

ПОЛУЧЕНИЕ МЕЛКОГО ЗЕРНА В ШТАМПОВАННЫХ ЗАГОТОВКАХ ИЗ НИКЕЛЕВОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ХН75ВМЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2021 Хаймович И.Н.^{1,2}, Саргаева Т.С.², Ураскин Е.А.²

¹Самарский университет государственного управления
«Международный институт рынка», г. Самара, Россия

²Самарский университет, г. Самара, Россия

В статье рассматривается разработка методики получения более мелкого зерна в штампованных заготовках из никелевого жаропрочного сплава ХН75ВМЮ в зависимости от типа штампа, температуры штамповки, температуры промежуточного рекристаллизационного отжига, способа охлаждения после рекристаллизации, температуры закалки и температуры старения.

Ключевые слова: штампованная заготовка, зерно, матрица плана, фактор плана, многофакторная модель.

Как известно, исходными заготовками для штамповки обычно являются слитки, имеющие дендритную структуру (рис 1). Поверхностный слой такого слитка представляет собой слой мелких кристаллов, закристаллизовавшихся в первую очередь при соприкосновении с изложницей. Второй слой – зона мелких и столбчатых кристаллов, которые охлаждались медленнее, чем кристаллы первого слоя, и ориентированы в направлении теплоотвода, а именно перпендикулярно стенкам изложницы [1-8]. В середине слитка застывание металла происходит еще медленнее и формируется зона средних и крупных равноосных дендритов. Кроме того слиток характеризуется наличием усадочной раковины, усадочной рыхлости, газовых пузырей и других дефектов литейного происхожде-

ния, а также неоднородностью химического состава по сечению – дендритной ликвацией. Например, сера и фосфор в основном располагаются в середине слитка, что резко ухудшает его качество.

Для устранения перечисленных дефектов необходимо получение мелкозернистой структуры. Для этого слитки подвергают горячей обработке давлением, например штамповке [10-11].

Рассмотрим процесс штамповки детали из никелевого жаропрочного сплава ХН75ВМЮ. Факторы и уровни их варьирования были выбраны с учетом литературных данных и некоторых предварительных экспериментов. Уровни факторов в натуральном масштабе, а также поставленные им в соответствие уровни F_i представлены в таблице 1.

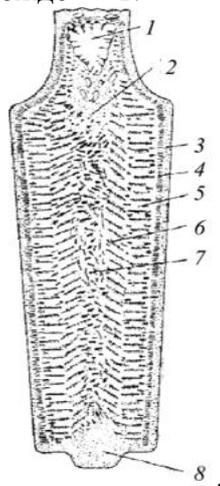


Рисунок 1 – Строение слитка:

1 - усадочная раковина; 2 - усадочная рыхлость; 3 - зона мелких кристаллов; 4 - зона мелких кристаллов, ориентированных перпендикулярно стенкам изложницы; 5 - зона столбчатых кристаллов; 6 - зона крупных дендритов, наклоненных к стенкам изложницы; 7 - зона средних и крупных дендритов; 8 - донная часть слитка

Таблица 1 – Факторы и уровни их варьирования

I	Фактор	X _i	F _i
1	Тип штампа	I	0
		II	1
		III	2
		IV	3
2	Температура штамповки	1100 °C	0
		1150 °C	1
		1200 °C	2
3	Температура рекристаллизации	1100 °C	0
		1140 °C	1
		1170 °C	2
4	Способ охлаждения после рекристаллизации	С печью	0
		На воздухе	1
5	Температура закалки	1200 °C	0
		1250 °C	1
6	Температура старения	850 °C	0
		950 °C	1

В данном случае полный факторный эксперимент (ПФЭ) должен включать $4 \cdot 3^2 \cdot 2^3 = 288$ опытов. Для сокращения числа экспериментов решено построить модель главных эффектов. С учетом числа уровней варьирования, модель будет иметь вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i X_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} X_i^2 + b_{111} X_1^3,$$

где y – величина зерна, b_0 , b_i , b_{ii} , b_{111} – коэффициенты, X_i , X_1 – величины факторов. Так как в ней 11 членов, то количество опытов плана не может быть меньше 11. Кроме того, хотелось бы иметь степени свободы для проверки адекватности модели. Было решено составить план $4 \cdot 3^2 \cdot 2^3 // 16$, преобразовав его из плана $4^5 // 16$. Варианты преобразования представлены на рисунке 2.

