

## Моделирование и оптимизация технологического процесса изготовления деталей горячей штамповкой

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Проанализирован технологический процесс изготовления детали горячей штамповкой, определены варьируемые факторы процесса, разработана матрица планирования опытов, проведен эксперимент, выполнены расчеты математических моделей крутого восхождения и достигнуты оптимальные режимы изготовления детали, которые соответствуют требованиям технологического процесса. Проведено сравнение расчетных и полученных экспериментальным путем данных.

**Ключевые слова:** заготовка, штамп, температура нагрева, время нагрева, эксперимент, матрица планирования, факторы, математическая модель.

**Постановка проблемы.** Развитие современной науки и техники связано с созданием новых и постоянным совершенствованием существующих технологических процессов. Основой их разработки и оптимизации является эксперимент. Заметное повышение эффективности экспериментальных исследований и инженерных разработок достигается использованием математических методов планирования экспериментов. В процессе экспериментирования и при обработке полученных данных они существенно сокращают сроки решения, снижают затраты на исследования и повышают качество полученных результатов.

**Цель работы:** синтезировать математические модели и определить оптимальные режимы изготовления детали горячей штамповкой.

### Основные результаты исследований

Для выявления причин возникновения брака на предприятии было проведено четыре экспериментальных опыта по изготовлению детали, в ходе которых были использованы параметры факторов (табл. 1) в пределах диапазонов, указанных в производственном технологическом процессе.

Таблица 1

Значения факторов для проведения эксперимента

Факторы для проведения эксперимента	Номер эксперимента			
	1	2	3	4
Температура $t$ нагрева заготовки, °С	300	470	300	470
Время $T$ нагрева заготовки, мин	70	70	140	140
Температура $T_{ш}$ нагрева штампа, °С	250	200	200	250
Номинальная масса падающих частей молота, кг	1000	1000	1000	1000
Число ударов молота в минуту	80	80	80	80
Давление воздуха паровоздушного молота, МПа	0,65	0,65	0,65	0,65

После проведения эксперимента на предприятии были измерены такие показатели, как толщины детали  $H_1$  и  $H_2$ , мм, и масса облоя  $m$ , кг для качалки (рис.1).

