

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ИЗНОС АУСТЕНИТНОГО ЧУГУНА

Попов Д.А.<sup>1</sup>, Третьяков А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия (394087, Россия, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8), e-mail: qaz.7@mail.ru

---

В статье представлен химический состав сплава на основе метастабильного аустенита, на который получен патент РФ. По результатам однофакторных экспериментов авторам удалось выявить связь между основными показателями функционирования сплава. На основании этого были получены материалы двухфакторного эксперимента, в ходе которого были определены семь основных параметров: удельное давление, скорость скольжения, износ, коэффициент трения, температура, микротвердость, отношение интенсивности фаз, блочность и микронапряжения второго рода. При двухфакторном эксперименте изменялись давление в паре трения на 7 уровнях и скорость скольжения на 4 уровнях. Всего было проведено 28 экспериментов с варьированием параметров. Установлено, что рост удельного давления вызывает большее влияние на износ, чем скорость скольжения, причем при давлении и скорости скольжения 1,25 МПа и 0,7 м/с соответственно износ увеличивается.

---

Ключевые слова: износ, аустенитный чугун, давление, скорость скольжения, трение

## STUDY OF THE MAIN FACTORS OF USE WEAR AUSTENITIC IRON

Popov D.A.<sup>1</sup>, Tretyakov A.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>VPO "Voronezh State Forestry University G.F. Morozova", Voronezh, Russia (394087, Russia, Voronezh, Timiryazev str., 8), e-mail: qaz.7@mail.ru

---

The article contains a chemical composition of the alloy on the basis of the metastable austenite to which the patent of the Russian Federation. According to the results of single-factor experiments, the authors were able to identify the relationship between the main indicators of the alloy. From this material were obtained two-factor experiment, in which identified seven main parameters: the surface pressure, sliding speed, wear, friction, temperature, the microhardness intensity ratio phases, blocking and microstresses second kind. Two-factor experiment, the pressure changes in the friction pair of 7 levels and the sliding velocity on 4 levels. A total of 28 experiments with varying parameters. The growth of the specific pressure causes a greater impact on wear than slip velocity, and at a pressure and sliding velocity of 1,25 MPa and 0,7 m/s, respectively, the wear increases.

---

Keywords: wear, austenitic iron, pressure, sliding velocity, friction

На основе многолетних исследований аустенитного марганцовистого чугуна [1, 2, 3], предназначенного для деталей машин испытывающих интенсивный износ при работе был разработан сплав (износостойкий чугун), на который получен патент РФ № 2540008 [4]. Сплав содержит, мас. %: углерод 2,7; кремний 2,5; марганец 9,7; хром 3,8; алюминий 4,7; ванадий 1,7; железо – остальное. Сплав может быть рекомендован для производства тормозных шкивов ПТМ, тормозных колодок железнодорожного транспорта, седел клапанов ДВС.

Проведенные однофакторные эксперименты сплава на основе метастабильного аустенита позволили установить характер изменения физико-механических параметров от удельных давлений и скоростей скольжения. Анализируя графические зависимости можно утверждать, что они имеют хорошо выраженную связь между собой на всем диапазоне варьирования факторов. Это позволяет спланировать и провести двухфакторный эксперимент, который позволит выявить степень влияния давления и скорости скольжения на исследуемые пара-

метры, определить математическую модель изнашивания аустенитного чугуна, а также определить благоприятные области факторного пространства, соответствующие областям оптимальных режимов эксплуатации деталей из экспериментального чугуна.

В процессе исследований были определены семь основных параметров ( $I$ ,  $k_{тр}$ ,  $T$ ,  $H_{\mu}$ ,  $J_{\alpha}/J_{\gamma}$ ,  $D$  и  $E$ ) в зависимости от нагрузочно-скоростных факторов ( $v$ ,  $p$ ), в результате этого были определены уравнения регрессии типа ( $f_i = f_i(p, v)$ ), доверительный интервал – 5 %. Где,  $p$  – удельное давление, МПа;  $v$  – скорость скольжения, м/с;  $I$  – износ, мг;  $k$  – коэффициент трения;  $t$  – температура, °С;  $H_{\mu}$  – микротвердость, МПа,  $J_{\alpha}/J_{\gamma}$  – отношение интенсивностей фаз (мартенсита к аустениту);  $D$  – блочность,  $10^{-5}$ м;  $E$  – микронапряжения второго рода.

