

<sup>1</sup>Борсяков А.С., д-р техн. наук, проф.,  
<sup>2</sup>Афанасьев А.А., д-р техн. наук, проф.

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий  
<sup>2</sup>Белгородский государственный технологический университет

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ БОРСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛЯХ

Технологические процессы получения многокомпонентных борсодержащих покрытий основываются на диффузионном насыщении поверхностных слоев деталей машин бором совместно с другими легирующими элементами. В этих процессах определяющее значение на прочностные и эксплуатационные характеристики деталей имеет толщина диффузионного слоя, оптимальное значение которого до настоящего времени практически не выяснена. Основными параметрами из различных показателей технологических процессов являются температура и длительность технологического параметра. Другие параметры добавляются в зависимости от специфики метода формирования диффузионных слоев. Многовариантность режимов диффузионного насыщения поверхностных слоев деталей способствует уменьшению стабильности их технологических и эксплуатационных свойств. Таким образом, возникает проблема решения задач с множественными критериями и экстремумами. В данной работе решены поиски оптимальных параметров процессов диффузии одного или нескольких элементов в поверхностные слои стали 40ХНМА. Для этого использовался аппарат планирования научных исследований, включающий метод полного факторного эксперимента вместе с задачей линейного программирования нахождения множителей Лагранжа и градиентным методом поиска оптимальных значений в соответствии с принципом Парето решений. Итогом настоящей работы явилось нахождение уравнений регрессии зависимости толщины диффузионного (боридного) слоя от условий химико-термической обработки для ряда марок инструментальных и конструкционных сталей.

**Ключевые слова:** оптимизация процессов, факторный эксперимент для диффузионных процессов, метод Парето, оптимизация физико-механических характеристик, оптимизация эксплуатационных свойств, кинетика формирования диффузионных слоев.

**Введение.** Технология нанесения покрытий на металлы и сплавы [1] и влияние небольших по толщине (менее 100 мкм) полученных слоев на технологические и эксплуатационные характеристики деталей всегда будут вызывать научный интерес в связи с непрерывным совершенствованием производственных процессов при разных уровнях развития технического прогресса. Наряду с разработкой и исследованием методов нанесения покрытий на металлические и неметаллические основы, которые представляют инновационные технологические направления [2], представляет интерес применение инновационных усовершенствований в традиционных методах получения диффузионных слоев на металлах и сплавах с сокращенными сроками получения покрытий, т.е. слоев с меньшей толщиной по сравнению с предыдущими методами. Исследованию подвергались диффузионные слои, получаемые одновременным насыщением бором и другими элементами [3, 4].

**Методика расчета.** Одной из поставленных задач работы было получение закономерностей взаимодействия различных технологических и механических параметров, в частности кривые

равных значений (номограммы). Для их расчета применяются уравнения регрессии [5, 6]:

$Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ , например, для параметра  $\sigma_b$  – предела прочности стали марки 40ХНМА.

$$Y_1 = 937,74 + 7,73X_1 + 9,92X_2 - 50,86X_3 - 32X_1X_2 - 16,75X_1X_3 - 19,25X_2X_3 + 0,9X_1^2 + 4,79X_2^2 - 18,73X_3 \quad (1)$$

В связи с тем, что результаты расчета функциональных зависимостей наносятся на плоскость, то уравнения регрессии должны быть приведены к виду с двумерными переменными. Возможны варианты:

$$Y_1 = f(X_1, X_2); \quad X_3 = \text{const}$$

$$Y_1 = f(X_2, X_3); \quad X_1 = \text{const}$$

$$Y_1 = f(X_1, X_3); \quad X_2 = \text{const}$$

Примем  $X_3 = 0 \rightarrow (1)$ :

$$Y_1 = 937,74 + 7,73X_1 + 9,92X_2 - 32X_1X_2 + 0,9X_1^2 + 4,79X_2^2 \quad (2)$$

Определим координаты центра поверхности дифференцированием уравнения (2) по  $X_1$  и  $X_2$  и приравняв полученные уравнения к нулю:

$$\frac{dY_1}{dX_1} = 7,73 - 32X_2 + 1,8X_1 = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dY_1}{dX_2} = 9,92 - 32X_1 + 5,58X_2 = 0$$

Решение полученной системы линейных уравнений (3) приводит к нахождению координат центра двумерной поверхности:

$$\begin{aligned} X_{1S} &\cong 0,26 \\ X_{2S} &\cong 0,3 \end{aligned} \quad (4)$$

(4)  $\rightarrow$  (2). Отсюда определяется значение выходного параметра в центре поверхности  $Y_S$ :  $Y_{1S} = 920$ .

