

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ХРОМОМАНГАНЦЕВЫХ СТАЛЕЙ НА ИХ ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ

Г. Л. КУФАРЕВ, В. И. ЛИВШИЦ

(Представлена объединенным научным семинаром кафедр технологии  
машиностроения, станков и резания металлов)

Вопрос об оптимальном химическом составе хромоманганцевых сталей является центральным при замене никеля марганцем в сложнолегированных сталях. Обычно эксплуатационные качества стали остаются без изменения при значительном колебании содержания марганца, и основным критерием оптимальности становится обрабатываемость резанием.

На заводе «Сибтяжмаш» (г. Красноярск) для замены жаростойких хромоникелевых сталей в конструкциях цементных печей была разработана сталь Х13Г19ТЛ [1]. Однако вопрос о ее обрабатываемости резанием оставался неясным. Дело в том, что технология выплавки этой стали дает значительное колебание содержания марганца от плавки к плавке при относительной стабильности других элементов. Поскольку жаростойкость стали почти не изменяется при значительном колебании содержания марганца, технические условия допускают колебания марганца в пределах 17—21%, а фактически в механический цех попадают отливки с содержанием марганца в пределах 16—25%. Естественно, что невозможно дать ответ на вопрос об обрабатываемости стали при таком колебании ее химического состава без постановки специальных исследований. При этом осложняющим дело является то обстоятельство, что механические свойства и, очевидно, обрабатываемость высокомарганцевых и хромоманганцевых сталей в сильной степени зависят от условий выплавки, состава и грануляции шихты и т. д. [2]. На заводе «Сибтяжмаш» установилось мнение, что повышение процента марганца дает улучшение обрабатываемости стали Х13Г19ТЛ, поэтому зачастую литейщики старались выдать марганец на верхнем пределе содержания.

Из теории резания металлов известно, что обрабатываемость различных материалов резанием изменяется под воздействием целого ряда факторов. Иными словами, вариации (колеблемость) обрабатываемости определяются воздействием ряда причин, каждая из которых может быть представлена особым аргументом. Между распределениями двух величин  $x_i$  и  $y_i$  могут существовать [3] два типа зависимости (связи): 1) связь функциональная, или полная; 2) связь корреляционная, или неполная.

В эксперименте, поставленном для ответа на вопрос, касающийся какого-либо производственного процесса, чаще всего обнаруживается, что каждому определенному значению  $x$  соответствует не одно, а несколько различных значений  $y$ , причем распределение значений признака  $y$  изменяется вместе с изменением  $x$ . В математической статистике

такую неполную связь в отличие от функциональной называют корреляционной.

В производственных процессах корреляционные зависимости действуют повсеместно, поскольку на результат процесса влияют многочисленные технологические факторы, и некоторые из них в данных условиях доминируют. Применяя методы математической статистики, можно определить степень влияния того или иного фактора на результат процесса. В частности, методы изучения связей между случайными величинами составляют предмет корреляционного анализа. В случайных процессах, относящихся к машиностроительному производству, чаще всего имеет место прямолинейная корреляция [4], предполагающая совместное нормальное распределение величин  $x_i$  и  $y_i$  [т. е. исследуемая выборка взята из такой общей (генеральной) совокупности, в которой обе величины распределены каждая по нормальному закону]. Далее, случайные процессы, характеризующие машиностроительное производство, являются в большинстве своем [5] стационарными (здесь функции распределения вероятностей не зависят от начала отсчета времени). Для стационарных случайных процессов справедлива эргодическая гипотеза. Согласно этой гипотезе, большое число наблюдений над одной системой в произвольно выбранные моменты времени имеет те же статистические свойства, что и то же число наблюдений над множеством однотипных и произвольно выбранных систем в один и тот же момент времени. Таким образом, согласно эргодической гипотезе, любую из множества систем можно использовать для анализа поведения всего множества систем.

С учетом всего вышесказанного для исследований, целью которых было выяснение влияния процентного содержания марганца на обрабатываемость, были отобраны две выборки. Первая выборка из 24 заготовок была отобрана из различных плавок одного заказа (одной партии запуска). Вторая выборка состояла из заготовок, отлитых по разным заказам, она включала в себя полностью первую выборку — 24 заготовки одного заказа и дополнительно 10 заготовок из различных плавок другого заказа.

