{P1} &= 8,53 - 0,945X_1 + 0,59X_2 + 0,258X_3, \\ Y_{P2} &= 21,413 - 2,308X_1 + 2,13X_2 + 2,178X_3, \\ Y_{P3} &= 53,389 - 4,236X_1 + 2,796X_2 + 12,041X_3. \end{aligned} \quad (9)$$

Таблица 4  
Сравнение результатов расчета и моделирования

Результаты моделирования					
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$Y_{P1}$	$Y_{P2}$	$Y_{P3}$
1000	0,45	4164	7,87	18,37	39,09
Результаты расчета					
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_{P1}$	$Y_{P2}$	$Y_{P3}$
0	-0,333	-1	8,1	18,34	40,63
Абсолютная погрешность		$y - Y$	0,14	0,04	1,54
Относительная погрешность		$(y - Y) / y$	0,017	0,002	0,039

На основании уравнений (9) для параметра силы деформирования трех операций штамповки с учетом замен  $X_1 = X_t$ ,  $X_2 = X_\mu$ ,  $X_3 = X_\nu$  модель качества имеет вид:

$$\begin{aligned} Y_{P1} &= 8,53(1 - 0,111X_t + 0,069X_\mu + 0,03X_\nu), \\ Y_{P2} &= 21,413(1 - 0,108X_t + 0,099X_\mu + 0,102X_\nu), \\ Y_{P3} &= 53,389(1 - 0,079X_t + 0,052X_\mu + 0,225X_\nu). \end{aligned} \quad (10)$$

$$X_t \supset -1 + 2; \quad X_\mu \supset -1 + 2, \quad X_\nu \supset -1 + 2.$$

$$Y_{P1} \supset 6,95 + 3,41 = 6,95(1 + 0,49); \quad Y_{P2} \supset 14,78 + 13,22 = 14,78(1 + 0,89);$$

$$Y_{P3} \supset 34,83 + 35,23 = 34,83(1 + 1,01).$$

В таблице 5 представлены параметры моделирования.

Таблица 5  
Изменение параметров технологического процесса при изменении факторов

Параметры техпроцесса		1 операция	2 операция	3 операция
Сила деформирования (МН)				
Минимальное значение	$Y_{P\min}$	6,95	14,78	34,83
Максимальное значение	$Y_{P\max}$	10,36	28,00	70,06
Диапазон изменения	$\Delta Y_P$	3,41	13,22	35,23
Относительный диапазон	$\partial Y_P$	0,49	0,89	1,01
Влияние факторов на $\Delta Y_P$				
Относительные коэффициенты и (факторные доли) факторов температуры, трения и объёма	$\beta_t; \partial_t \%$	-0,111; (53%)	-0,108; (35%)	-0,079; (22%)
	$\beta_\mu; \partial_\mu \%$	0,069; (33%)	0,099; (32%)	0,052; (15%)
	$\beta_\nu; \partial_\nu \%$	0,030; (14%)	0,102; (33%)	0,225; (63%)

На рисунке 2 представлены диаграммы изменения параметров по операциям штамповки и диаграммы степени влияния факторов на  $\Delta Y$ .

Сила деформирования (см. табл. 5 и рис. 2) на первой операции  $Y_{P1}$  характеризуется уровнем (6,95 МН + 3,41 МН,  $\partial_{Y_{P1}} = 0,49$ ). В наибольшей мере 53 % на увеличение силы влияет понижение фактора температуры заготовки  $X_t$  ( $\alpha_{t1} = -0,111$ ), значительно меньше влияет 33% фактор трения  $X_\mu$  ( $\alpha_{\mu1} = 0,07$ ) и 14% фактор объема  $X_v$  ( $\alpha_{v1} = 0,03$ ). Для операции характерно свободное течение металла и большая устойчивость к изменению факторов.

На второй операции сила  $Y_{P2}$  имеет уровень (14,78 МН + 13,22 МН,  $\partial_{Y_{P2}} = 0,89$ ). Это характеризует вторую операцию как более нагруженную и менее чувствительную к изменениям факторов. Фактор температуры  $X_t$  влияет на силу несколько меньше, чем на первой операции 35% ( $\alpha_{t2} = -0,108$ ), влияние фактора трения  $X_\mu$  возросло до 32% ( $\alpha_{\mu2} = 0,099$ ), влияние фактора объема  $X_v$  33% ( $\alpha_{v2} = 0,102$ ). Для второй операции характерно наибольшее деформирование в средней части поковки в области перемычки. Течение металла в венечной части поковки свободно. Операция характеризуется большим относительным изменением силы деформирования.