Запишем уравнение (2) в каноническом виде. Для этого следует составить характеристический полином по уравнению (2) и приравнять его к нулю:

$$\begin{vmatrix} (b_{11} - B) & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{21} & (b_{22} - B) \end{vmatrix} = 0,$$

здесь  $B$  – канонический коэффициент.

В нашем случае это будет выглядеть так:

$$\begin{vmatrix} (0,9 - e) - 16 & \\ -16(4,79 - e) & \end{vmatrix} = 0,$$

Преобразуем это выражение:

$$(0,9 - B)(4,79 - B) - 16 \cdot 16 = 0.$$

В результате приходим к квадратному уравнению:

$$B^2 - 5,69B - 319,69 = 0.$$

Результат решения этого уравнения является основанием правильности проведенных расчетов.

Записываем каноническое уравнение:

$$Y - Y_S = B_1 X_1^2 + B_2 X_2^2.$$

В нашем примере:

$$Y - 920 = -15,26X_1^2 + 20,95X_2^2. \quad (5)$$

Известно, что если знаки перед  $B_i$  разные, то в трехмерном пространстве полученное тело представляет собой гиперboloид, если же знаки перед  $B_i$  одинаковы, то – эллипсоид.

Установлено для эллипсоида: если знаки перед коэффициентом  $B$  положительные (+), то в центре поверхности находится минимум, если отрицательные (–), то – максимум. Наносим на плоскость кривые равных значений.

Примем, что уравнение  $Y = f(X_1, X_2)$  в трехмерном пространстве является эллипсоидом.

Задаем значения  $Y = \text{const}$ :  $Y_1, Y_2, \dots$ . Сечение пространственного тела плоскостью представляет везде эллипс. Проецируем полученные сечения на плоскость  $(X_1, X_2)$ . Получаем семейство кривых равных значений, то есть кривых (в данном случае эллипсов), для каждой точки которой  $Y = \text{const}$ .

То же самое выполним для трехмерного тела – гиперboloида.

Для переменной  $Y$  в уравнении (5) задаем последовательно значения, например,  $Y$ : 930, 950, 970, 990, 1010.

$$1 = \frac{X_1^2}{a^2} + \frac{X_2^2}{b^2} \quad - \text{ эллипс}$$

$$1 = \frac{X_1^2}{a^2} - \frac{X_2^2}{b^2} \quad - \text{ гиперboloид}$$

$$Y = 930$$

$$930 - 920 = -15,26X_1^2 + 20,95X_2^2$$

$$10 = -15,26X_1^2 + 20,95X_2^2$$

$$1 = -15,26X_1^2 + 2,095X_2^2$$

$$1 = -\frac{X_1^2}{\frac{1}{15,26}} + \frac{X_2^2}{\frac{1}{2,095}}$$

Определяем характеристические точки гиперboloида (или эллипса) – вершин  $a$  и  $b$ .

Семейство уравнений асимптот для гиперболы рассчитывают по выражению:

$$X_2^{\odot} = \pm X_1^{\odot} \frac{b}{a}.$$

При взаимном влиянии параметров процесса упрочнения диффузионным насыщением, т.е. при наличии в уравнении (2) межфакторного взаимодействия  $(X_1 X_2)$  следует определить угол поворота осей:

$$\alpha = \text{arcctg} \left[ \frac{b_{12}}{2(B_{22} - b_{22})} \right].$$

Далее необходимо построить кривые равных значений. Для этого следует перенести оси в центр поверхности с координатами  $X_{1S}$  и  $X_{2S}$  (см.4) – оси  $X_1'$ . Для этого новые оси поворачивают на угол  $\alpha$  и на повернутых осях наносят гиперболы (эллипсы).

**Технология.** Диффузионные слои могли быть получены в твердой, газовой и жидкой средах. Инновационным усовершенствованием в

технологическом процессе было активирование насыщающей среды на основе или реверсирования электролизного тока, или реверсирования газового потока, или обеспечения псевдокипения порошкообразной насыщающей среды [7, 8]. Активирование позволяет увеличить скорость диффузионного проникновения насыщающих элементов, повысить сплошность покрытий и сократить время технологической обработки.