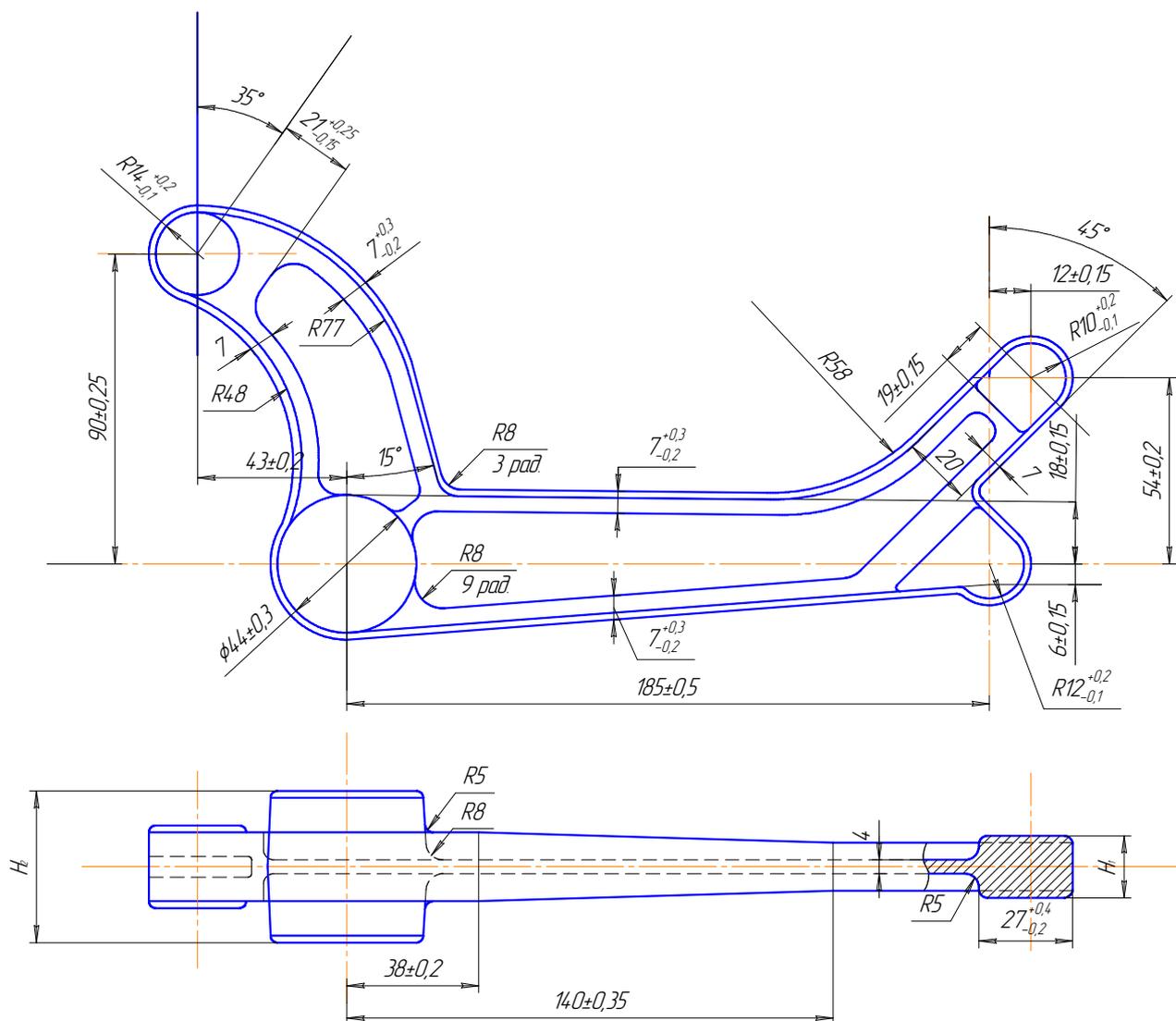


Рис. 1. Качалка

Значения показателей для каждого опыта представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения измеренных показателей качества

№ п/п	t	T	T <sub>шт</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	m
1	300	70	250	26	51,5	2,18
2	470	70	200	24	50,9	1,45
3	300	140	200	23	49,5	0,920
4	470	140	250	22	47,5	0,360

После проведения экспериментов и анализа качества изготовленных деталей были определены рациональные режимы изготовления детали. Сравнительный анализ режимов изготовления детали приведен в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительный анализ режимов изготовления детали

Параметры	Показатели технологического процесса	Оптимальные показатели
Температура $t$ нагрева заготовки, $^{\circ}\text{C}$	300...470	470
Время $T$ нагрева заготовки, мин	70...140	140
Температура $T_{\text{ш}}$ нагрева штампа, $^{\circ}\text{C}$	200...250	250
Номинальная масса падающих частей молота, кг	1000	1000
Число ударов молота в минуту	80	80
Давление воздуха паровоздушного молота, МПа	0,6...0,8	0,65

Для дальнейшей оптимизации процесса изготовления детали горячей штамповкой были привлечены методы планирования эксперимента [1].

Рассмотрены факторы, определяющие процесс:

$x_1$  – температура  $t$  нагрева заготовки,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$x_2$  – время  $T$  нагрева заготовки, мин;

$x_3$  – температура  $T_{\text{ш}}$  нагрева штампа,  $^{\circ}\text{C}$ .

Выбраны диапазоны варьируемых факторов:

$x_1 = 300^{\circ}\text{C} \dots 470^{\circ}\text{C}$ ;

$x_2 = 70 \dots 140$  мин;

$x_3 = 200^{\circ}\text{C} \dots 250^{\circ}\text{C}$ .

Матрица планирования эксперимента для определения толщин детали  $H_1, H_2$ , массы облоя  $m$  и результаты эксперимента представлены в табл.4.

Таблица 4

Матрица планирования для толщин детали  $H_1, H_2$  и массы облоя  $m$

№ п/п	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$H_1$	$H_2$	$m$
1	-1	-1	1	26,0	51,5	2,18
2	1	-1	-1	24,0	50,9	1,45
3	-1	1	-1	23,0	49,5	0,92
4	1	1	1	22,0	47,5	0,36

### Обработка результатов эксперимента

Математические модели для определения толщин детали  $H_1, H_2$  массы облоя  $m$  искали в виде полинома:

$$b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3,$$

где  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – коэффициенты математической модели;

$x_1, x_2, x_3$  – факторы.