Химический анализ всех заготовок, отобранных для эксперимента, показал, что содержание углерода, кремния и хрома в них колеблется в очень узких пределах, которые, следуя данным А. Д. Вершинской [6], не оказывают сколько-нибудь существенного влияния на обрабатываемость. Колебания содержания марганца находились в пределах  $16,3 \div 24,3\%$ . Для исключения влияния нестабильности свойств твердосплавных режущих пластин все эксперименты проведены одной пластиной твердого сплава ВК8. Режимы обработки:  $V = 60$  м/мин,  $s = 0,31$  мм/об,  $t = 3$  мм. Износ инструмента протекал только по задней грани. За критерий затупления был принят  $h_{зг} = 0,8$  мм.

Эксперименты над заготовками первой выборки показали, что для одного и того же содержания марганца (всего в выборке было 8 различных значений содержания марганца) наблюдается не постоянное значение стойкости, а вариация (несколько неодинаковых значений) стойкости. Поэтому для ответа на поставленный вопрос пришлось обратиться к корреляционному анализу результатов эксперимента [3]. Для дальнейших рассуждений обозначим процент содержания марганца через признак  $x$ , а стойкость — через признак  $y$ .

Рассмотрим этапы корреляционного анализа на примере обработки первой выборки. В табл. 1 представлены наблюдения  $y$ , соответствующие определенному значению  $x$ , т. е. сгруппированные по  $x$ .

Кроме того, значения  $x$  расположены по ранжированному ряду, т. е. в возрастающем порядке. В каждой строке подсчитаны  $\Sigma y$  — сумма всех значений  $y$  и  $n_i (m)$  — число наблюдений  $y$  для данного значения  $x$ ,

Далее определены средние значения наблюдений  $y$  в каждой строке по формуле

$$\bar{y} = \frac{\Sigma y}{m}$$

Таблица 1

| $x$  | $y$  | $\Sigma y$ | $n_i(m)$ | $\bar{y}$ |
|------|--|------------|----------|-----------|
| 16,3 | 10,6   | 10,6       | 1        | 10,6      |
| 17,0 | 4,0+2,6  | 6,6        | 2        | 3,3       |
| 18,0 | 5,4  | 5,4        | 1        | 5,4       |
| 19,8 | 10,3   | 10,3       | 1        | 10,3      |
| 21,5 | 6,2+1,0+1,8+2,5+1,5+2,0+1,8+<br>+1,9+3,9+2,7+1,9+2,8+3,6 | 33,6       | 13       | 2,6       |
| 22,8 | 6,2  | 6,2        | 1        | 6,2       |
| 23,9 | 2,4+2,4  | 4,8        | 2        | 2,4       |
| 24,3 | 2,8+2,0+7,8  | 12,6       | 3        | 4,2       |

Используя первый и последний столбец табл. 1, строим график (рис. 1). Ломаная линия на графике называется эмпирической линией регрессии  $y$  по  $x$ . Цифры возле точек на графике соответствуют числу наблюдений  $y$  для данного значения  $x$ . Следующим этапом является качественный анализ эмпирической линии регрессии.

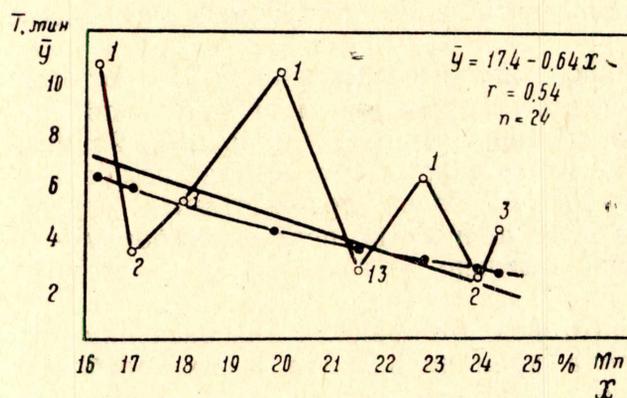


Рис. 1

Изучение графика на рис. 1 позволяет заметить тенденцию к уменьшению  $y$  при возрастании  $x$ . Эта тенденция (уменьшение стойкости с увеличением содержания марганца) представляется вполне правдоподобной, если сравнить данные по обрабатываемости сталей с низким содержанием марганца и высокомарганцевых сталей.

Определение формы связи между признаками  $x$  и  $y$  будем вести сразу для двух случаев: связь в виде прямой линии и связь в виде гиперболы.

Уравнение прямой:  $\bar{y}_x = a_0 + a_1x$ .

Уравнение гиперболы:  $\bar{y}_x = a_0 + \frac{a_1}{x}$ .

Системы нормальных уравнений для нахождения параметров  $a_0$  и  $a_1$ :

для прямой линии

$$a_0 \Sigma m + a_1 \Sigma xm = \Sigma ym,$$

$$a_0 \Sigma xm + a_1 \Sigma x^2 m = \Sigma xym;$$

для гиперболы

$$a_0 \Sigma m + a_1 \Sigma \frac{m}{x} = \Sigma ym,$$

$$a_0 \Sigma \frac{m}{x} + a_1 \Sigma \frac{m}{x^2} = \Sigma \frac{ym}{x}.$$

Для решения систем нормальных уравнений на основании данных табл. 1 составляем табл. 2.

Таблица 2

| Уравнение прямой |     |      |       |         |        | Уравнение гиперболы |               |                |                 |
|------------------|-----|------|-------|---------|--------|---------------------|---------------|----------------|-----------------|
| $x$              | $m$ | $ym$ | $xm$  | $x^2m$  | $xym$  | $\frac{1}{x}$       | $\frac{m}{x}$ | $\frac{ym}{x}$ | $\frac{m}{x^2}$ |
| 16,3             | 1   | 10,6 | 16,3  | 264,0   | 173,0  | 0,061               | 0,061         | 0,65           | 0,0037          |
| 17,0             | 2   | 6,6  | 34,0  | 578,0   | 112,0  | 0,059               | 0,118         | 0,39           | 0,0069          |
| 18,0             | 1   | 5,4  | 18,0  | 324,0   | 97,0   | 0,056               | 0,056         | 0,30           | 0,0031          |
| 19,8             | 1   | 10,3 | 19,8  | 390,0   | 204,0  | 0,051               | 0,051         | 0,52           | 0,0026          |
| 21,5             | 13  | 33,6 | 280,0 | 6010,0  | 723,0  | 0,047               | 0,605         | 1,56           | 0,0285          |
| 22,8             | 1   | 6,2  | 22,8  | 518,0   | 141,0  | 0,044               | 0,044         | 0,27           | 0,0019          |
| 23,9             | 2   | 4,8  | 47,8  | 1140,0  | 114,0  | 0,042               | 0,084         | 0,20           | 0,0035          |
| 24,3             | 3   | 12,6 | 72,9  | 1760,0  | 306,0  | 0,041               | 0,123         | 0,52           | 0,0051          |
| $\Sigma$         | 24  | 90,1 | 511,6 | 10984,0 | 1870,0 | 0,401               | 1,142         | 4,41           | 0,0553          |

Суммируя вертикально столбцы табл. 2, получаем данные для подстановки в системы нормальных уравнений:

|   |   |
|---|---|
| для прямой линии                            | для гиперболы                               |
| $a_0 \cdot 24,0 + a_1 \cdot 511,6 = 90,1,$  | $a_0 \cdot 24,0 + a_1 \cdot 1,142 = 90,1,$  |
| $a_0 \cdot 511,6 + a_1 \cdot 10984 = 1870;$ | $a_0 \cdot 1,142 + a_1 \cdot 0,055 = 4,41.$ |

Решение систем нормальных уравнений дает следующие результаты:

|                            |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| для прямой линии           | для гиперболы             |
| $a_0 = 17,4; a_1 = -0,64,$ | $a_0 = -5,06; a_1 = 185.$ |

Отсюда уравнения корреляционной связи получаем в следующем виде:

|                             |                                      |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| уравнение прямой            | уравнение гиперболы                  |
| $\bar{y}_x = 17,4 - 0,64x,$ | $\bar{y}_x = -5,06 + \frac{185}{x}.$ |

Следующий этап — составление табл. 3 выравненных значений  $\bar{y}_x$ , которые получают при подстановке в уравнения корреляционной связи фактических значений признака  $x$  из табл. 1.

Таблица 3

Нанеся выравненные значения  $\bar{y}_x$  на график (рис. 1), получим теоретические линии регрессии  $y$  по  $x$ .