**Основной текст.** Основной целью настоящей работы было нахождение оптимальных режимов процесса электролизного насыщения бором и бором совместно с другими элементами различных марок сталей: инструментальных,

штамповых, быстрорежущих, например таких как: 40ХНМА, У8, ХВГ, Х12М, Р6М5.

Для исследования взаимодействия основных факторов, влияющих на процесс химико-термической обработки стали 40ХНМА, были применены математические методы планирования эксперимента [9]. В качестве изучаемых факторов были выбраны температура борирования ( $X_1$ ), время борирования ( $X_2$ ) и температура последующего отпуска ( $X_3$ ) с выдержкой в течение одного часа. Основной уровень, интервалы варьирования и матрицы ортогонального композиционного плана были выбраны на основе полученных ранее экспериментальных данных (табл.1).

Таблица 1

### Пределы изменения факторов

№ п/п	Условия планирования	$X_1$ (К)	$X_2$ (мин)	$X_3$ (К)
1.	Основной уровень	1123	60	823
2.	Интервал варьирования	30	30	50
3.	Верхний уровень	1153	90	873
4.	Нижний уровень	1093	30	773
5.	Верхнее "звездное" плечо	1173	110	907
6.	Нижнее "звездное" плечо	1073	10	739

В качестве оптимизируемых параметров брались показатели механических свойств:

$U_1$  –  $\sigma_B$ , показатель прочности, определяемый стандартом как предел прочности стали (МПа);

$U_2$  –  $\sigma_{0,2}$ , показатель прочности, определяемый стандартом как условный предел текучести стали (МПа);

$U_3$  –  $\psi$ , показатель прочности, определяемый стандартом как относительное сужение стали (%);

$U_4$  –  $\delta$ , показатель прочности, определяемый стандартом как относительное удлинение стали (%);

Для технологических процессов, таких как диффузионное насыщение поверхностных слоев детали, целесообразно применить полный факторный эксперимент. Что и было сделано в сочетании с центральным композиционным ротатбельным униформпланированием, являющимся методом реализации экспериментального планирования и позволяющим получить статистическую модель в виде полинома второй или более высокой степени. Сердцевинной центральными композиционных планов является полный факторный эксперимент (ПФЭ) 1-го порядка типа 2 при  $K < 5$ , либо 2 при  $K \geq 5$ . Центральными их называют вследствие симметричности относительно центра плана. Композиционными называют потому, что они komponуются путем добавления

определенного количества опытов к плану 1-го порядка.

Последовательность экспериментов устанавливалась на основе использования таблицы случайных чисел, что исключало влияние неконтролируемых параметров на результаты эксперимента.

Обработка результатов эксперимента проводилась по общепринятым методикам, в которых использовались различные статистические критерии для оценки результатов обработки, например для проверки однородности дисперсий – критерий Кохрена, для оценки значимости коэффициентов уравнений регрессии – критерий Стьюдента, для выяснения адекватности математической модели процесса – критерий Фишера.

Составленная для заданных условий матрица для диффузионного насыщения поверхностных слоев сталей обеспечила получение аналитических зависимостей механических свойств от параметров термообработки такого вида по числу факторов:

$$U_1' = 1028 + 22,5X_1 - 9,6X_2 - 115X_3 + 4,5X_1X_2 - 8,2X_1X_3 + 2X_2X_3 + 30,2X_1^2 + 145X_2^2 + 3X_3^2, \text{Па}; \quad (6)$$

$$U_2' = 930,5 + 19,9X_1 - 7,5X_2 - 113,3X_3 + 12,7X_1X_2 - 2,5X_2X_3 + 28,6X_1^2 - 16,9X_2^2 - 2,5X_3^2, \text{МПа}; \quad (7)$$

$$U_3' = 35,8 - 2,8X_1 - 3,2X_2 + 7,9X_3 +$$

$$+1,5X_1X_3+1,5X_1^2+0,9X_2^2+1,2X_3^2, \%; \quad (8)$$

$$Y_4'=9,4-0,8X_1-0,1X_2+2,1X_3+0,3X_1X_2+0,3X_1X_3+0,5X_2X_3-0,5X_1^2-0,6X_2^2-0,5X_3^2, \%. \quad (9)$$