После расчета коэффициентов математические модели имеют вид:

а) для толщины детали  $H_1$ :  $y = 23,75 - 0,75 \cdot x_1 - 1,25 \cdot x_2 + 0,25 \cdot x_3$ ;

б) для толщины детали  $H_2$ :  $y = 49,85 - 0,65 \cdot x_1 - 2,35 \cdot x_2 - 0,35 \cdot x_3$ ;

в) для массы облоя  $m$ :  $y = 1,2275 - 0,3225 \cdot x_1 - 0,5875 \cdot x_2 + 0,0425 \cdot x_3$ .

#### Принятие решений после построения модели

Так как все коэффициенты значимы, то для достижения области оптимума переходим к движению по градиенту.

Условия планирования и расчет крутого восхождения для толщины  $H_1$  ( $H_1 = 18 \dots 22$  мм) приведены в табл. 5.

Таблица 5

Условия планирования и расчет крутого восхождения для толщины  $H_1$

Уровни	Факторы			Отклик
	$\tilde{X}_1$	$\tilde{X}_2$	$\tilde{X}_3$	
Основной	385	105	225	
Интервал варьирования	85	35	25	
Верхний	470	140	250	
Нижний	300	70	200	
$b_i$	-0,7500	-1,25	0,25	
$b_i \times I_i$	-63,75	-43,75	6,25	
Шаг для X				
	6,375	4,375	-0,625	
5	391,375	109,375	224,375	23,53
6	397,75	113,75	223,75	23,31
7	404,125	118,125	223,125	23,09
8	410,5	122,5	222,5	22,88
9	416,875	126,875	221,875	22,66
10	423,25	131,25	221,25	22,44
11	429,625	135,625	220,625	22,22
12	436	140	220	22,00
13	442,375	144,375	219,375	21,78
14	448,75	148,75	218,75	21,56
15	455,125	153,125	218,125	21,34

В опыте № 12 достигнуты оптимальные показатели изготовления детали, которые соответствуют требованиям технологического процесса. При температуре нагрева заготовки 436<sup>0</sup>С, времени нагрева заготовки 140 мин и температуре нагрева штампа 220<sup>0</sup>С толщина детали равна 22 мм и находится в допустимых пределах (18 ... 22).

Условия планирования и расчет крутого восхождения для толщины Н<sub>2</sub> (Н<sub>2</sub> = 44 ... 47,5 мм) приведены в табл. 6.

Таблица 6

Условия планирования и расчет крутого восхождения для толщины Н<sub>2</sub>

Уровни	Факторы			Отклик
	$\tilde{X}_1$	$\tilde{X}_2$	$\tilde{X}_3$	
Основной	385	105	225	
Интервал варьирования	85	35	25	
Верхний	470	140	250	
Нижний	300	70	200	
$b_i$	-0,6500	-1,35	-0,35	
$b_i \times I_i$	-55,25	-47,25	-8,75	
Шаг для X				
	5,525	4,725	0,875	
5	390,525	109,725	225,875	49,61
6	396,05	114,45	226,75	49,38
7	401,575	119,175	227,625	49,14
8	407,1	123,9	228,5	48,90
9	412,625	128,625	229,375	48,67
10	418,15	133,35	230,25	48,43
11	423,675	138,075	231,125	48,19
12	429,2	142,8	232	47,96
13	434,725	147,525	232,875	47,72
14	440,25	152,25	233,75	47,48
15	445,775	156,975	234,625	47,25

В результате расчета крутого восхождения оптимальными выбраны показатели опыта № 14. При температуре нагрева заготовки 440,25<sup>0</sup>С, времени нагрева заготовки 152,25 мин и температуре нагрева штампа 233,75<sup>0</sup>С толщина детали равна 47,48 мм и находится в допустимых пределах (44... 47,5).

Условия планирования и расчет крутого восхождения для массы облоя m (m = 0,3 ... 0,56 кг) приведены в табл. 7.