Для оценки тесноты связи между признаками  $x$  и  $y$  вычисляют эмпирический коэффициент корреляции  $r$ . Для его расчета необходимо знать дисперсию выравненных значений  $\sigma_{\bar{y}}^2$ , вычисляемую по формуле

| Уравнение прямой |             | Уравнение гиперболы |             |
|------------------|-------------|---------------------|-------------|
| $x$              | $\bar{y}_x$ | $x$                 | $\bar{y}_x$ |
| 16,3             | 7,0         | 16,3                | 6,29        |
| 17,0             | 6,5         | 17,0                | 5,84        |
| 18,0             | 5,9         | 18,0                | 5,24        |
| 19,8             | 4,7         | 19,8                | 4,21        |
| 21,5             | 3,6         | 21,5                | 3,54        |
| 22,8             | 2,8         | 22,8                | 3,06        |
| 23,9             | 2,1         | 23,9                | 2,69        |
| 24,3             | 1,9         | 24,3                | 2,56        |

$$\sigma_B^2 = \frac{\Sigma (\bar{y}_x - Y)^2 m}{\Sigma m}; \quad Y = \frac{\Sigma ym}{\Sigma m}$$

Из табл. 2:  $\Sigma ym = 90,1$ ;  $\Sigma m = 24$ ;  $Y = \frac{90,1}{24} = 3,75$ .

Данные для расчета  $\sigma_B^2$  приведены в табл. 4.

Дисперсия выравненных значений:

по уравнению прямой

по уравнению гиперболы

$$\sigma_B^2 = \frac{47,8}{24} = 1,99.$$

$$\sigma_B^2 = \frac{25,12}{24} = 1,05.$$

Таблица 4

| Уравнение прямой |                 |                     |                       | Уравнение гиперболы |                 |                     |                       |
|------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| $\bar{y}_x$      | $\bar{y}_x - Y$ | $(\bar{y}_x - Y)^2$ | $(\bar{y}_x - Y)^2 m$ | $\bar{y}_x$         | $\bar{y}_x - Y$ | $(\bar{y}_x - Y)^2$ | $(\bar{y}_x - Y)^2 m$ |
| 7,0              | 3,25            | 10,6                | 10,6                  | 6,29                | 2,54            | 6,45                | 6,45                  |
| 6,5              | 2,75            | 7,6                 | 15,2                  | 5,84                | 2,09            | 4,57                | 8,74                  |
| 5,9              | 2,15            | 4,6                 | 4,6                   | 5,24                | 1,49            | 2,23                | 2,23                  |
| 4,7              | 0,95            | 0,9                 | 0,9                   | 4,21                | 0,46            | 0,21                | 0,21                  |
| 3,6              | -0,15           | 0,0                 | 0,0                   | 3,54                | -0,21           | 0,04                | 0,52                  |
| 2,8              | -0,95           | 0,9                 | 0,9                   | 3,06                | -0,69           | 0,47                | 0,47                  |
| 2,1              | -1,65           | 2,7                 | 5,4                   | 2,69                | -1,06           | 1,12                | 2,24                  |
| 1,9              | -1,85           | 3,4                 | 10,2                  | 2,56                | -1,19           | 1,42                | 4,26                  |
| $\Sigma$         |                 |                     | 47,8                  | $\Sigma$            |                 |                     | 25,12                 |

Кроме того, для расчета коэффициента корреляции необходимо знать дисперсию фактических значений

$$\sigma_\Phi^2 = \frac{\Sigma (y_\Phi - Y)^2}{\Sigma m}$$

Данные для расчета  $\sigma_\Phi^2$  приведены в табл. 5.

Таблица 5

| $y_\Phi$ | $y_\Phi - Y$ | $(y_\Phi - Y)^2$ | $y_\Phi$ | $(y_\Phi - Y)$ | $(y_\Phi - Y)^2$ |
|----------|--------------|------------------|----------|----------------|------------------|
| 10,6     | 6,85         | 46,70            | 1,8      | -1,95          | 3,78             |
| 4,0      | 0,25         | 0,06             | 1,9      | -1,85          | 3,41             |
| 2,6      | -1,15        | 1,32             | 3,9      | 0,15           | 0,02             |
| 5,4      | 1,65         | 2,71             | 2,7      | -1,05          | 1,10             |
| 10,3     | 6,55         | 4,270            | 1,9      | -1,85          | 3,41             |
| 6,2      | 2,45         | 6,00             | 3,6      | -0,15          | 0,02             |
| 1,0      | -2,75        | 7,55             | 6,2      | 2,45           | 6,00             |
| 1,8      | -1,95        | 3,78             | 2,4      | -1,35          | 1,82             |
| 2,5      | -1,25        | 1,56             | 2,4      | -1,35          | 1,82             |
| 1,5      | -2,25        | 5,10             | 2,8      | -0,95          | 0,90             |
| 2,0      | -1,75        | 3,05             | 2,0      | -1,75          | 3,05             |
| 2,8      | -0,95        | 0,90             | 7,8      | 4,05           | 16,40            |
| $\Sigma$ |              |                  |          |                | 163,16           |