Уравнения регрессии (6–9) позволяет выделить факторы, оказывающие наибольшее влияние на исследуемые процессы. Знак плюс перед коэффициентами указывает на то, что при увеличении значения независимого переменного значения выходного фактора увеличивается, а знак минус – уменьшается. Числовые значения, выражающие отношение коэффициентов, стоящих перед линейными членами  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ , показывает степень влияния параметров относительно друг друга. Полученная информация позволяет составить определенное представление о влиянии различных факторов химико-термической обработки на исследуемые параметры, а также построить математические модели, делающие возможность рассчитать значения выходных (прогнозируемых) параметров внутри выбранных интервалов изменения переменных. Отношение коэффициентов, стоящих перед линейными членами  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ , показывает степень влияния параметров относительно друг друга (табл.2)

Полиномиальная модель позволяет строить графики и диаграммы, обеспечивающие дополнительную наглядную информацию при решении задач нахождения оптимальных значений параметров. В этом плане представляет интерес нахождения одинаковых их значений в виде семейств полученных аналитических зависимостей. На рис. 1 даны кривые равных значений показателя прочности стали – предела прочности  $\sigma_B$  хромо-никеле-молибденовой стали (40ХНМА)

от выходных показателей. Представленные кривые практически несут смысл номограмм и поэтому пригодны для справочного использования. Для определения оптимальных режимов анализируемого процесса диффузионного насыщения может быть использован так называемый метод «фридж - анализ» удобный для специфических ситуаций, когда имеются сильные корреляции между факторами, входящими в модель, вследствие чего матрица  $X^T X$  становится практически вырожденной и затруднительно найти единственное решение. Процесс основывается на использовании метода неопределенных множителей Лагранжа.

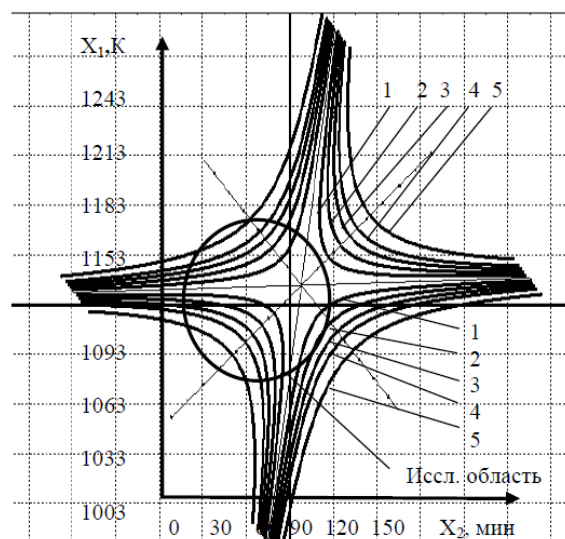


Рис.1. Кривые зависимости одинаковых значений (гиперболы) предела прочности стали 40ХНМА от температуры закалки  $X_1$  и времени выдержки  $X_2$  при температуре отпуска  $X_3 = 823$  К, мПа: 1 – 950 К; 2 – 960 К; 3 – 970 К; 4 – 980 К; 5 – 1000 К

Таблица 2

**Значения отношений коэффициентов перед линейными членами  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ , влияющие на выходные параметры**

Отношения	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_1'$	$Y_2'$	$Y_3'$	$Y_4'$
$b_2/b_1$	1,282	1,923	-0,066	-0,870	-0,427	-0,375	1,548	0,15
$b_3/b_1$	-6,579	-8,080	-2,720	-11,843	-5,110	-5,691	-2,847	-2,64
$b_3/b_2$	-5,129	-4,202	40,875	13,62	11,95	15,14	-2,479	-17,9

В конечном итоге многократные эксперименты в соответствии с планом опытов позволили получить важную для проведения технологического процесса информацию о влиянии различных режимов химико-термической обработки на исследуемые параметры, а также получить математические модели, обработка которых позволяет рассчитать значения прогнозируемых (выходных) параметров внутри заданных интервалов изменения переменных.

Для выбора оптимальных режимов составляется следующая система уравнений:

$$\begin{cases} (b_{11} - \lambda)x_1 + 0,5b_{12}x_2 + 0,5b_{13}x_3 + 0,5b_1 = 0 \\ 0,5b_{21}x_1 + (b_{22} - \lambda)x_2 + 0,5b_{23}x_3 + 0,5b_2 = 0 \\ 0,5b_{31}x_1 + 0,5b_{32}x_2 + (b_{33} - \lambda)x_3 + 0,5b_3 = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

Следует иметь в виду, что на значения неопределенных коэффициентов Лагранжа  $\lambda$  накладывается ограничение, которое определяется с помощью параметра Хорля [6]. Параметр Хорля определяется по формуле:

$$\lambda' = 2 \left( \begin{matrix} B_{\max} - b_{kk} \\ \min \end{matrix} \right). \quad (6)$$

Здесь  $B_{\max}$  – максимальный или минимальный  $\min$  (в зависимости от задачи) канонический коэффициент,  $b_{kk}$  – коэффициент регрессии при  $k$  – ом квадратичном члене.

