

УДК 621.74.658.56

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ВІЗМЕРЕНЬ
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 Михайлович: ORCID: 0000-0003-2048-6311; bono@i.ua; доцент технічних наук, професор кафедри металургічного обладнання і транспортних систем, Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Мельниченко Олександр Анатолійович: ORCID: 0000-0003-0648-2218; podoluk150@gmail.com; доцент технічних наук, професор кафедри металургічного обладнання і транспортних систем, Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Сегал Лев Ізраїльович: ORCID: 0000-0003-3134-4220; segal_lv@gmail.com; аспірант кафедри економіки 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. Н, Мельниченко А. А., Сегал Л. Л. «Обработка результатов измерений качества образцов из непрерывно литых заготовок деталей подъемно-транспортного машиностроения».

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

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 теми, которые описываются соотношениями между конечномерными векторами. Например, выберем модель, у которой случайная величина Y зависит от переменных x . 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 $x_2 = f_{\text{дв}}$.

Вид исходного 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 надежностью 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 включить в состав уравнения.

При решении задач оценивания статистических характеристик не возникает вопрос о порядке взятия выборок. Однако, если осуществлять взятие выборок по определенному плану, то предоставляется возможность оценить количественно многофакторную статистическую зависимость при ограниченном объеме 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 , $i=1,2,...,n$ в виде полиномиальной модели:

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

где b_0 , b_1 , b_2 – 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 $\hat{y}$.

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,

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 051Б5С5 должна иметь вид многочлена второго порядка:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i x_i + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=i+1}^5 b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^5 b_{ii} x_i^2. \quad (2)$$

Основная проблема заключалась в том, что имея одну точку (x_1, x_2) по разным направлениям движения заготовки во время преодоления силы трения покоя мы имеем разную прочность бронзы марки Бр 051Б5С5 и при $x_1 = 0$ или $x_2 = 0$ процесс изготовления изделия отсутствует. Если направление усилия мы сможем определить через знак величин x_i , то использовать точки с координатами, $x_i = 0$ и $x_i = 0$ 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, $x_i = 0$ и $x_i = 0$ мы не можем. В системе MAPLE [5] создана подпрограмма с использованием двумерных ортогональных многочленов, позволяющая по результатам любых восьми точек записать уравнение не линейной регрессии в виде:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i x_i + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=i+1}^5 b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^5 b_{ii} x_i^2. \quad (3)$$

Потому для решения данной задачи проведем полный факторный эксперимент по плану типа 2^2 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:

$$\hat{y} = 218,7154367 - 1,08783857x_1 + 0,8793075659x_2 - 0,5337108077x_1^2 - 0,05066586389x_1^2 - 0,8095238095x_1x_2. \quad (6)$$

Таблиця 1 – Значення 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	$\bar{y}$	$\sigma^2(y)$
(-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	208,5	209,5	208,233	1,4027
(-2,1; 3)	230,4	231,2	230,2	231,2	231,0	230,5	230,75	0,1910

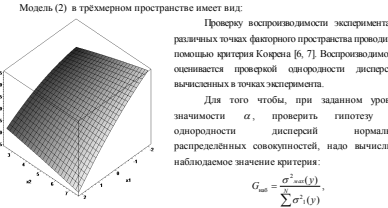


Рис. 1 – Трёхмерная модель прочности заготовки для деталей ПТМ в зависимости от частоты ее движения и величины напряжения для модели (2)

где N – число точек экспериментов и по таблице критических точек распределения Кофрена найти критические точки $G_{\alpha; m-1; N}$.

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

Если $G_{\text{наб}} > G_{\alpha}$ – 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 $G_{\alpha} = 0,1493$. Отсюда нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу, т. е. полученная модель воспроизводима.

Вычисленная ошибка эксперимента с учётом однородности дисперсии определяется по формуле:

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

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

Осуществляя проверку значимости коэффициентов модели (2), т.е. проверяя гипотезу $b_1 = 0$, относительно конкурирующей $b_1 \neq 0$ с помощью t -критерия Стьюдента [6, 7] были найдены дисперсия оценки b_1 :

$$\sigma^2\{b_1\} = \frac{1}{N} \sigma^2_{\text{ост}}(y) = 0,874293 \quad (9)$$

и стандартное отклонение оценки b_1

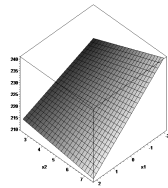
$$\sigma\{b_1\} = \sqrt{\sigma^2\{b_1\}}. \quad (10)$$

Известно [2, 6], что если $|b_1| \leq \sigma\{b_1\} t_{\alpha}$, то b_1 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 $\sigma\{b_1\} t_{\alpha} = 0,6677822583$.