Факторы исходного плана $4^5 // 16$	А			Б			В			Г		
	Вид преобразования	s_r	ψ_r	Вид преобразования	s_r	ψ_r	Вид преобразования	s_r	ψ_r	Вид преобразования	s_r	ψ_r
F_1	4→4 36	3	1,0	4→4 3a	3	1,0	4→4 3a	3	1,0	4→4 36	3	1,0
F_2	4→3 36	2	0,9	3→3×2 3a	3	0,6	4→3×2 36	3	0,6	4→3 36	2	0,9
F_3	4→3 2a	2	0,9	4→3×2 2b	3	0,6	4→3 2b	2	0,9	4→3 26	2	0,9
F_4	4→2 ³	3	1,0	4→2	1	1,0	4→2 2b	1	1,0	4→2 ² 2b	2	1,0
F_5	—	—	—	—	—	—	4→2	1	1,0	4→2	1	1,0
k'	11			11			11			11		
n	4			4			5			5		
ψ	0,94			0,72			0,79			0,94		

Рисунок 2 – Варианты преобразования плана $4^5 // 16$ в план $4 \cdot 3^2 \cdot 2^3 // 16$

Составим план А. Для этого необходимы следующие преобразования: первый четырехуровневый фактор плана $4^5 // 16$ оставлен без изменения; второй и третий заменены соответственно на трехуровневые с помощью преобразования 3б; четвертый – на три двухуровневых с помощью преобразования 2а; пятый – вычеркнут. Матрица полученного таким образом плана $4 \cdot 3^2 \cdot 2^3 // 16$ в кодах F_i представлена в таблице 2.

Запишем теперь этот план в натуральном масштабе, оставив при этом уровням качественных факторов X_1 и X_4 обозначение уровней соответственно F_1 и F_4 .

Для обработки данных такого эксперимента необходимо перейти к следующему кодовому масштабу. Будем строить модель размеров зерна:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} z_i + b_{111} q_1 \quad (1)$$

где x_i – линейная функция от X_i ; z_i – квадратичная функция от X_i ; q_1 – кубическая функция от X_1 .

Составленный план позволяет оценить коэффициенты модели (1) ортогонально друг другу. В случае ортогональности равны ну-

лю сумма элементов любого столбца матрицы планирования, а также сумма произведений элементов любых двух столбцов этой матрицы. Будем использовать эти условия при выборе соответствующих функций в (1).

Запишем x_i как линейную функцию от X_i :

$$x_i = k_i (X_i + A_i), \quad (2)$$

где k_i и A_i – константы.

Потребуем выполнения условия;

$$\sum_{i=1}^N x_{i_u} = 0. \quad (3)$$

Тогда после подстановки (2) в (3) получим:

$$\sum_{i=1}^N x_{i_u} = k_i \sum_{u=1}^N (X_{i_u} + A_i) = 0$$

или

$$\sum_{u=1}^N X_{i_u} + NA_i = 0;$$

отсюда

$$A_i = -\frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{i_u}. \quad (4)$$

Значения A_i для нашего случая представлены на рисунке 3.

Таблица 2 – Матрица плана в натуральном масштабе

№ опыта	Порядок реализации	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
1	3	0	1100	1100	0	1250	950
2	4	2	1100	1140	1	1200	950
3	13	3	1100	1170	0	1200	750
4	2	1	1100	1100	1	1250	750
5	11	0	1150	1140	0	1200	750
6	1	2	1150	1100	1	1250	750
7	9	3	1150	1100	0	1250	950
8	10	1	1150	1170	1	1200	950
9	5	0	1200	1170	1	1250	750
10	12	2	1200	1100	0	1200	750
11	8	3	1200	1100	1	1200	950
12	7	1	1200	1140	0	1250	950
13	16	0	1100	1100	1	1200	950
14	14	2	1100	1170	0	1250	950
15	6	3	1100	1140	1	1250	750
16	15	1	1100	1100	0	1200	750