Рассчитанные интервалы изменений для исследуемых критериев оптимизации приведены в соответствующих таблицах выбора оптимальных

режимов. Для выбранных значений  $\lambda$ , по уравнениям (5) были найдены оптимальные режимы в соответствии с заданным выходным параметром. Найденные расчетами показатели режимов обеспечения оптимального предела прочности стали хромо-никеле-молибденовой стали (40ХНМА) от параметров термической обработки представлены в табл.3.

Таблица 3

**Показатели режима термической обработки для обеспечения оптимального значения предела прочности стали 40ХНМА**

$\lambda$ $X, Y$	2,4	3,0	3,6	4,2	4,8	5,4	6,0	6,6	7,2	7,8
$X_1$	0,230	0,273	0,326	0,369	0,401	0,443	0,472	0,505	0,521	0,532
$X_2$	1,873	1,826	1,779	1,718	1,673	1,627	1,580	1,523	1,478	1,425
$X_3$	-1,673	-1,615	-1,572	-1,504	-1,443	-1,374	-1,75	-1,253	-1,187	-1,118
$Y_1$ , МПа	1059,917	1055,417	1051,137	1045,791	1040,017	1034,228	1028,719	1023,983	1018,192	1015,605

В теории планирования экспериментов отмечается, что для нахождения параметра обеспечения оптимального предела прочности легированной стали 40ХНМА, необходимо исходить из их максимально допустимых значений внутри заданного интервала изменения независимых переменных  $X_i$ . Результаты, представленные в табл.3 показали, что таким режимом является режим при  $\lambda = 4,8$ :  $X_1 = 0,401$ ,  $X_2 = 1,673$ ,  $X_3 = -1,443$ . Оптимальный режим, полученный в кодированном виде, переводим в натуральный вид, т.е. переходя от кодированных значений  $X_i$  к натуральным значениям, имеем температуру закалки  $X_1 = 1135$ К, время выдержки  $X_2 \approx 110$  мин. и температуру отпуска  $X_3 = 750$  К. В этом случае предел прочности стали составлял  $Y_1 = 1040$  МПа.

При дальнейшем пошаговом изменении  $\lambda$  значение параметра оптимизации  $Y_1$  уменьшалось и при  $\lambda = 7,8$ :  $X_1 = 1139$  К,  $X_2 = 102,75$  мин. и  $X_3 = 767$  К.

В итоге получаем, что в качестве оптимального интервала изменения параметров для критерия оптимизации  $Y_1$  – предела прочности стали следует принять: температуру закалки  $X_1 = 1135 - 1139$  К, время выдержки  $X_2 = 102 - 110$  мин., температуру отпуска  $X_3 = 751 - 767$  К. Найденным оптимальным значениям режима упрочнения стали соответствует предел прочности стали  $Y_1 = 1015 - 1040$  МПа.

В представленной работе была решена проблема сопоставимости (конфликта) критериев оптимизации  $Y_j$  на основе принципа Парето. Как известно решение многокритериальных задач связано с выбором альтернативы решений. Если же предпочтение хотя бы по одному критерию расходится с предпочтением по другому, то эти альтернативы признаются несопоставимыми. В

результате попарного сравнения решений все худшие по всем критериям альтернативы отбрасываются, а все оставшиеся несопоставимые между собой принимаются. Если все максимально достижимые значения частных критериев не относятся к одной и той же альтернативе, то принятые альтернативы образуют так называемое множество Парето, после чего выбор на этом завершают. В качестве примера можно рассмотреть построение области Парето на основе несопоставимости (конфликта) критериев  $U_3$  и  $U_4$  по фактору  $X_2$ , где  $X_2$  является кодом времени выдержки. Рассмотрение данного варианта показало, что критерии  $U_3$  и  $U_4$  по интервалам изменения факторов  $X_1 = 1083 - 1089$  К и  $X_3 = 876 - 900$  К имеют согласованное решение. Значения факторов  $X_1 = 1086$  К и  $X_3 = 888$  К были подставлены в уравнения (5) и получены следующие уравнения:

$$U_3 = 61,67 - 0,108X_2 + 1,496X_2^2, \quad (7)$$

$$U_4 = 22,515 + 0,101X_2 + 0,513X_2^2. \quad (8)$$

С помощью выражений (7) и (8) были построены графики поведения критериев  $U_3(X_2)$  и  $U_4(X_2)$ ,  $X_2 \in [10, 110]$  (рис.2) и представлена область Парето, как показано на рис.3.