Таблица 7

Условия планирования и расчет крутого восхождения для массы облоя  $m$ 

Уровни	Факторы			Отклик
	$\tilde{X}_1$	$\tilde{X}_2$	$\tilde{X}_3$	
Основной	385	105	225	
Интервал варьирования	85	35	25	
Верхний	470	140	250	
Нижний	300	70	200	
$b_i$	-0,3225	-0,5875	0,0425	
$b_i \times I_i$	-27,4125	-20,5625	1,0625	
Шаг для X				
	6,85	5,14	-0,53	
5	398,7	115,28	224,47	1,00
6	412,4	125,56	223,94	0,78
7	426,1	135,84	223,41	0,55
8	439,8	146,12	222,88	0,33
9	453,5	156,4	222,35	0,10

В опыте № 8 достигнуты оптимальные показатели изготовления детали, которые соответствуют требованиям технологического процесса. При температуре нагрева заготовки 439,8 °С, времени нагрева заготовки 146,12 мин и температуре нагрева штампа 222,8 °С масса облоя детали равна 0,33 мм и находится в допустимых пределах (0,30 ... 0,56).

С учетом того, что получено три варианта показателей для изготовления детали, оптимальными показателями выбраны среднее арифметическое полученных значений и рассчитан отклик. Данные приведены в табл.8.

Таблица 8

Среднее значение полученных режимов обработки и критерии оптимизации

Параметры	$H_1$	$H_2$	$m$	Среднее арифметическое	Отклик $y$
Температура нагрева заготовки, °С	436	440,25	439,8	438,68	21,81
Время нагрева заготовки, мин	140	152,25	146,12	146,12	47,8
Температура нагрева штампа, °С	220	233,75	222,88	225,54	0,33

Экспериментальные и расчетные данные по обработке детали горячей штамповкой приведены в табл. 9.

Таблица 9

Экспериментальные и расчетные данные по обработке детали

Параметры	Граничные показатели технологического процесса	Производственные показатели технологического процесса	Оптимальные показатели после проведения расчетов
Температура нагрева заготовки, °С	300...470	470	438,68
Время нагрева заготовки, мин	70...140	140	146,12
Температура нагрева штампа, °С	200...250	250	225,54
Номинальная масса падающих частей молота, кг	1000	1000	1000
Число ударов молота в минуту	80	80	80
Давление воздуха паровоздушного молота, МПа	0,6...0,8	0,65	0,65

Выводы:

- 1) проанализирован технологический процесс изготовления детали горячей штамповкой;
- 2) разработана матрица планирования опытов;
- 3) выполнен расчет математических моделей и крутого восхождения;
- 4) достигнуты оптимальные режимы для изготовления горячей штамповкой качественной детали.
- 5)

### Список литературы

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 275 с.
2. Горский, В.Г. Планирование промышленных экспериментов (модели статистики) / В.Г. Горский, Ю.П. Адлер, А.М. Талалай. – М.: Металлургия, 1974.–264 с.

**Рецензент:** д.т.н., проф., А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 31.05.12

## **Моделювання і оптимізація технологічного процесу виготовлення деталей гарячим штампуванням**

Проаналізовано технологічний процес виготовлення деталі гарячим штампуванням, визначено варійовані чинники процесу, розроблено матрицю планування дослідів, проведено експеримент, виконано розрахунки математичних моделей крутого сходження і досягнуто оптимальні режими виготовлення деталі, які відповідають вимогам технологічного процесу. Проведено порівняння розрахункових та отриманих експериментальним шляхом даних.

**Ключові слова:** заготовка, штамп, температура нагрівання, час нагрівання, експеримент, матриця планування, чинники, математична модель.

## **Modeling and optimization of technological process of making details by hot stamping**

The technological process of making detail by hot stamping been analyzed, defined varied factors of the process, designed matrix of experiments planning, conducted the experiment, made calculations of mathematical models, steepest ascent and reached optimal regimes of detail manufacturing, which correspond the requirements of technological process. We also made comparison of calculated data and data, which we received in experimental way.

**Keywords:** blank, stamp, heating temperature, heat time, experiment, planning matrix, factors, mathematical model.