Кроме того, полученный объем экспериментальных данных позволяет анализировать не только зависимости вида  $f_i(v, p)$ , но также и функций  $f_i$  друг от друга, то есть неявные зависимости. В частности, после некоторой обработки экспериментальных данных, можно получить зависимости вида  $f_1(f_2, f_3)$  или  $f_1(f_2, f_3, f_4)$ , где в качестве функций  $f_i$  выступают описанные выше связи  $I(v, p)$ ,  $k_{тр}(v, p)$ ,  $t(v, p)$ ,  $H_{\mu}(v, p)$ ,  $J_{\alpha}/J_{\gamma}(v, p)$ ,  $D(v, p)$ ,  $E(v, p)$ . В рамках данной работы получим уравнения типа  $I(H_{\mu}, T)$  и  $H_{\mu}(E, J_{\alpha}/J_{\gamma})$ , связывающие износ с микротвердостью материала и фрикционным нагревом, а также более информативные тройные связи  $I(H_{\mu}, k, t)$  и  $H_{\mu}(D, E, J_{\alpha}/J_{\gamma})$ .

В ходе двухфакторного эксперимента варьировались два независимых параметра: скорость скольжения ( $v$ ) на 4 уровнях и давление в зоне контакта на 7 уровнях. В процессе каждого из 28-ми экспериментов, соответствующих точкам ( $v, p$ ), производилось измерение семи параметров:  $I$ ,  $k_{тр}$ ,  $t$ ,  $H_{\mu}$ ,  $J_{\alpha}/J_{\gamma}$ ,  $D$  и  $E$ .

На основе экспериментальных данных получим аналитические зависимости  $I(v, p)$ ,  $k_{тр}(v, p)$ ,  $t(v, p)$ ,  $H_{\mu}(v, p)$ ,  $J_{\alpha}/J_{\gamma}(v, p)$ ,  $D(v, p)$ ,  $E(v, p)$ . Математические выражения позволяют представить в компактной форме экспериментальную информацию, проанализировать влияние каждого из факторов эксплуатации ( $v$  и  $p$ ), а также решить более сложные задачи, например, исследовать зависимость одних функций от других.

Предварительный анализ экспериментальных данных показал, что уравнение регрессии для каждой из функций наиболее целесообразно искать в виде полинома второго порядка:

$$y(p, v) = b_0 + b_v v + b_p p + b_{vp} vp + b_{vv} v^2 + b_{pp} p^2, \quad (1)$$

где  $y$  – аппроксимируемая функция ( $I$ ,  $k_{тр}$ ,  $T$ ,  $H_{\mu}$ ,  $J_{\alpha}/J_{\gamma}$ ,  $D$  или  $E$ );  $b_n$  – искомые коэффициенты;  $v$  и  $p$  – факторы.

Расчет коэффициентов уравнения регрессии и проверка их значимости проведены по

методике, описанной в [5].

Для расчета коэффициентов  $b_n$  используем метод наименьших квадратов. В данном случае необходимо минимизировать сумму  $\sigma$  квадратов отклонений экспериментальных значений  $y_i$  от рассчитанных по (1) значений  $y(v_i, p_i)$ :

$$\begin{aligned} \sigma(b_0, b_v, b_p, b_{vp}, b_{vv}, b_{pp}) &= \sum_{i=1}^N (y(v_i, p_i) - y_i)^2 = \\ &= \sum_{i=1}^N (b_0 + b_v v_i + b_p p_i + b_{vp} v_i p_i + b_{vv} v_i^2 + b_{pp} p_i^2 - y_i)^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $N$  – количество экспериментов по определению значения функции  $y_i$  при различных наборах факторов  $(v_i, p_i)$ .