Таким образом, решение многокритериальных предусматривает выделение множества (область) Парето из исходного множества альтернативных решений. При этом в область Парето войдут все варианты решения, оптимальные по попарному отношению Парето, то есть имеющие хотя бы по одному критерию максимально приемлемое значение и не уступающие остальным решениям по другим критериям. Окончательный выбор конкретной альтернативы лежит в сфере компетенции лица, принимающего это решение.

В настоящее время при решении многокритериальных задач по методу Парето эффективно используется векторная модель, для которой вводится правило, позволяющее оценить решения – безусловный критерий предпочтения (БКП) [5]. Из всего множества  $D$  допустимых решений БКП выделяет подмножество  $M_0$  не худших несопоставимых между собой, определяющих множество Парето [10]. Следовательно, решением задачи оптимизации с векторным критерием эффективности формально можно считать нахождение множества  $M_0$  – не худших решений.

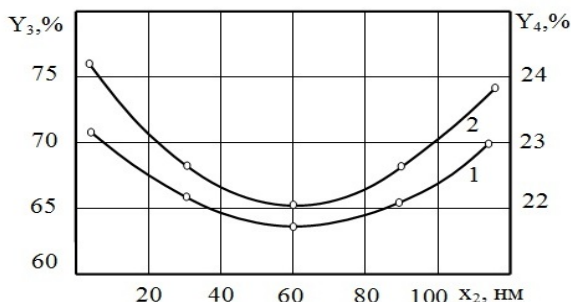


Рис.2. Поведение критериев 1– $Y_3(x_2)$  и 2– $Y_4(x_2)$ , для  $x_1=1086$  К,  $x_3=888$  К

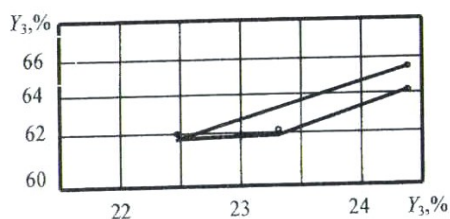


Рис. 3. Область Парето критериев  $Y_3(x_2)$  и  $Y_4(x_2)$

Однако результат в виде множества  $M_0$  не может нас удовлетворить, так как он допускает целое множество решений. Естественно предположить, что окончательные решения следует искать среди элементов множества  $M_0$ . Поэтому актуальной задачей является сужение множества

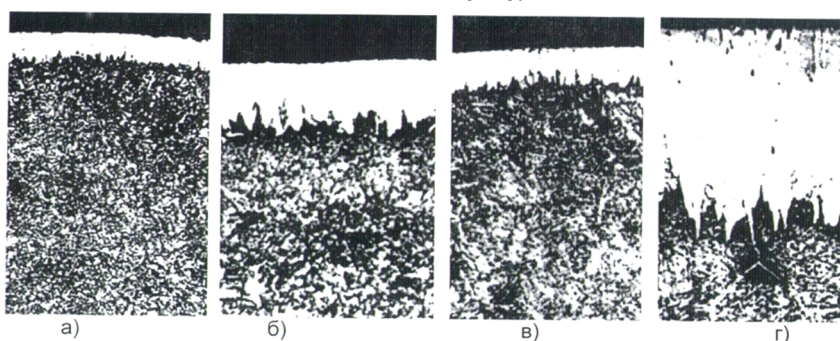


Рис. 4 Структура диффузионных слоев на стали 40ХНМА, подвергнутой электролизному борированию при : а)  $T=850$  °С,  $T=10$  мин.;  $T=550$  °С; б)  $T=820$  °С,  $T=90$  мин.;  $T=600$  °С; в)  $T=820$  °С,  $T=30$  мин.;  $T=600$  °С, г)  $T=880$  °С,  $T=90$  мин.;  $T=500$  °С

В производственных условиях борированию подвергали высадочные пуансоны, изготовленные из стали 40ХНМА. Пуансоны, подвергнутые обычной термической обработке, проработали 3

$M_0$ . Понятно, что сужение приводит к потере информации о множестве  $M_0$  и только ценой этих потерь можно кратко его описать.