Эмпирический коэффициент корреляции рассчитывается по формуле

$$r = \sqrt{\frac{\sigma_B^2}{\sigma_\Phi^2}}$$

по уравнению прямой

$$r = \sqrt{\frac{1,99}{6,8}} = 0,54,$$

по уравнению гиперболы

$$r = \sqrt{\frac{1,05}{6,8}} = 0,39,$$

Сама по себе величина коэффициента корреляции  $r$  еще недостаточна, чтобы судить о существовании или отсутствии корреляции между признаками  $x$  и  $y$ . Необходимо оценить значимость (надежность) полученного коэффициента корреляции. Для этого вычисляют его среднеквадратичную ошибку

$$\sigma_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{n}}$$

$n$  — общее число наблюдения.

По уравнению прямой

$$\sigma_r = \frac{1 - 0,54^2}{\sqrt{24}} = 0,145,$$

по уравнению гиперболы

$$\sigma_r = \frac{1 - 0,39^2}{\sqrt{24}} = 0,173.$$

Далее вычисляется отношение  $\frac{|r|}{\sigma_r}$ . Если оно больше 3, то полученный коэффициент корреляции свидетельствует о наличии существенной связи между  $x$  и  $y$ , если отношение меньше 3, связь нереальна (отсутствует) [4].

Для рассматриваемого случая:

по уравнению прямой

$$\frac{r}{\sigma_r} = \frac{0,54}{0,145} = 3,75 > 3,$$

связь существует

по уравнению гиперболы

$$\frac{r}{\sigma_r} = \frac{0,39}{0,173} = 2,25 < 3,$$

связь отсутствует.

Следовательно, можно утверждать с достоверностью, что обрабатываемость заготовок из стали Х13Г19ТЛ линейно зависит от содержания марганца в отливках (в пределах плавов одного заказа), причем с увеличением содержания марганца обрабатываемость ухудшается (стойкость падает). Гиперболическая связь между этими признаками отсутствует. Следует отметить, что полученный вывод не совпадает с существующим на заводе мнением об улучшении обрабатываемости при увеличении содержания марганца. Такое несовпадение, очевидно, объясняется результатом, полученным ниже.

Величина коэффициента корреляции с вероятностью 0,997 будет находиться в пределах

$$r - 3\sigma_r < r < r + 3\sigma_r, \\ 0,105 < r < 0,975.$$

По мнению А. М. Дина [7], если нижняя граница  $r$  мала, то нет оснований считать существующей корреляционную связь между величинами  $x$  и  $y$  в генеральной совокупности, из которой взята рассматриваемая выборка. Для проверки этого обстоятельства рассмотрена вторая выборка, включающая заготовки, отлитые по разным заказам. Основные данные для второй выборки представлены в табл. 6. Результаты поиска прямолинейной и криволинейной корреляционных связей даны

в табл. 7. Эмпирическая и теоретическая линии регрессии представлены на рис. 2.

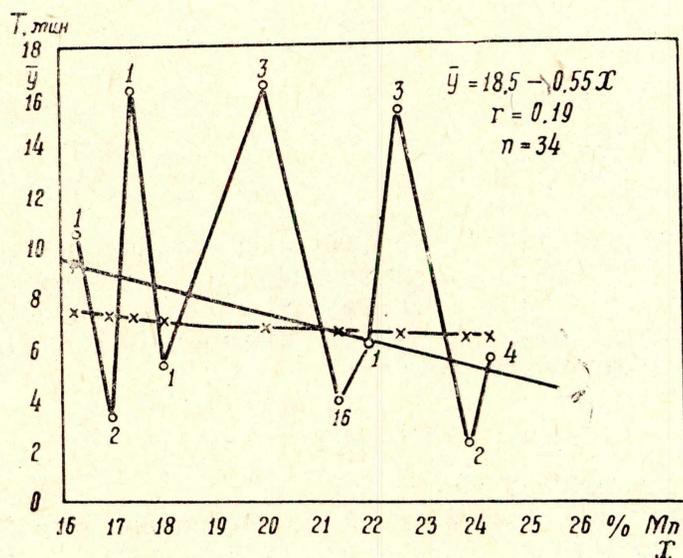


Рис. 2.

