

УДК 621.74:658.56

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ
КАЧЕСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ НЕПРЕРЫВНО ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ
ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ**

©Хорошилов О. Н., Мельниченко А. А., Сегал Л. Л.

*Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про авторів:**

Хорошилов Олег Миколайович: ORCID: 0000-0003-2048-6311; horol@i.ua; доктор технічних наук; професор кафедри металоріжучого обладання і транспортних систем; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Мельниченко Олександр Анатолійович: ORCID: 0000-0003-0648-2218; podoliak15os@gmail.com; доктор технічних наук; професор кафедри металоріжучого обладання і транспортних систем; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Сегал Лев Леонідович: ORCID: 0000-0003-3134-4220; segal_lev@gmail.com; аспірант кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Приведены результаты моделирования для установления связей между механическими свойствами заготовок и технологическими параметрами процесса непрерывного литья. Моделирование осуществлялось при помощи принципа наименьших квадратов. Установлено, что на механические свойства заготовок наиболее существенное влияние оказывает сочетание частоты движения заготовок с реверсивным движением заготовки во время преодоления силы трения покоя. Это позволяет осуществить выбор технологических параметров процесса непрерывного литья для рационального повышения механических свойств заготовок из медных сплавов

Ключевые слова: медные сплавы; моделирование; механические свойства заготовок.

Хорошилов О. М., Мельниченко О. А., Сегал Л. Л. «Обробка результатів вимірювань якості зразків з безперервно литих заготовок деталей підйомно-транспортного машинобудування».

Наведено результати моделювання для встановлення зв'язків між механічними властивостями заготовок і технологічними параметрами процесу безперервного лиття. Моделювання здійснювалося за допомогою принципу найменших квадратів. Встановлено, що на механічні властивості заготовок найбільш істотно впливає поєднання частоти руху заготовок з реверсивним рухом заготовки під час подолання сили тертя спокою. Це дозволяє здійснити вибір технологічних параметрів процесу безперервного лиття для раціонального підвищення механічних властивостей заготовок з мідних сплавів

Ключові слова: мідні сплави; моделювання; механічні властивості заготовок.

Khoroshilov O., Melnichenko A., Segal L. “The manufacturing of the results of measuring of forms quality from continuous casting of blanks of details of carrying and lifting machinebuilding”.

The results of modeling for establishing the relationships between the mechanical properties of blanks and the technological parameters of the continuous casting process are presented. The simulation

Піднімально-транспортні машини

was carried out using the principle of least squares. It has been established that the most important effect on the mechanical properties of blanks is due to the combination of the frequency of movement of workpieces with the reversible movement of the workpiece during the overcoming of the friction force of rest. This makes it possible to select the technological parameters of the continuous casting process for rationally increasing the mechanical properties of blanks from copper alloys.

Key words: copper alloys; modeling; mechanical properties of blanks.

1. Вводная часть (актуальность, цель, задачи)

В настоящее время в подъемно транспортном машиностроении (ПТМ) используются детали из медных сплавов. Ежегодно повышаются требования к механическим свойствам непрерывно литых заготовок из медных сплавов.

Заготовки для ПТМ целесообразно производить на машинах непрерывного литья по следующим причинам:

- во-первых, процесс непрерывного литья имеет максимальную производительность в сравнении с любым другим литейным процессом;
- во-вторых, непрерывно-литая заготовка имеет размеры, которые максимально приближены к размерам детали ПТМ;
- в-третьих, за счет усовершенствования технологического процесса непрерывного литья были получены заготовки, у которых наблюдался рост показателей механических свойств (временное сопротивление разрыву, относительное удлинение и твердость) [1].

Поскольку процесс непрерывного литья позволяет повысить качество заготовок, а так же повысить производительность машины непрерывного литья, то это подтверждает актуальность работы.

Одной из задач в данной работе является определение истинных показателей временного сопротивления разрыву, поскольку характеристики механических испытаний являются среднестатистическими величинами, дающими суммарную, математически наиболее вероятную характеристику всего объема образца, который принимает участие в исследовании.

Для определения истинных показателей механических свойств и создание математической модели необходимо произвести статистическую обработку результатов испытаний образцов. Задача статистической обработки результатов – оценка среднего значения свойств и ошибки в определении этого среднего, а также выбор минимально необходимого числа испытаний для оценки среднего значения с заданной точностью (ДСТУ ГОСТ 8.207:2008 ГСИ).