На третьей операции параметр силы  $Y_{P3}$  очень большой (34,83 МН + 35,23 МН,  $\partial_{Y_{P3}} = 1,01$ ). Эта операция наиболее нагруженная. Влияние фактора объема  $X_v$  определяющее оно составляет 63% ( $\alpha_{v3} = 0,225$ ). Он определяет максимальное усилие штамповки, которое при неблагоприятных условиях может превысить номинальную силу КГШП 63МН и привести к заклиниванию, что подтверждается результатами расчетов и практикой использования техпроцесса [6].

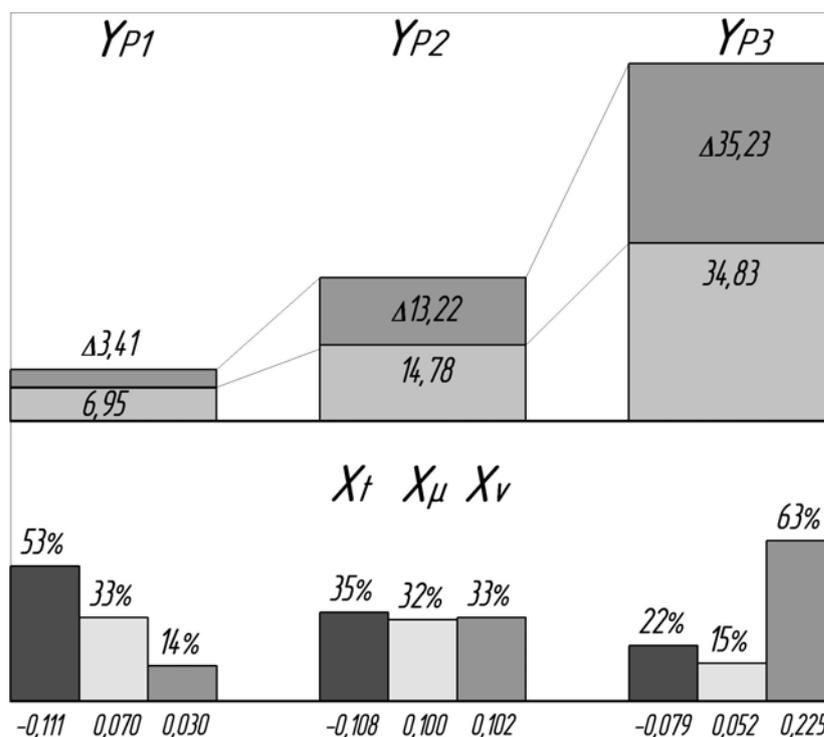


Рис. 2. Диаграмма модели качества по операциям штамповки:

$Y_{P1}$ ,  $Y_{P2}$ ,  $Y_{P3}$  - параметр силы деформирования (МН) на первой, второй и третьей операциях;  $X_t$ ,  $X_\mu$ ,  $X_v$  - факторы температуры заготовки, коэффициента контактного трения и объема заготовки.

### Выводы

1. На основе обобщенного уравнения метода планирования экспериментов предложена математическая модель качества процесса.
2. Получена модель качества, связывающая факторы температуры нагрева, контактного трения и объема заготовки с силой деформирования.
3. Определено, что наибольшим влиянием на отклонение силы деформирования обладает фактор объема.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов / М.: Машиностроение; София: Техника, 1980.-304 с.
2. Полищук, Е.Г. Система расчета пластического деформирования «Рапид» [Текст] / Е.Г. Полищук, Д.С. Жиров, Р.А. Вайсбурд // Кузнечно-штамповочное производство.–1997.-№ 8.- С. 16-18.
3. Семендий В.И. Прогрессивные технология, оборудование и автоматизация кузнечно-штамповочного производства КамАЗа / В.И. Семендий, И.Л. Акаро, Н.Н. Волосов / М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
4. Ковка и штамповка: Справочник в 4-х т./Ред. Совет: Е.И. Семенов (пред.) и др.-М.: Машиностроение, 1986.- т.2. Горячая штамповка / Под ред. Е.И. Семенова, 1986. 592 с.
5. Володин, И.М. Экспериментальное определение граничных условий при горячей пластической деформации [Текст] / И.М. Володин // Известия ТулГУ.- № 2.- 2005.- С.71-80.
6. Борисов, А.В., Володин, И.М., Борисов, В.С. Горячая объемная штамповка поковок венечных шестерен. Авиакосмические технологии «АКТ-2007»: труды VIII Всерос. с международным участием науч. -техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. с. 64-71.