Минимум функции  $\sigma(b_n)$  будет достигаться при выполнении необходимого условия экстремума функции нескольких переменных. Оно заключается в равенстве нулю частных производных от (2) по каждому из коэффициентов  $b_n$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma}{\partial b_0} = \sum_{i=1}^N 2(b_0 + b_v v_i + b_p p_i + b_{vp} v_i p_i + b_{vv} v_i^2 + b_{pp} p_i^2 - y_i) = 0; \\ \frac{\partial \sigma}{\partial b_v} = \sum_{i=1}^N 2(b_0 + b_v v_i + b_p p_i + b_{vp} v_i p_i + b_{vv} v_i^2 + b_{pp} p_i^2 - y_i) v_i = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial \sigma}{\partial b_{pp}} = \sum_{i=1}^N 2(b_0 + b_v v_i + b_p p_i + b_{vp} v_i p_i + b_{vv} v_i^2 + b_{pp} p_i^2 - y_i) p_i^2 = 0. \end{cases}$$

После некоторых преобразований получаем следующую систему из шести линейных уравнений для определения коэффициентов  $b_0, b_v, b_p, b_{vp}, b_{vv}$  и  $b_{pp}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} b_0 N + b_v \sum_{i=1}^N v_i + b_p \sum_{i=1}^N p_i + b_{vp} \sum_{i=1}^N v_i p_i + b_{vv} \sum_{i=1}^N v_i^2 + b_{pp} \sum_{i=1}^N p_i^2 = \sum_{i=1}^N y_i; \\ b_0 \sum_{i=1}^N v_i + b_v \sum_{i=1}^N v_i^2 + b_p \sum_{i=1}^N v_i p_i + b_{vp} \sum_{i=1}^N v_i^2 p_i + b_{vv} \sum_{i=1}^N v_i^3 + b_{pp} \sum_{i=1}^N v_i p_i^2 = \sum_{i=1}^N y_i v_i; \\ b_0 \sum_{i=1}^N p_i + b_v \sum_{i=1}^N v_i p_i + b_p \sum_{i=1}^N p_i^2 + b_{vp} \sum_{i=1}^N v_i p_i^2 + b_{vv} \sum_{i=1}^N v_i^2 p_i + b_{pp} \sum_{i=1}^N p_i^3 = \sum_{i=1}^N y_i p_i; \\ b_0 \sum_{i=1}^N v_i p_i + b_v \sum_{i=1}^N v_i^2 p_i + b_p \sum_{i=1}^N v_i p_i^2 + b_{vp} \sum_{i=1}^N v_i^2 p_i^2 + b_{vv} \sum_{i=1}^N v_i^3 p_i + b_{pp} \sum_{i=1}^N v_i p_i^3 = \sum_{i=1}^N y_i v_i p_i; \\ b_0 \sum_{i=1}^N v_i^2 + b_v \sum_{i=1}^N v_i^3 + b_p \sum_{i=1}^N v_i^2 p_i + b_{vp} \sum_{i=1}^N v_i^3 p_i + b_{vv} \sum_{i=1}^N v_i^4 + b_{pp} \sum_{i=1}^N v_i^2 p_i^2 = \sum_{i=1}^N y_i v_i^2; \\ b_0 \sum_{i=1}^N p_i^2 + b_v \sum_{i=1}^N v_i p_i^2 + b_p \sum_{i=1}^N p_i^3 + b_{vp} \sum_{i=1}^N v_i p_i^3 + b_{vv} \sum_{i=1}^N v_i^2 p_i^2 + b_{pp} \sum_{i=1}^N p_i^4 = \sum_{i=1}^N y_i p_i^2. \end{array} \right. \quad (3)$$

Для каждой из функций  $y$  данную систему решали в математическом пакете MathCAD 8. Далее приведены уравнения регрессии для каждой из функций.

Как известно, коэффициент регрессии  $b_n$  является статистически значимым, если его абсолютная величина больше доверительного интервала  $\Delta b_n$  или равна ему [5], т.е.

$$|b_n| \geq \Delta b_n. \quad (4)$$

Величина доверительного интервала определяется с помощью критерия Стьюдента следующим образом:

$$\Delta b_n = t_{\alpha, f} \cdot S_{b_n}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – уровень значимости;  $f = N - k$  – число степеней свободы;  $k$  – число оставленных коэффициентов  $b_n$ ;  $S_{b_n}$  – дисперсия коэффициента  $b_n$ .