Это позволит определить при непрерывном литье рациональные технологические параметры, которые позволят получать заготовки с заданными механическими свойствами.

При выборе модели ограничимся только такими, которые описываются соотношениями между конечномерными векторами. Например, выберем модель, у которой случайная величина Y зависит от переменных. В этом случае для изучения связи между переменными используют принцип наименьших квадратов, позволяющий установить зависимость между случайной величиной Y и n переменными x .

На стадии исследования были установлены цели исследований, вид модели, определены контрольные точки и составлен проект решения задачи.

Целью статьи является построение статистической математической модели для определения влияния на механические свойства заготовки из бронзы марки Бр.05Ц5С5 (временного сопротивления на разрыв) таких технологических параметров непрерывного литья и факторов воздействующих на заготовку как: напряжения в заготовке во время преодоления силы трения покоя и силы трения скольжения $x_1 = \sigma$ и частоты движения заготовки в кристаллизаторе $x_2 = f_{дв}$.

Вид используемого анализа: Множественная нелинейная регрессия.

Задачи обработки экспериментальных данных:

1. Выявить зависимость между прочностью бронзы марки Бр.05Ц5С5 и усилием преодоления силы трения покоя и частоты движения заготовки.
2. Отобрать независимые переменные.
3. Построить уравнение нелинейной регрессии, объясняющее более 95 % вариации.
4. Найти ошибку эксперимента.
5. Показать, что построенная модель имеет воспроизводство эксперимента с надёжностью не менее 95 %.
6. Определить значимость оцениваемых коэффициентов модели с ошибкой в 5 %.
7. Показать, что при уровне значимости 0,05 модель адекватна экспериментальным данным и наоборот.

2. Основная часть (решение поставленных задач)

Выбор модели сводится к определению переменных, от которых зависит интересующая нас случайная величина Y , и конечного числа переменных, которых следует включать в состав уравнения.

При решении задач оценивания статистических характеристик не возникает вопрос о порядке взятия выборок. Однако, если осуществлять взятие выборок по определённому плану, то предоставляется возможность оценить количественно многофакторную статистическую зависимость при ограниченном объёме выборок. Подобный подход для оценивания статистических зависимостей существует в теории планирования эксперимента [1, 2]. Планирование эксперимента позволяет найти зависимость некоторой величины от множества переменных факторов x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ в виде полиномиальной модели:

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (1)$$

где b_0 , b_i , b_{ij} – соответственно коэффициенты регрессии при нулевом ($x_0 = 1$), линейном, квадратичном и т.д. переменных параметрах x_i ; b_{ij} – коэффициент регрессии, показывающий парное влияние переменных x_i и x_j на \tilde{y} .

Для решения поставленной задачи нахождения модели прочности бронзы марки Бр.05Ц5С5 нужно точно установить как отклик – прочность, так и предсказывающие факторы. Были определены предполагаемые факторы, влияющие на отклик. Список состоит из двух переменных – это x_1 – усилие преодоления силы трения покоя, как в положительном,

Піднімально-транспортні машини

так и в отрицательном направлении (поступательное и реверсивное движение заготовки во время преодоления силы трения покоя) и x_2 – частота движения заготовки. При этом была достигнута постановка конкретной задачи с конкретными откликами, которые будут исследоваться в связи с конкретным множеством потенциальных независимых переменных.

По проведенным предварительно графическим исследованиям было установлено, что модель прочности бронзы марки Бр.05Ц5С5 должна иметь вид многочлена второго порядка:

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2. \quad (2)$$

Основная проблема заключалась в том, что имея одну точку (x_1, x_2) но разные направления движения заготовки во время преодоления силы трения покоя мы имеем разную прочность бронзы марки Бр.05Ц5С5 и при $x_1 = 0$ или $x_2 = 0$ процесс изготовления изделия отсутствует. Если направление усилия мы сможем определить через знак величины x_1 , то использовать точки с координатами, $x_1 = 0$ и $x_2 = 0$ мы не можем за счёт того, что такой эксперимент практически невозможен. Поэтому применить известные композиционные планы из теории планирования эксперимента [3, 4], которые содержат точки с координатами, $x_1 = 0$ и $x_2 = 0$ мы не можем. В системе MAPLE [5] создана подпрограмма с использованием двухмерных ортогональных многочленов, позволяющая по результатам любых восьми точек записать уравнение не линейной регрессии в виде:

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{i=1}^2 b_i x_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1, i \neq j}^2 b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^2 b_{ii} x_i^2. \quad (3)$$

Поэтому для решения данной задачи проведём полный факторный эксперимент по плану типа 2^3 с шестью параллельными опытами, т.е. каждому условию (строчке плана) соответствует шесть экспериментов и шесть их результатов (табл. 1). Значения параллельных опытов усредняются:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{ij}, \quad (4)$$

где m – число параллельных опытов и дисперсия эксперимента в каждой точке факторного пространства определяется выражением:

$$\sigma_i^2(y) = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2, \quad (5)$$

где для нашего случая число экспериментов $m = 6$.

Составленная программа в системе MAPLE позволила не только построить модель (1), но и найти \bar{y}_i , σ_i^2 и ряд других числовых характеристик необходимых для решения поставленной задачи.

Данная модель имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{y} = & 218,7154367 - 1,108783857x_1 + 0,8793075659x_2 - \\ & - 0,5337108077x_1^2 - 0,05066586389x_2^2 - 0,8095238095x_1x_2 \end{aligned} \quad (6)$$

Піднімально-транспортні машини**Таблица 1** – Значения временного сопротивления разрыву для шести различных соотношений частоты движения заготовки в кристаллизаторе и напряжений в заготовке

Точка	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	\bar{y}_i	$\sigma_i^2(y)$
(-2,1; 2,5)	224,5	225,1	224,7	224,3	222,9	223,9	224,233	0,5867
(2,1; 2,5)	212,2	210,6	211,6	210,1	212,8	212,6	211,65	1,2070
(-2,1; 7,5)	235,3	236,1	233,2	236,3	235,1	235,2	235,2	1,2080
(2,1; 7,5)	295,2	206,0	206,8	205,4	205,6	204,7	205,617	0,5217
(-0,5; 2,5)	221,6	222,1	222,6	224,2	223,3	222,0	222,633	0,9307
(0,5; 7,5)	217,5	218,9	217,5	217,2	219,7	218,1	218,133	0,9467
(2,1; 5)	209,0	207,4	207,8	209,2	206,5	209,5	208,233	1,4027
(-2,1; 5)	230,4	231,2	230,2	231,2	231,0	230,5	230,75	0,1910

Модель (2) в трёхмерном пространстве имеет вид:

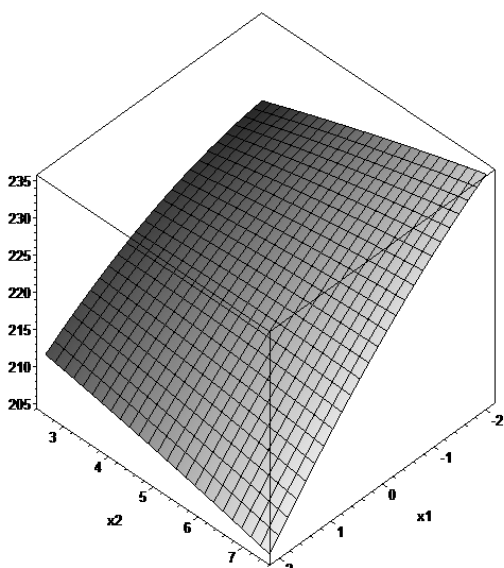


Рис. 1 – Трёхмерная модель прочности заготовки для деталей ПТМ в зависимости от частоты ее движения и величины напряжения для модели (2)

Проверку воспроизводимости эксперимента в различных точках факторного пространства проводим с помощью критерия Кокрена [6, 7]. Воспроизводимость оценивается проверкой однородности дисперсий, вычисленных в точках эксперимента.

Для того чтобы, при заданном уровне значимости α , проверить гипотезу об однородности дисперсий нормально распределённых совокупностей, надо вычислить наблюдаемое значение критерия:

$$G_{\text{наб}} = \frac{\sigma^2_{\text{max}}(y)}{\sum_{i=1}^N \sigma^2_i(y)}, \quad (7)$$

где N – число точек экспериментов и по таблице критических точек распределения Кокрена найти критические точки $G_{\text{кр}} = (\alpha; m - 1; N)$.