Для проверки правильности сделанных выводов был поставлен ряд параллельных экспериментов. Анализ полученных результатов показал, что все они лежат внутри рассчитанного доверительного интервала. Среднеквадратичное отклонение между экспериментальными и теоретическими результатами для всех критериев оптимизации не превышало 5–7 %.

Из приведенных данных следует, что предел прочности борированных образцов на 20 – 25 % превышает предел прочности стали 40ХНМА, подвергнутой только термической обработке. Пластические свойства стали с борсодержащим слоем заметно снижаются [8].

Для оценки толщины слоя и влияния технологических факторов насыщения на кинетику его формирования были дополнительно построены две модели: модель, рассчитанная с учетом энергии активации и коэффициентов диффузии бора:

$$S = ( 0,47 \cdot 10^{-2} \cdot \exp - \frac{22500}{RT} )^{0,48} \cdot \exp \frac{121}{RT} , \quad (9)$$

и квадратичная регрессионная модель, учитывающая зависимость глубин слоя от параметров насыщения

$$S = 1802,6 - 3,2X_1 - 6,5X_2 - 1,6X_3 + 0,002X_1^2 + 0,003X_2^2 + 0,001X_3^2 + 0,008X_1X_2 + 0,00008X_1X_3 + 0,00008X_1X_3 + 0,0005X_2X_3 . \quad (10)$$

Оценка влияния факторов, входящих в это уравнение, на толщину слоя показала, что наиболее значимым в этой области является время диффузионного насыщения ( $R = 0,765$ ).

Проведенные исследования позволили определить оптимальные режимы нанесения борсодержащих покрытий и внедрить их в производство.

тыс циклов до выхода из строя, а пуансоны, подвергнутые борированию при 880 °С, 30 минут, последующей закалкой в масле и отпуском при

500 °С, проработали до полного износа 18 тыс. циклов.

**Выводы:** В работе решены многокритериальные экстремальные задачи оптимизации процессов диффузионного насыщения стали 40ХНМА. Для ряда конструкционных и инструментальных сталей построены уравнения регрессии зависимости толщины боридного слоя от условия химико-термической обработки. Получены уравнения регрессии зависимостей выходных параметров ( $\delta_b$ ,  $\delta_{0,2}$ ,  $\psi$ ,  $\delta$ ) от технологических параметров насыщения сталей 40ХНМА, У8, ХВГ, Х12М, Р6М5. Рассчитаны и построены кривые равных значений (номограммы) выходных параметров от времени, плотности тока на катоде и температуры электролиза; разработана методика расчета номограмм, получена графическая интерпретация рассматриваемых процессов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афанасьев А.А. Повышение качества поверхностей деталей машин. Белгород: изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2007. 235 с.
2. Пат. 163528 Российская Федерация. Спортивный конек /А.А. Афанасьев, А.В. Патрикеева; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. Заявка № 2015155565/12 от 23.12.2015 г. Опубл. 23.11.2016, Бюл. № 20. 3 с.
3. Борсяков А.С., Афанасьев А.А. Научно-практические аспекты получения многокомпонентных борсодержащих покрытий с высокими служебными свойствами. Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. 432 с.
4. Афанасьев А.А. Особенности электролитного борирования и диффузионных боридных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. №1. С.33–40.
5. Борсяков А.С., Гольденберг Б.С. Оптимизация технологических процессов получения борсодержащих диффузионных слоев // Металловедение и термическая обработка металлов. 1981. Т.1. С. 24–27.
6. Сысоев В.В. Система моделирования. Учебное пособие. Воронеж: Вор. техн. ин-т. 1991. 80 с.
7. Борсяков А.С., Беликов А.М., Рыжков Ф.Н., Гадалов В.Н. Научно-практические основы формирования диффузионных борсодержащих покрытий на металлах подгруппы железа и их сплавах: Монография. Воронеж, 2000. 366 с.
8. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2010. 384 с.
9. Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н. Методы планирование эксперимента и обработки данных: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. 131 с.
10. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 254 с.

#### Информация об авторах

**Борсяков Анатолий Сергеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры естественных дисциплин.

E-mail: borcak46@mail.ru

Воронежский государственный университета инженерных технологий.