Для расчета дисперсий  $S_{b_n}$  предварительно вычисляется дисперсия неадекватности модели

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y(v_i, p_i) - y_i)^2}{N - 1}. \quad (6)$$

Затем дисперсии коэффициентов регрессии  $S_{b_n}$  определяем по формулам

$$\begin{aligned}
S_{b_0}^2 &= S_y^2; \\
S_{b_v}^2 &= S_y^2 / \sum_{i=1}^N v_i^2; \quad S_{b_p}^2 = S_y^2 / \sum_{i=1}^N p_i^2; \\
S_{b_{vp}}^2 &= S_y^2 / \sum_{i=1}^N v_i^2 p_i^2; \\
S_{b_v}^2 &= S_y^2 / \sum_{i=1}^N v_i^4; \quad S_{b_p}^2 = S_y^2 / \sum_{i=1}^N p_i^4.
\end{aligned} \tag{7}$$

Статистически незначимые коэффициенты  $b_n$  можно исключить из модели. При этом требуется полный пересчет оставшихся коэффициентов по упрощенной системе (3), а также пересчет дисперсий  $S_{b_n}$  по формулам (7) и доверительных интервалов  $\Delta b_n$  по формуле (5).

При аппроксимации функций  $I$ ,  $k_{тр}$ ,  $t$ ,  $H_\mu$ ,  $J_\alpha/J_\gamma$ ,  $D$  и  $E$  некоторые коэффициенты  $b_n$  оказались незначимыми. В таблице 1 приведена информация о значимости коэффициентов для всех функций.

Таблица 1

Значимость коэффициентов в уравнениях регрессии

Функция	Значимость коэффициентов $b_n$					
	$k_0$	$k_v$	$k_p$	$k_{vp}$	$k_{vv}$	$k_{pp}$
$I$	0,04	10,27	19,49	28,86	10,61	50,39
$k_{тр}$	28,46	51,55	79,56	12,92	15,63	65,05
$t$	1,52	21,66	34,79	18,47	10,97	15,26
$H_\mu$	12,02	3,64	4,43	51,58	2,65	35,50
$J_\alpha/J_\gamma$	0,79	1,22	58,01	3,63	1,14	35,18
$D$	9,87	8,49	33,19	7,34	1,95	21,90
$E$	0,39	7,63	54,40	7,34	0,40	37,03

При этом значимость  $k_n$  рассчитывается по формуле:

$$k_n = \frac{|b_n|}{\Delta b_n}. \tag{8}$$

Чем больше  $k_n$ , тем более достоверным является коэффициент  $b_n$ . Для статистически незначимых коэффициентов  $k_n < 1$ . В таблице 1 серым цветом выделены ячейки соответствующие статистически незначимым коэффициентам. Таким образом, для функций  $I(v, p)$ ,  $J_\alpha/J_\gamma(v, p)$  и  $E(v, p)$  потребовалось исключение некоторых коэффициентов из уравнения регрессии и повторный пересчет по формулам метода наименьших квадратов.

В результате было изучено влияние удельных давлений и скоростей скольжения на износ. Первоначально аппроксимация позволила получить следующее уравнение регрессии:

$$I = 0,276 + 15,836v - 1,657p + 3,03vp - 14,457v^2 + 0,208p^2$$

Проверка коэффициентов полинома на статистическую значимость показала, что коэффициент  $b_0 = 0,276$  является незначимым, поэтому он был исключен из уравнения регрессии. Затем был произведен пересчет коэффициентов уравнение аппроксимирующее выражение для  $I(v, p)$  приняло вид:

$$I = 16,295v - 1,636p + 3,022vp - 14,666v^2 + 0,207p^2$$

Как видно из рисунка 1, рост удельного давления вызывает большее влияние на износ, чем скорость скольжения.