Если $G_{\text{наб}} < G_{\text{кр}}$ – нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу об однородности дисперсий.

Если $G_{\text{наб}} > G_{\text{кр}}$ – нулевую гипотезу отвергаем.

Проведенные вычисления при уровне значимости $\alpha = 0,05$ дали следующий результат $G_{\text{наб}} = 0,0831$, а значение, найденное по таблице, приведенной в работе [5], составляет $G_{\text{наб}} = 0,1493$. Отсюда нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу, т. е. полученная модель воспроизводима.

Вычисленная ошибка эксперимента с учётом однородности дисперсии определяется по формуле:

$$G^2_{\text{ош}}(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma^2_i(y). \quad (8)$$

Піднімально-транспортні машини

В нашем случае значение $\sigma^2_{ош}(y) = 0,869556$.

Осуществляя проверку значимости коэффициентов модели (2), т.е. проверяя гипотезу $b_i = 0$, относительно конкурирующей $b_i \neq 0$ с помощью t -критерия Стьюдента [6, 7] были найдена дисперсия оценки b_i :

$$\sigma^2\{b_i\} = \frac{1}{N} \sigma^2_{iо}(y) = 0,874293 \quad (9)$$

и стандартное отклонение оценки b_i

$$\sigma\{b_i\} = \sqrt{\sigma^2\{b_i\}}. \quad (10)$$

Известно [2, 6], что если $|b_i| \leq \sigma\{b_i\}t_\alpha$, то b_i считается незначимым при уровне значимости α и числе степеней свободы $N(m-1)$ и исключается из модели и наоборот. Нами было получено при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и найденном $t_\alpha = 2,02$ из таблицы [5], что $\sigma\{b_i\}t_\alpha = 0,6677822583$.

Отсюда следует, что в модели (2) можно исключить коэффициенты при x_1^2 и x_2^2 , и получить следующую модель:

$$\bar{y} = 218,7154367 - 1,108783857x_1 + 0,8793075659x_2 - 0,8095238095x_1x_2. \quad (11)$$

Геометрически данная модель имеет вид, представленный на рисунке 2.

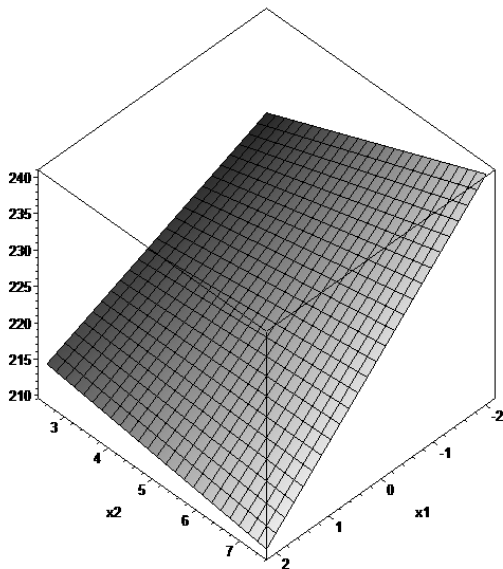


Рис. 2 – Трехмерная модель прочности заготовки для деталей ПТМ в зависимости от частоты ее движения и величины напряжения для модели (3)

степенях свободы $k_1 = N - d$ и $k_2 = N(m - 1)$, то модель адекватна экспериментальным данным и наоборот.

Были вычислены $F_{эк} = 1,024214825$ для модели (2), а для модели (3) $F_{эк} = 30,17408992$. Из таблицы критических точек распределения Фишера-Снедекора [7, 8] для модели (2) было найдено $F_\alpha = 3,2317$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $k_1 = 2$ и $k_2 = 40$.

Проверим на адекватность модели (2) и (3), т.е. оценим степень отклонения \bar{y} вычисленного по модели от \bar{y}_i , найденного в результате проведенных экспериментов. Для этого вычислили остаточную дисперсию:

$$\sigma^2_{ост} = \frac{1}{N - d} \sum_{i=1}^N (\bar{y} - \bar{y}_i)^2, \quad (12)$$

где d – число оцениваемых параметров.

Для модели (3) $\sigma^2_{ост} = 26,3809956$, а для модели (2) $\sigma^2_{ост} = 0,8954638516$.