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

$$\bar{y} = 218,7154367 - 11,08783857x_1 + 0,8793075659x_2 - 0,8095238095x_1x_2. \quad (11)$$

Геометрически данная модель имеет вид, представленный на рисунке 2.



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 вычислим остаточную дисперсию:

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

где d – число оцениваемых параметров.

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

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

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

Если $F_{\text{ис}} < F_{\alpha}$ при уровне значимости α и степенях свободы $k_1 = N - d$ и $k_2 = N(m - 1)$, то модель адекватна экспериментальным данным и наоборот.

Были вычислены $F_{\text{ис}} = 1,024214825$ для модели (2), а для модели (3) $F_{\text{ис}} = 30,17408992$. 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 $k_2 = 40$.

Для модели (3) найдено, что $F_y = 2,6060$ 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' и x_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 (уские 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) отличаются друг от друга не более чем 20 %.

Список использованных источников:

1. Хоронько О. Н. Процесс горизонтального непрерывного литья медных сплавов с выходящим транспортным реверсивным движением заготовок в неподвижном кристаллизаторе : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук : 05.16.04 / О. Н. Хоронько. - Нац. металлург. акад. Украины. - Львов: ЛПИ, 2013. - 35 с.
2. Сидяев Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных : учеб. пособие / Н. И. Сидяев. - Москва : Юрайт, 2012. - 400 с.
3. ДСТУ ГОСТ 8 207:2008 ГСИ. Правильне вимірювання з багаторазовими спостереженнями. Методи обробки результатів спостережень. - Введ. в дію 01.10.2008. ...
4. Власов К. П. Методы исследований и организации экспериментов / К. П. Власов, П. К. Власов, А. А. Касеяна. - Х. : Гуляни, Центр, 2013. - 412 с.
5. Лыкова В. П. Maple 10.1/12/13/14 в математических расчетах / В. П. Лыкова. - М. : Изд-во «ДМК Пресс», 2014. - 800 с.
6. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. - Киев : Техника, 1975. - 168 с.
7. Волоскуш В. А. Планирование научного эксперимента / В. А. Волоскуш, Н. Ткаченко. - М. : РИОР, Инфра-M, 2014. - 176 с.
8. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии / А. Г. Бондарь, Г. А. Сыткова. - Киев : Вища шк., 1976. - 184 с.

References

1. Khonohlov, O 2013, *Processes of horizontal continuous casting of copper alloys with outgoing transport reverse movement of blanks in a stationary crystallizer*, Doctoral thesis, National Academy of Metallurgical Sciences of Ukraine, Dnipropetrovsk.
2. Sidiyev, N 2012, *Theory of planning experiments and analysis of statistical data*, Yuryat, Moscow.
3. Derzhstandart Ukrainy 2008, *Pravilne vimevrennya z mnogokratnymi nablyudenniyami. Metody obrabotki i resheniya nablyudeni*, DSTU ГОСТ 8 207:2008 GSI, Derzhstandart Ukrainy, Kyiv.
4. Vlasov, K & Kasheva, A 2013, *Metody issledovaniy i organizatsiyi eksperimentov. Gsamitanyuyi nants*, Karkiv.
5. Dyakov, V 2014, *Maple 10.1/12/13/14 v matematicheskikh raschetakh*, Izdatelstvo "DMK Press", Moskva.
6. Vinarskiy, M & Lurye, M 1975, *Planirovaniye eksperimenta v tekhnologicheskikh issledovaniyakh*, Tekhnika, Kyiv.
7. Voloskush, V & Tkachenko, A 2014, *Planirovaniye nauchnogo eksperimenta*, RIOR, Infra-M, Moskva.
8. Bondar, A & Sytkova, G 1976, *Planirovaniye eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii*, Vushcha shkola, Kyiv.

Стаття надійшла до редакції 24 березня 2017 р.