A1	A2	A3	A4	A5	A6
-1,5	-1137,5	-1127,5	-0,5	-1225	-850

A1	A2	A3	A4	A5	A6
= (-1/16)*CYMM(C56:C71)	= (-1/16)*CYMM(D56:D71)	= (-1/16)*CYMM(E56:E71)	= (-1/16)*CYMM(F5)	= (-1/16)*CYMM(G5)	= (-1/16)*CYMM(H56:H71)

Рисунок 3 – Рассчитанные значения A_i

Выбор уровней x_i приведен в таблице 3. Коэффициенты k_i подбираются таким образом, чтобы уровни x_i представляли собой небольшие (лучше целые) числа.

Удобно выбрать k_i из условия:

$$k_i = \frac{2}{X_{i_{\max}} - X_{i_{\min}}}, \quad (5)$$

где X_i – наибольшее значение фактора, X_i – наименьшее значение фактора.

Значения k_i для нашего случая приведены на рисунке 4.

Таблица 3 – Выбор уровней x_i

i	x_i	x_i+A_i	k_i	X_i
1	0	-1,5	2	-3
	1	-0,5		-1
	2	0,5		1
	3	1,5		3
2	1100	-37,5	0,02	-0,75
	1150	12,5		0,25
	1200	62,5		1,25
3	1100	-27,5	0,028571	-0,78571
	1140	12,5		0,357143
	1170	42,5		1,214286
4	0	-0,5	2	-1
	1	0,5		1
5	1000	-225	0,02	-4,5
	1100	-125		-2,5
6	600	-250	0,02	-5
	700	-150		-3

i	x_i	x_i+A_i	k_i	X_i
1	0	=(B96+\$A\$91)	2	=(C96*\$D\$96)
	1	=(B97+\$A\$91)		=(C97*\$D\$96)
	2	=(B98+\$A\$91)		=(C98*\$D\$96)
	3	=(B99+\$A\$91)		=(C99*\$D\$96)
2	1100	=(B100+\$B\$91)	=(2/(B102-B100))	=(C100*\$D\$100)
	1150	=(B101+\$B\$91)		=(C101*\$D\$100)
	1200	=(B102+\$B\$91)		=(C102*\$D\$100)
3	1100	=(B103+\$C\$91)	=(2/(B105-B103))	=(C103*\$D\$103)
	1140	=(B104+\$C\$91)		=(C104*\$D\$103)
	1170	=(B105+\$C\$91)		=(C105*\$D\$103)
4	0	=(B106+\$D\$91)	2	=(C106*\$D\$106)
	1	=(B107+\$D\$91)		=(C107*\$D\$106)
5	1000	=(B108+\$E\$91)	=(2/(B109-B108))	=(C108*\$D\$108)
	1100	=(B109+\$E\$91)		=(C109*\$D\$108)
6	600	=(B110+\$F\$91)	=(2/(B111-B110))	=(C110*\$D\$110)
	700	=(B111+\$F\$91)		=(C111*\$D\$110)

k2	k3	k5	k6
0,02	0,028571	0,02	0,02

k2	k3	k5	k6
=(2/(B102-B100))	=(2/(B105-B103))	=(2/(B109-B108))	=(2/(B111-B110))

Рисунок 4 – Рассчитанные значения k_i

Таким образом, формулы перехода от натуральных значений X_i к кодированным x_i и обратно оказались следующими:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= 2(X_1 - 1,5); \\ x_2 &= 1/50(X_2 - 1137,5); \\ x_3 &= 1/35(X_3 - 1127,5); \\ x_4 &= 2(X_4 - 0,5); \\ x_5 &= 1/50(X_5 - 1225); \\ x_6 &= 1/50(X_6 - 850). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Теперь можно записать уровни x_i в план эксперимента в кодовом масштабе (рис. 5).