Оценку адекватности осуществляем с помощью критерия Фишера [6, 7]:

$$F_{эк} = \frac{\sigma^2_{ост}}{\sigma^2_{ош}} > 1. \quad (13)$$

Если $F_{эк} < F_\alpha$ при уровне значимости α и

Піднімально-транспортні машини

Для модели (3) найдено, что $F_{\alpha} = 2,6060$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $k_1 = 4$ и $k_2 = 40$. Отсюда следует, что модель (2) дала положительный результат, т. е. построена адекватная модель, описывающая исследуемое явление. Для модели (3) нельзя сказать, что она адекватна при заданном уровне значимости, так как $30,17408992 > 2,6060$. Это следует из того, что коэффициенты при x_1^2 и x_2^2 имеют знак минус и величины по абсолютной величине намного больше единицы в области интереса, а значит, функция значительно увеличивается и полученная прочность в точках эксперимента значительно отличается от экспериментальной.

Выводы (результаты и направление дальнейших исследований)

1. По ограниченной информации построена адекватная математическая модель, которая позволяет для конкретной марки сплава выбрать технологические параметры процесса непрерывного литья (усилие и направление движения заготовки во время преодоления силы трения покоя, а так же частоту движения заготовки в кристаллизаторе), которые позволят получить непрерывно литые заготовки с заданными свойствами.

2. Для углубления полученных результатов целесообразно провести дальнейшие статистические исследования по данной тематике с целью разграничения механических свойств бронзовых заготовок различных марок, у которых средневзвешенные значения прочности (временного сопротивления разрыву) отличающиеся друг от друга не более чем 20 %.

Список использованных источников:

1. Хорошилов О. Н. Процесс горизонтального непрерывного литья медных сплавов с вынужденным кратковременным реверсивным движением заготовок в неподвижном кристаллизаторе : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.16.04 / О. Н. Хорошилов ; Нац. металлург. акад. Украины. – Днепропетровск, 2013. – 35 с.
2. Сидняев Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных : учеб. пособие / Н. И. Сидняев. – Москва : Юрайт, 2012. – 400 с.
3. ДСТУ ГОСТ 8.207:2008 ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. – Введ. в дію 01.10.2008 ...
4. Власов К. П. Методы исследований и организация экспериментов / К. П. Власов, П. К. Власов, А. А. Киселева. – Х. : Гуманит. Центр, 2013. – 412 с.
5. Дьяконов В. П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах / В. П. Дьяконов. – М. : Изд-во «ДМК Пресс», 2014. – 800 с.
6. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – Киев : Техніка, 1975. – 168 с.
7. Волосухин В. А. Планирование научного эксперимента / В. А. Волосухин, А. И. Тищенко. – М. : РИОР, Инфра-М, 2014. – 176 с.
8. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – Киев : Вища шк., 1976. – 184 с.

References

1. Khoroshilov, O 2013, 'Protsess gorizontalnogo nepreryvnogo litya mednykh splavov s vynuždennym kratkovremennym reversivnym dvizheniem zagotok v nepodvizhnom kristallizatore' Doct.tekh.n. abstract, Natsionalnaya metallurgicheskaya akademiya Ukrainy, Dnepropetrovsk.
2. Sidnyaev, N 2012, *Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh*, Yurayt, Moskva.
3. Derzhstandart Ukrainy 2008, *Pryamyie izmereniya s mnogokratnymi nablyudenyami. Metody obrabotki rezul'tatov nablyudeniya*, DSTU GOST 8.207:2008 GSI, Derzhstandart Ukrainy, Kyiv.
4. Vlasov, K & Kiseleva, A 2013, *Metody issledovaniy i organizatsiya eksperimentov*, Gumanitarnyy tsentr, Krakiv.
5. Dyakonov, V 2014, *Maple 10/11/12/13/14 v matematicheskikh raschetakh*, Izdatelstvo "DMK Press", Moskva.
6. Vinarskiy, M & Lurye, M 1975, *Planirovaniye eksperimenta v tekhnologicheskikh issledovaniyakh*, Tekhnika, Kyiv.
7. Volosukhin, V & Tishchenko, A 2014, *Planirovaniye nauchnogo eksperimenta*, RIOR, Infra-M, Moskva.
8. Bondar, A & Statyukha, G 1976, *Planirovaniye eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii*, Vishcha shkola, Kyiv.

Стаття надійшла до редакції 24 березня 2017 р.