Исследования второй выборки подтвердили мнение об отсутствии корреляции между признаками  $x$  и  $y$

Таблица 6

| $x$  | $y$  | $\Sigma y$ | $n_i (m)$ | $\bar{y}$ |
|------|--|------------|-----------|-----------|
| 16,3 | 10,6   | 10,6       | 1         | 10,6      |
| 17,0 | 4,0+2,6  | 6,6        | 2         | 3,3       |
| 17,4 | 16,2   | 16,2       | 1         | 16,2      |
| 18,0 | 5,4  | 5,4        | 1         | 5,4       |
| 20,0 | 10,3+19,4+19,4   | 49,1       | 3         | 16,4      |
| 21,4 | 6,2+1,0+1,8+2,5+1,5+2,0+1,8+1,9+<br>+3,9+2,7+1,9+2,8+3,6+3,5+<br>+9,0+16,2 | 62,3       | 16        | 3,9       |
| 22,0 | 6,2  | 6,2        | 1         | 6,2       |
| 22,6 | 20,6+19,4+6,2  | 46,2       | 3         | 15,4      |
| 23,9 | 2,4+2,4  | 4,8        | 2         | 2,4       |
| 24,3 | 2,0+7,8+2,8+10,3   | 22,9       | 4         | 5,5       |

в случае более широкой совокупности, в которую включены заготовки, выплавленные в различных заказах. Можно предположить, что существование связи в случае малой выборки и отсутствие связи в случае большой выборки связано с теми различиями, которые вызваны разными заказами (партиями запуска). В случае большой выборки вторичные более существенного признака — изменение свойств отливок в плавках другого заказа — нарушило вариацию стойкости и сделало нереальной корреляционную связь. Обоснованность такого предположения подтверждается и литературными данными [2] о сильной зави-

симости свойств хромомарганцевых сталей от технологии выплавки и разливки, состава шихты, состояния печи и даже мастерства сталеваров.

Таблица 7

| Уравнение прямой   | Уравнение гиперболы   |
|--|---|
| $\left. \begin{aligned} a_0 \cdot 34,0 + a_1 \cdot 722,9 &= 230,3 \\ a_0 \cdot 722,9 + a_1 \cdot 15496 &= 4822 \end{aligned} \right\}$ | $\left. \begin{aligned} a_0 \cdot 34,0 + a_1 \cdot 1,618 &= 230,3 \\ a_0 \cdot 1,618 + a_1 \cdot 0,078 &= 11,01 \end{aligned} \right\}$ |
| $\bar{y}_x = 18,5 - 0,55x$   | $\bar{y}_x = 4,35 + \frac{51,0}{x}; Y = \frac{230,3}{34} = 6,76$  |
| $Y = \frac{230,3}{34} = 6,76$  | $\sigma_B^2 = \frac{2,36}{34} = 0,069$  |
| $\sigma_B^2 = \frac{46,05}{34} = 1,35$   | $\sigma_B^2 = \frac{1252,8}{34} = 36,8$   |
| $r = \sqrt{\frac{1,35}{36,8}} = 0,19$  | $r = \sqrt{\frac{0,069}{36,8}} = 0,04$  |
| $\sigma_r = \frac{1 - 0,19^2}{\sqrt{34}} = 0,16$   | $\sigma_r = \frac{1 - 0,04^2}{\sqrt{34}} = 0,17$  |
| $\frac{r}{\sigma_r} = \frac{0,19}{0,16} = 1,2 < 3$   | $\frac{r}{\sigma_r} = \frac{0,04}{0,17} = 0,25 < 3$   |
| связь отсутствует  | связь отсутствует   |

#### ЛИТЕРАТУРА

1. «Качество, надежность, долговечность», сб. докладов, ЦБТИ, Красноярск, 1964.
2. «Технология машиностроения», научно-технический сборник, М., ЦИНТИМАШ, 1960.
3. Б. Х. Белов и др. Практическая методика корреляционного анализа. Сб. трудов ВНИИ, выпуск 4, М., 1964.
4. А. К. Кутай, Х. Б. Кордонский. Анализ точности и контроль качества в машиностроении, М.—Л., Машгиз, 1958.
5. И. М. Маликов и др. Основы теории и расчета надежности. Судпромгиз, Л., 1960.
6. «Усовершенствование технологии производства турбинных лопаток», сб. статей. М., Машгиз, 1956.
7. А. М. Длин. Математическая статистика в технике. «Советское радио», 1949.