Россия, 394036, Воронеж, пр. Революции, д. 19.

**Афанасьев Александр Александрович**, доктор технических наук, профессор заведующий кафедрой стандартизации и управления качеством.

E-mail: afanasev.aa@bstu.ru; alexaf-42@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в мае 2018 г.

© Борсяков А.С., Афанасьев А.А., 2018

A.S. Borsyakov, A.A. Afanasiev

### OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF MULTICOMPONENT BORON-CONTAINING COVERINGS ON STEELS RECEIVING

*Technological processes of receiving multicomponent boron-containing coverings are based on diffusive saturation of blanks of boron details of cars together with other alloying elements. In these processes according strength and operational characteristics of details thickness of a diffusive layer has the defining value which optimum value has been not found out yet. Key parameters from various indicators of technological processes are temperature and duration of technological parameter. Other parameters are added depending on specifics of diffusive layers method formation. The diversity of the modes diffusive saturation of blanks of details promotes the reduction of stability of their technological and operational properties. Thus,*

there is a problem of the tasks solution with multiple criteria and extrema. In this work search of optimum parameters of processes of diffusion of one or several elements in steel 40XHMA blankets is solved. The device of planning of scientific research including a method of a complete factorial experiment together with a problem of linear programming of finding of multipliers of Lagrange and a gradient method of search of optimum values according to the Pareto principle of decisions was used for this purpose. A result of the real work was finding out of the equations of regression of dependence of thickness of a diffusive (boron) layer on conditions of chemical heat treatment for a number of brands tool and structural steels.

**Keywords:** optimization of processes, factorial experiment for diffusive processes, Pareto's method, optimization of physicomachanical characteristics, optimization of operational properties, kinetics of formation of diffusive layers.

## REFERENCES

1. Afanasyev A.A. improving the quality of surfaces of machine parts: Monograph. Belgorod: publishing house BSTU, 2007, 235 p.

2. Pat. 163528 Russian Federation. Sports horse /Afanasev A. A., Patrikeev A. V.; applicant and patent holder of BSTU named after V.G. Shukhov. Application no. 2015155565/12 from 23.12.2015 G. Publ. 23.11.2016, Byul. no. 20, 3 p.

3. Borzakov A.S., Afanasiev A.A. Scientific and practical aspects of obtaining multi-component boron coatings with high service properties. Belgorod: Publishing house of BSTU, 2017, 432 p.

4. Afanas'ev A.A. the special features of electro-lyses boriding and diffusion of the boride-based coatings. Hardening technology and coatings, 2012, no. 1, pp. 33–40.

5. Borzakov A.S., Goldenberg B.S. Optimization of technological processes of producing boron

diffusion layers. Metallography and heat treatment of metals. 1981, vol. 1, pp. 24–27.

6. Sysoev V.V. Modeling System. Educational. benefit. Voronezh: Thief. Techn. in-T. 1991, 80 p.

7. Borzakov A.S., Belikov A.M., Ryzhkov F.N., Gadalov V.N. Scientific and practical bases of formation of the boron diffusion coatings on iron subgroup metals and their alloys: Monograph. Voronezh, 2000, 366 p.

8. Kralovic M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G. Plasticity of borated layers. M.: FIZMATLIT. 2010. 384 p.

9. Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N. Methods of planning experiment and data processing: studies. benefit. Samara: Samar. state tech. UN-t, 2016, 131 p.

10. Podinovski V.V., Nogin V.D. Pareto optimal solutions of multicriteria problems. Moscow: Science, 1982, 254 p.

### Information about the author

**Anatoly S. Borsyakov**, DSc, Professor.

E-mail: borcak46@mail.ru

Voronezh State University of Engineering Technology.  
Russia, 394036, Voronezh, Revolution Avenue, 19.

**Alexander A. Afanasyev**, DSc, Professor.

E-mail: afanasev.aa@bstu.ru; alexaf-42@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

*Received in May 2018*

### Для цитирования:

Борсяков А.С., Афанасьев А.А. Оптимизация технологических процессов получения многокомпонентных борсодержащих покрытий на сталях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №7. С. 116–123. DOI: 10.12737/article\_5b4f02c1da2511.30737874.

### For citation:

Borsyakov A.S., Afanasiev A.A. Optimization of technological processes of multicomponent boron-containing coverings on steels receiving. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no.7, pp. 103–115. DOI: 10.12737/article\_5b4f02c1da2511.30737874.