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
1	1	-3	-0,75	-0,79	-1	+1	+1
2	1	1	-0,75	0,36	+1	-1	+1
3	1	3	-0,75	1,21	-1	-1	-1
4	1	-1	-0,75	-0,79	+1	+1	-1
5	1	-3	0,25	0,36	-1	-1	-1
6	1	1	0,25	-0,79	+1	+1	-1
7	1	3	0,25	-0,79	-1	+1	+1
8	1	-1	0,25	1,21	+1	-1	+1
9	1	-3	1,25	1,21	+1	+1	-1
10	1	1	1,25	-0,79	-1	-1	-1
11	1	3	1,25	-0,79	+1	-1	+1
12	1	-1	1,25	0,36	-1	+1	+1
13	1	-3	-0,75	-0,79	+1	-1	+1
14	1	1	-0,75	1,21	-1	+1	+1
15	1	3	-0,75	0,36	+1	+1	-1
16	1	-1	-0,75	-0,79	-1	-1	-1

Рисунок 5 – Матрица плана $4 \cdot 3^2 \cdot 2^3 // 16$ в кодовом масштабе

Запишем функцию z_i , как квадратичную функцию от x_i :

$$z_i \equiv k_i(x_i^2 + a_i x_i + c_i), \quad (7)$$

где k_i, a_i, c_i – константы.

Необходимо выполнение условия:

$$\sum_{i=1}^N z_{i_u} \equiv 0. \quad (8)$$

Подставим уравнение 7 в уравнение 8 и получим

$$\sum_{i=1}^N z_{i_u} \equiv k_i(x_i^2 + a_i x_i + Nc_i) = 0.$$

И, поскольку по (3)

$$\sum_{i=1}^N x_{i_u} \equiv 0, \\ \sum_{i=1}^N x_{i_u}^2 + Nc_i \equiv 0.$$

Из этого выражения найдем c_i

$$c_i \equiv -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i_u}^2. \quad (9)$$

Потребуем выполнения условия:

c1	-5	a1	0
c2	-0,6875	a2	-0,4091
c3	-0,7105	a3	-0,2928

Рисунок 6 – Значения c_i и a_i

$$\sum_{i=1}^N x_{i_u} z_{i_u} \equiv 0. \quad (10)$$

Подставим уравнения (2) и (7) в (10) и получим следующее выражение:

$$\sum_{i=1}^N x_{i_u} z_{i_u} = \sum_{i=1}^N x_{i_u}^3 + a_i \sum_{i=1}^N x_{i_u}^2 + c_i \sum_{i=1}^N x_{i_u} = 0$$

Учитывая (3), получаем

$$\sum_{i=1}^N x_{i_u}^3 + a_i \sum_{i=1}^N x_{i_u}^2 = 0,$$

Отсюда найдем a_i :

$$a_i \equiv -\frac{\sum_{i=1}^N x_{i_u}^3}{\sum_{i=1}^N x_{i_u}^2}. \quad (11)$$

По формулам (3) и (5) вычислим c_i и a_i . Значения коэффициентов приведены на рисунке 6. На рисунке 7 приведен расчет этих коэффициентов.

c1	=-1*019/\$U\$3	a1	=-V19/019
c2	=-1*P19/\$U\$3	a2	=-W19/P19
c3	=-1*Q19/\$U\$3	a3	=-X19/Q19

Рисунок 7 – Расчет коэффициентов c_i и a_i

Выбор уровней z_i приведен на рисунке 8.

Выбор уровней z_i				
i	x_i	$x_i^2 + a_i x_i + c_i$	k_i'	z_i
1	-3	4	0,25	1
	-1	-4		-1
	1	-4		-1
	3	4		1
2	-0,75	0,1818	1,8	0,33
	0,25	-0,7273		-1,33
	1,25	0,3636		0,67
3	-0,79	-0,3792	1,5	-0,57
	0,36	-0,8737		-1,31
	1,21	0,4608		0,69

Рисунок 8 – Выбор уровней z_i

Коэффициенты k'' выбираются аналогично коэффициентам k' .

Формулы переходов от значений z_i к x_i и обратно:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= 1/4(x_1^2 - 5); \\ z_2 &= x_2^2 - 0,4941x_2 - 0,6875; \\ z_3 &= x_3^2 - 0,2928x_3 - 0,7105 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Запишем q_i как кубическую функцию от x_i :

$$q_i = k_i''(x_i^3 - d_i x_i^2 + e_i x_i + n_i), \quad (13)$$

где k_i'' , d_i , e_i , n_i – константы.

Потребуем выполнения условия

$$\sum_{u=1}^N q_{i_u} = 0, \quad (14)$$

$$\sum_{u=1}^N q_{i_u} x_{i_u} = 0, \quad (15)$$

$$\sum_{u=1}^N q_{i_u} z_{i_u} = 0, \quad (16)$$

После подстановки (13) в (14); (13) и (2) в (15); (13) и (7) в (16) получим соответственно:

$$\begin{cases} \sum_{u=1}^N q_{i_u} = \sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 + d_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 + e_i \sum_{u=1}^N x_{i_u} + Nn_i = 0 \\ \sum_{u=1}^N q_{i_u} x_{i_u} = \sum_{u=1}^N x_{i_u}^4 + d_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 + e_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 + n_i \sum_{u=1}^N x_{i_u} = 0 \\ \sum_{u=1}^N q_{i_u} z_{i_u} = \sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 z_{i_u} + d_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 z_{i_u} + e_i \sum_{u=1}^N x_{i_u} z_{i_u} + n_i \sum_{u=1}^N z_{i_u} = 0 \end{cases}$$

Поскольку:

$$\sum_{z=1}^N x_{i_u} = 0;$$

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u} z_{i_u} = 0$$

и

$$\sum_{u=1}^N z_{i_u} = 0,$$

то

$$\begin{cases} \sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 + d_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 + Nn_i = 0; \\ \sum_{u=1}^N x_{i_u}^4 + d_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 + e_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 = 0; \\ \sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 z_{i_u} + d_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 z_{i_u} = 0; \end{cases}$$

$$d_i = -\frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 z_{i_u}}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 z_{i_u}}; \quad (17)$$

$$n_i = -\frac{1}{N} \left(\sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 - \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 \sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 z_{i_u}}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 z_{i_u}} \right). \quad (19)$$

$$e_i = -\frac{1}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2} \left(\sum_{u=1}^N x_{i_u}^4 - \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 \sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 z_{i_u}}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 z_{i_u}} \right); \quad (18)$$

На рисунке 9 представлены полученные значения.

d1	0	d1	=-AA19/Z19
e1	-8,2	e1	=(-1/O19)*(Y19-(V19
n1	0	n1	=(-1/U3)*(V19-(O19*

Рисунок 9 – Расчет коэффициентов d₁, e₁, n₁.

На рисунке 10 представлен выбор уровней q₁

Выбор уровней q ₁				Выбор уровней q ₁			
x1	x1^3+d1*x1^2+e1*x1+n1	k1''	q1	x1	x1^3+d1*x1^2+e1*x1+n1	k1''	q1
-3	-2,4	0,14	-0,3	-3	=H29^3+SJ520*H29^2+SJ521*H29+SJ522	=2/(I30-I3)	=I29*SLS29
-1	7,2		1,0	-1	=H30^3+SJ520*H30^2+SJ521*H30+SJ522		=I30*SLS29
1	-7,2		-1,0	1	=H31^3+SJ520*H31^2+SJ521*H31+SJ522		=I31*SLS29
3	2,4		0,3	3	=H32^3+SJ520*H32^2+SJ521*H32+SJ522		=I32*SLS29

Рисунок 10 – Выбор уровней q₁

Формула перехода от значений q₁ к x₁ и обратно:

$$q_1 = 1/8(x_1^3 - 8,2x_1) \quad (20)$$

Запишем полученные уровни q₁ в план эксперимента и получим следующую таблицу 4.

Таблица 4 – Матрица плана 4*3²*2³//16 в кодовом масштабе

Матрица плана 4*3²*2³//16 в кодовом масштабе

№ опыта	x0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	z1	z2	z3	q1	Величина зерна, мм (Y)	
1	1	-3		-0,75	-0,79	-1	1	1	1	0,33	-0,57	-0,3	0,94
2	1	1		-0,75	0,36	1	-1	1	-1	0,33	-1,31	-1	0,66
3	1	3		-0,75	1,21	-1	-1	-1	1	0,33	0,69	0,3	0,9
4	1	-1		-0,75	-0,79	1	1	-1	-1	0,33	-0,57	1	0,76
5	1	-3		0,25	0,36	-1	-1	-1	1	-1,33	-1,31	-0,3	0,8
6	1	1		0,25	-0,79	1	1	-1	-1	-1,33	-0,57	-1	0,64
7	1	3		0,25	-0,79	-1	1	1	1	-1,33	-0,57	0,3	0,82
8	1	-1		0,25	1,21	1	-1	1	-1	-1,33	0,69	1	0,6
9	1	-3		1,25	1,21	1	1	-1	1	0,67	0,69	-0,3	0,89
10	1	1		1,25	-0,79	-1	-1	-1	-1	0,67	-0,57	-1	0,92
11	1	3		1,25	-0,79	1	-1	1	1	0,67	-0,57	0,3	0,76
12	1	-1		1,25	0,36	-1	1	1	-1	0,67	-1,31	1	0,97
13	1	-3		-0,75	-0,79	1	-1	1	1	0,33	-0,57	-0,3	0,68
14	1	1		-0,75	1,21	-1	1	1	-1	0,33	0,69	-1	0,87
15	1	3		-0,75	0,36	1	1	-1	1	0,33	-1,31	0,3	0,71
16	1	-1		-0,75	-0,79	-1	-1	-1	-1	0,33	-0,57	1	0,82

Дисперсия известна по предыдущим опытам $S_y^2 = 0,0016$ при числе степеней свободы $f_1 = 10$.

Поскольку наша матрица планирования ортогональна (табл. 1), коэффициенты модели b_i считали по следующей формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u} y_{i_u}}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2},$$

для нашего случая суммирование от $u=1$ до $N=16$, где x_{i_u} – элементы матрицы условий эксперимента, y_u – элементы матрицы результатов опыта.

Дисперсию оценок коэффициентов считали по следующей формуле:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2}$$

где $S_{b_i}^2$ – дисперсия оценок коэффици-

ентов, S_y^2 -дисперсия опытов.

Доверительные интервалы оценок коэффициентов определили по формуле:

$$\Delta b_i = t_{a;f_1} S_{b_i};$$

где Δb – доверительный интервал оценок коэффициентов, $t_{a;f_1}$ – критерий Стьюдента, в зависимости от уровня значимости a и числа степеней свободы f_1 .

Полученные значения дисперсии и доверительных интервалов отображены на рисунке 11 [9].

	b_i	$S_{b_i}^2$	S_{b_i}	Δb_i		
b0	0,79	0,0001	0,010	0,02	хнач.	b0
b1	-0,009	0,00002	0,004	0,01		
b2	0,042	0,00015	0,012	0,03	знач.	b2
b3	0,000	0,00014	0,012	0,03		
b4	-0,078	0,0001	0,010	0,02	знач.	b4
b5	0,035	0,0001	0,010	0,02	знач.	
b6	-0,003	0,0001	0,010	0,02		
b11	0,01	0,0001	0,010	0,02		b11
b22	0,064	0,00016	0,013	0,03	знач.	b22
b33	-0,488	0,00014	0,012	0,03	знач.	b33
b111	-0,001	0,00018	0,014	0,03		b111

	b_i	$S_{b_i}^2$	S_{b_i}	Δb_i	
b0	=O44/AB19	=L20/AB19	=КОРЕНЬ(C47)	=D47*\$L\$21	хнач.
b1	=P44/O19	=L20/O19	=КОРЕНЬ(C48)	=D48*\$L\$21	
b2	=Q44/P19	=L20/P19	=КОРЕНЬ(C49)	=D49*\$L\$21	знач.
b3	=R44/Q19	=L20/Q19	=КОРЕНЬ(C50)	=D50*\$L\$21	
b4	=V44/R19	=L20/R19	=КОРЕНЬ(C51)	=D51*\$L\$21	знач.
b5	=W44/S19	=L20/S19	=КОРЕНЬ(C52)	=D52*\$L\$21	знач.
b6	=X44/T19	=L20/T19	=КОРЕНЬ(C53)	=D53*\$L\$21	
b11	=Y44/AC44	=L20/AC44	=КОРЕНЬ(C54)	=D54*\$L\$21	
b22	=Z44/AD44	=L20/AD44	=КОРЕНЬ(C55)	=D55*\$L\$21	знач.
b33	=AA44/AE44	=L20/AE44	=КОРЕНЬ(C56)	=D56*\$L\$21	знач.
b111	=AB44/AF44	=L20/AF44	=КОРЕНЬ(C57)	=D57*\$L\$21	

Рисунок 11 – Полученные значения коэффициентов модели, дисперсии оценок коэффициентов модели и доверительных интервалов

Коэффициенты $b_0, b_2, b_4, b_5, b_{22}, b_{33}$ больше по абсолютному значению своих доверительных интервалов, поэтому они являются статистически значимыми при 5%-ном уровне значимости. Остальные коэффициенты статистически незначимые и их можно не включать в модель.

Таким образом, получили следующее уравнение регрессии:

$$y = 0,79 + 0,042x_2 - 0,078x_4 + 0,035x_5 + 0,064z_2 - 0,488z_3$$

Вывод: из уравнения регрессии можно уви-

деть, что величина зерна в штампованных заготовках из сплава ХН75ВМЮ (ЭИ827) не зависит от типа штампа (коэффициенты b_1, b_{11}, b_{11} незначительны). Штамповку можно воспроизводить в любом из этих штампов. Также на величину зерна не влияет температура старения (коэффициент b_6 незначителен). Также необходимо заготовки после рекристаллизации охлаждать на воз- температуры 1200°C . ($x_5=-1$, так как $b_5=0,035$).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бабенко В. А., Бойцов В. П., Волик Ю. П. Объемная штамповка. Атлас схем и типовых конструкций штампов. - М. : Машиностроение, 1982. - 104 с.
2. Брюханов А. Н. Ковка и объемная штамповка. - М. : Машиностроение, 1975. -408 с.
3. Хаймович И.Н. Автоматизация проектирования объектов заготовительно-штамповочного производства компрессорных лопаток авиационных двигателей// Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. - 2014. - № 2. - С. 44-48.
4. Гречников Ф.В., Ерисов Я.А. Влияние параметров текстуры на устойчивость процессов формообразования анизотропных заготовок // Известия Самарского научного центра РАН. — 2012. — №4. — С. 293-298.
5. Гречников Ф.В., Ерисов Я.А. Научные основы создания листовых материалов для аэрокосмической техники с заданной кристаллографией структуры // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2018. — № 1 (751). — С. 15-19
6. Демьяненко Е.Г., Гречников Ф.В., Попов И.П. Способ пластического структурообразования // Вестник СГАУ. — 2012. — № 5 (36). — С. 241-243.
7. Ерисов Я.А., Гречников Ф.В., Сурудин С.В. Критерий пластичности анизотропной среды с учетом кристаллографии структуры и его экспериментальная проверка // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. — 2016. — № 4. — С. 42-49
8. Сорокин В. Г., Волосникова А. В., Вяткин С. А. Марочник сталей и сплавов. - М. : Машиностроение, 1989.- 640 с.
9. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.
10. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства. - М.: Машиностроение, 1976. - 560 с.
11. Хаймович А.И., Хаймович И.Н. Исследование динамических характеристик формообразования при штамповке на молотах с высокими скоростями // В сборнике трудов 3-й Международной научно-технической конференции: «Металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования. Металлдеформ - 2009. МЕТАЛЛДЕФОРМ – 2009». – Самара, Самарский университет, 2009. - С. 290-296.

OBTAINING FINE GRAIN IN STAMPED BLANKS MADE OF NICKEL HEAT-RESISTANT ALLOY HN75VMU USING INFORMATION TECHNOLOGY

© 2020 Irina N. Khaimovich^{1,2}, Tamara S. Saragaeva², Evgeniy A. Uraskin²

¹Samara University of Public Administration
“International Market Institute”, Samara, Russia

²Samara University, Samara, Russia

The article discusses the development of a technique for obtaining finer grains in stamped workpieces made of nickel heat-resistant alloy HN75VMU, depending on the type of stamp, stamping temperature, intermediate recrystallization annealing temperature, cooling method after recrystallization, quenching temperature and aging temperature.

Keywords: stamped blank, grain, plan matrix, plan factor, multifactor model.