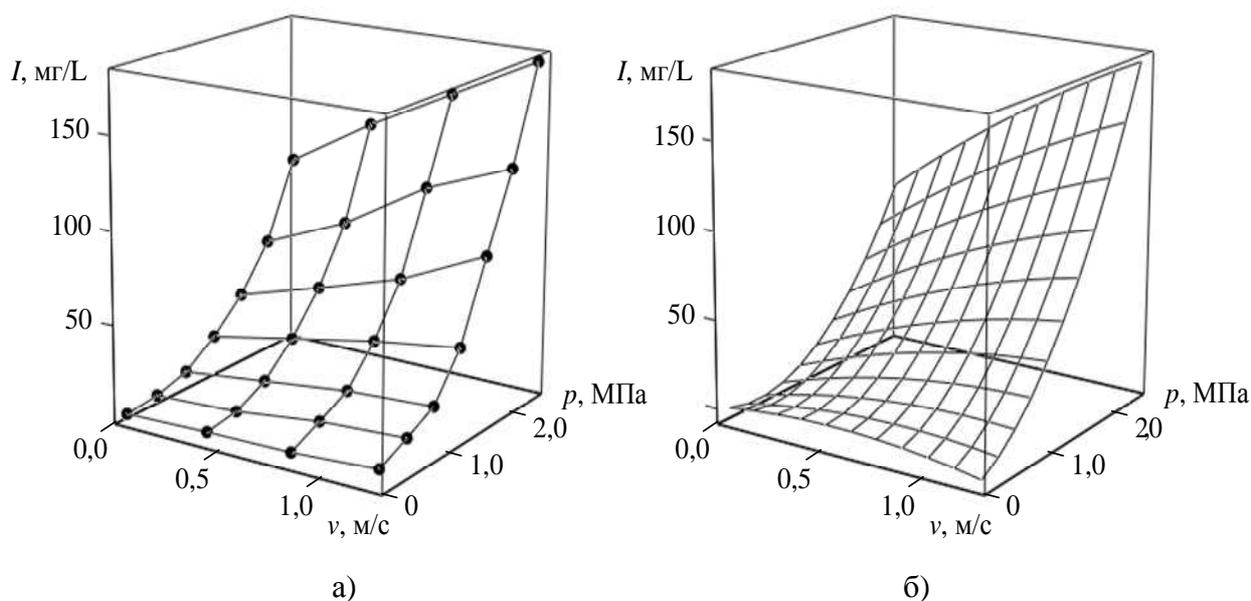


Рис. 1. Экспериментальная зависимость (а) износа  $I(v, p)$  от эксплуатационных факторов и ее аппроксимирующая поверхность (б)

При этом интенсивность изнашивания не одинакова на всем диапазоне изменения факторов, а именно на интервале 0,25 ... 1,25 МПа и 0,2 ... 0,7 м/с наблюдалось незначительное приращение износа, поверхность имеет пологий характер подъема. Свыше этих значений поверхность имеет крутой подъем, свидетельствующий об интенсификации процесса изнашивания. По всей вероятности, это связано с существенным возрастанием температуры на поверхности трения, которая препятствует фазовому и механическому упрочнению и смягчает металл.

Таким образом, в результате проведенных исследований удалось установить влияние основных эксплуатационных факторов на износ разрабатываемого аустенитного чугуна.

### Список литературы

1. Станчев, Д.И. Перспективы применения специального аустенитного марганцовистого чугуна для деталей фрикционных узлов лесных машин / Д.И. Станчев, Д.А. Попов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы международной научно-технической конференции ВГТУ. – Вологда, 2007. – С. 109-111.
2. Попов, Д.А. Разработка сплава с повышенными механическими свойствами для газомоторных двигателей / Попов Д.А., Третьяков А.И., Попов Р.В. // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования. В 2 т. Т. 2. Сб. науч. трудов по материалам Международной науч.-практ. конф. – Воронеж, 2014. – С. 345-347.
3. Станчев, Д.И. Особенности методики изнашивания аустенитных марганцовистых чугунов при сухом трении / Д. И. Станчев, Д. А. Попов // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве эксплуатации, сервисе и ремонте: ГОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2010. – С. 117-120.
4. Пат. 2540008 РФ, МПК С22С 37/10. Износостойкий чугун / Попов Д.А., Поляков И.Е., Третьяков А.И. (РФ). – № 2014107382/02; заявл. 26.02.2014; опубл. 27.01.2015, Бюл. № 3. – 5 с.
5. Курзина, В.М. Методы оптимизации / В.М. Курзина, А.В. Трегуб. – М.: МГУЛ, 2003. – 48 с.

### Рецензенты:

Астанин В.К., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технического сервиса и технологии машиностроения», ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж;

Сухолев Г.А., д.т.н., профессор кафедры «Технологии машиностроения», ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж.