

## Применение метода дисперсионного анализа для выявления наличия неочевидных зависимостей между характеристиками процесса обработки титановых пластин

*А.С. Куликова, Тет У, О.В. Новоселова*

*Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»*

**Аннотация:** Статья посвящена анализу методов обработки экспериментальных данных в области усовершенствования технологий изготовления, с акцентом на обработку титановых сплавов. В современных условиях естественно-научного эксперимента, характеризующегося большими потоками информации, возникает необходимость применения математических методов и вычислительных систем для эффективного анализа данных. Исследования, проводимые на кафедре «Высокоэффективные технологии обработки» МГТУ «Станкин», направлены на выявление оптимального типа износостойкого покрытия для режущего инструмента при обработке титановых пластин. Титан, обладая низкой теплопроводностью и высокой химической активностью, создает определенные сложности в процессе обработки, что требует глубокого изучения взаимосвязей между условиями резания и параметрами процесса. В статье обсуждаются существующие проблемы, связанные с недостаточной изученностью этих взаимосвязей, а также предлагается решение проблемы хранения и обработки данных через создание общей базы данных. Это позволит улучшить визуализацию и анализ результатов экспериментов, что, в свою очередь, повысит эффективность исследований и качество производимых изделий. Результаты работы могут быть полезны как для научных исследований, так и для практического применения в промышленности.

**Ключевые слова:** исследование технологических процессов, режущий инструмент, характеристики режима резания, системный анализ.

При разработке или усовершенствовании способа изготовления стремление улучшить качество создаваемого изделия тесно связано с анализом успешных и неуспешных результатов процесса. Обработка результатов экспериментов предполагает знание основных понятий и методов теории вероятностей и математической статистики. Выявление характерных классов задач в обработке экспериментальных данных и стандартных методов их решения позволяет выделить обработку результатов экспериментов из многообразия задач прикладной статистики.

Современный уровень естественнонаучного эксперимента характеризуется большими потоками информации. При этом визуальный просмотр данных, не говоря уже об анализе, крайне затруднителен без

применения ЭВМ. Значимым дополнением является использование математических методов в анализе, которые расширяют арсенал средств, находящихся в распоряжении исследователя, что особенно важно в сложных случаях, например, когда измерения производятся при воздействии большого числа факторов [1 – 3].

В 2024 году в МГТУ «Станкин» на кафедре «Высокоэффективные технологии обработки» в рамках проектов Министерства образования и финансирования РФ исследуется процесс обработки титанового сплава. На режущий инструмент наносятся износостойкие покрытия разных типов. В процессе обработки производится сбор характеристик процесса. Целью такого изыскания является выявить наиболее удачный тип покрытия режущего инструмента для обработки титановой пластины на основе результатов экспериментов.

Обработка титана и его сплавов представляет собой более сложную задачу с высокими экономическими затратами по сравнению с другими металлами. Эта сложность связана с низкой теплопроводностью и высокой химической активностью титана. Несмотря на это, если упомянуть о количественной оценке влияния этих факторов, то этой теме посвящено сравнительно малое количество экспериментов, выполненных при разнородных условиях резания, что мешает установлению сходств и различий среди результатов. Вопросы взаимодействия инструмента и обрабатываемого материала в процессе резания остаются открытыми.

Анализируя результаты исследований, можно отметить, что на температуру в зоне контакта инструмента и заготовки в основном влияет скорость резания [4], которая сильно увеличивается во время механической обработки титановых сплавов в результате слишком высокой скорости тепловыделения, которая часто не может быть сбалансирована скоростью отвода тепла из зоны резания.

---

Однако, необходимо провести дальнейшие исследования для определения оптимальных условий применения этих методов. Недостаточно изучены взаимосвязи между условиями резания, скоростью тепловыделения, отводом тепла и другими параметрами процесса. При этом, функция распределения параметра резания представляет собой вероятность появления значения параметров резания при заданных значениях управляющих факторов через время резания и описывает резание, как нестационарный случайный процесс.

Одним из недостатков, влияющим на скорость обработки данных, является текущий способ хранения информации. Результаты, получаемые от различных измерительных устройств во время и после проведения процесса обработки, такие, как: сила давления режущего инструмента, шероховатость, диаметр отверстия, период износостойкости и пр., хранятся разрозненно, зачастую, в непредназначенных для обработки данных программах и форматах. Оценка общей картины в этом случае затруднена.

Для улучшения и ускорения обработки результатов, предлагается способ хранения при помощи общей базы данных – набора таблиц, связанных между собой. Это позволит отображать данные на одном экране для последующей их визуальной и программной оценки.

Существует гипотеза, что если при построении графика зависимости одной величины, характеризующей проведение эксперимента, от другой визуально прослеживается зависимость, то, влияя именно на эти величины, можно быстрее достичь успеха в вышеупомянутых исследованиях. Это осуществимо благодаря наличию большого объема данных, полученных в процессе проведения вышеупомянутых экспериментов и нахождения этого процесса под действием ряда случайных возмущающих факторов. Поэтому требуется выработать метод обработки данных, позволяющий оценить истинность предположения [5].

---

На рис.1 представлены графики, построенные на основе данных, которые были зафиксированы при проведении сверления титановых пластин режущим инструментом с различным износостойким покрытием.

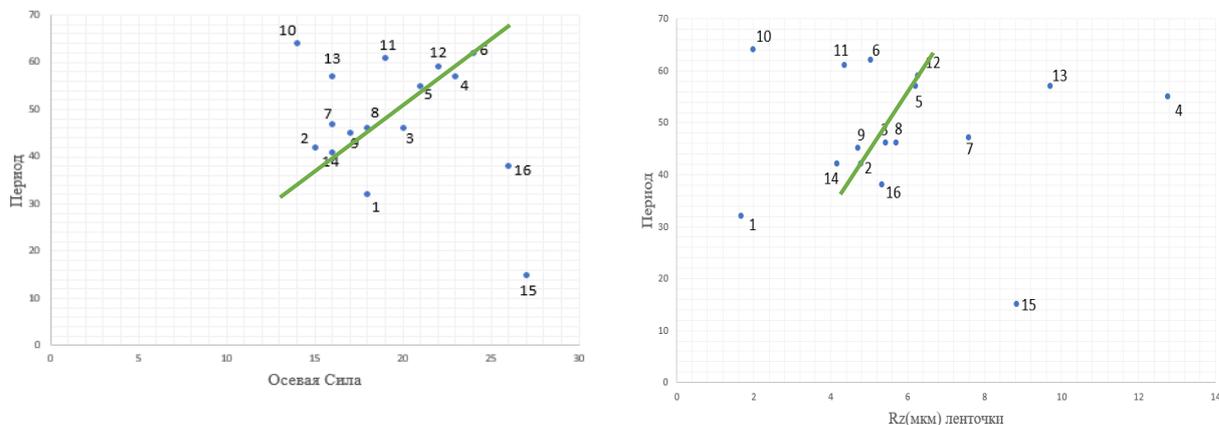


Рис. 1. – Визуально прослеживаемые зависимости величин

Процесс проводился на фрезерном станке KNUTH WF-1 (режим резания: 2000 об/мин, подача 53 мм/мин) с использованием динамометра Kistler (Швейцария) с применением СОЖ во избежание возгорания стружки. Для измерения характеристик полученных отверстий (диаметр, нецилиндричность, шероховатость) использовались координатно-измерительная машина GLOBAL (Италия) с разрешением 1.7 мкм и прибор для измерения параметров шероховатости и профиля HommelTester T8000 (США). Радиус округления режущей кромки контролировался на приборе MicroCad lite (GFM, Германия). Налипы на ленточке сверла исследовались при помощи стилусного профидометра Dektak XT (Bruker, США).

Во время данных исследований, особое внимание было уделено изысканию комплекса факторов [5], которые позволят уменьшить налипание на режущий инструмент. Анализ топографии ленточки сверла показал, что в зависимости от состава покрытия и состава антифрикционного слоя интенсивность налипания на ленточку сверла меняется. Но в любом случае налипы оказывают крайне негативное влияние на результат обработки.

Образование налипов приводит к образованию на ленточке сверла отрицательного заднего угла и инструмент [6], по крайней мере по своей цилиндрической части, начинает работать, как дорн. Это приводит к существенному падению шероховатости поверхности в обработанном отверстии и увеличению его диаметра, и в то же время является причиной увеличения осевой силы. Увеличение величины отклонения от цилиндричности отверстия, связанное с появлением вибраций, говорит о снижении устойчивости сверла. Это отклонение носит скорее случайный характер и здесь сложно выделить какую-либо зависимость.

Чтобы выяснить, имеется ли какое-либо влияние на интенсивность налипания титана на период стойкости инструмента, данные были перенесены на координатную сетку (рис.1). Полученные данные позволяют говорить о том, что существует корреляция между параметрами, на которые оказывает влияние склонность к наростообразованию, хотя многие результаты все же приходится признать неоднозначными [7]. Так, согласно данным измерения параметра шероховатости ленточки сверла  $R_z$ , согласующимся с высотой налива, и по минимальной величине отклонения диаметра отверстия от номинального, представляется возможным осуществить выбор состава износостойкого покрытия и прогнозировать поведение инструмента с таким покрытием. В то же время по параметрам шероховатости на внутренней поверхности отверстия или по силовым характеристикам процесса резания сделать такое предсказание не получается.

Для последующего анализа данных предлагается использовать математические методы [8]. Например, метод дисперсионного анализа, который используется для проверки гипотез о равенстве средних значений нескольких групп и для выяснения влияния одного или нескольких факторов на зависимую переменную. Основная цель дисперсионного анализа —

---

выяснить, есть ли значимые различия между группами данных или изменения могут быть объяснены случайными факторами.

Так как на рис.1 визуально заметны линейные зависимости, было принято решение при помощи метода дисперсионного анализа показать их наличие.

Для каждой из трех зависимостей, отмеченных на рис.1 зеленой линией, был проведен расчет. 16 предоставленных экспериментов были поделены на группы по признаку одной из величин и произведен расчет.

Например, для поиска зависимостей между периодом и  $R_{(мкм)}$  ленточки значения шероховатости были поделены на 4 группы случайным образом (табл. 1) и по признаку величины периода (табл. 2). Расчёты представлены ниже.

Таблица №1.

Деление экспериментов на группы по случайному признаку

Группа	1 группа	2 группа	3 группа
1	1,6	4,7	6,3
2	2	5,6	6,2
3	4,6	4,4	5
4	7,6	5,4	5,3
5	9,6	12,8	8,8

Согласно методу дисперсионного анализа предположим 2 гипотезы. **Нулевая гипотеза ( $H_0$ ):** Средние значения групп не различаются, т.е. значение шероховатости не зависит от периода. **Альтернативная гипотеза ( $H_1$ ):** Средние значения хотя бы одной группы отличаются, т.е. изменение периода влияет на изменение шероховатости.

Основная идея заключается в сравнении двух видов дисперсий: межгрупповой и внутри групповой. Произведем расчет и вычислим F-критерий.

$$Q_1 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 = 652,11$$

$$S_0^2 = \frac{Q_1 - Q_2}{N - k} = 53,442$$

$$Q_2 = \sum_{i=1}^k \frac{X_i^2}{n_i} = 545,226$$

$$S_A^2 = \frac{Q_2 - Q_3}{k - 1} = 3,213$$

$$Q_3 = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^k X_i \right)^2 = 538,8$$

$$\frac{S_A^2}{S_0^2} = 0,06$$

$$F_a(k - 1; N - k) = (2; 12) = 3,89$$

Таблица №2.

Деление экспериментов на группы по признаку величины периода

Группа	Короткий период	Средний период	Длинный период
1	1,6	4,7	6,3
2	4,8	5,6	6,2
3	4,2	5,4	5,3
4	7,6	5,2	8,8

$$Q_1 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 = 394,66$$

$$S_0^2 = \frac{Q_1 - Q_2}{N - k} = 25,4$$

$$Q_2 = \sum_{i=1}^k \frac{X_i^2}{n_i} = 369,25$$

$$S_A^2 = \frac{Q_2 - Q_3}{k - 1} = 4,589$$

$$Q_3 = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^k X_i \right)^2 = 360,07$$

$$\frac{S_A^2}{S_0^2} = 0,18$$

$$F_a(k - 1; N - k) = (2; 9) = 3,89$$

Если F-критерий достаточно велик, это означает, что межгрупповая дисперсия (обусловленная факторами) значительно превышает внутригрупповую (случайные ошибки), что указывает на наличие статистически значимых различий между группами.

Расчет показал, что неочевидных зависимостей между величинами не найдено, так как полученное значение F-критерия не приближено к критическому значению из таблицы распределения Фишера. Таким образом, можно сделать вывод, что неочевидные зависимости отсутствуют.

Остальные зависимости были просчитаны аналогичным образом, положительного результат не выявлено.

Также, не стоит исключать недостатков самого метода дисперсионного анализа [9]. Один из ключевых недостатков метода — это его зависимость от предположения о нормальном распределении данных в каждой группе. Если данные существенно отклоняются от нормальности, результаты могут быть неверными или неточными. Кроме того, дисперсионный анализ предполагает, что дисперсии во всех сравниваемых группах должны быть одинаковыми. Если дисперсии сильно различаются (нарушение гомоскедастичности), это может привести к некорректным выводам [10]. Вышеописанный метод требует, чтобы наблюдения были независимы друг от друга. В случае зависимых данных (например, повторных измерений) этот метод не подходит без дополнительных модификаций (например, использования анализа с повторными измерениями).

Ввиду недостатков выбранного метода, рекомендуется провести исследования данных при помощи прочих методов системного анализа [11, 12].

### Литература

1. Маилян Д.Р., Польской П.П., Хишмах М., Кургин К.В. О прочности балок из тяжелого бетона при использовании стальной, инженерный вестник Дона



углепластиковой и комбинированной арматуры, расположенной в два ряда // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2096

2. Ямашкин С.А., Ямашкин А.А., Зарубин О.А., Кирюшин А.В. Многофакторный анализ межкомпонентных связей в геосистемах на основе имитационного моделирования и численных методов // Инженерный вестник Дона, 2022, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8028

3. Wenzlick M., Bauer J., Rose K., Hawk J.A., Devanathan R. Data Assessment Method to Support the Development of Creep-Resistant Alloys Oak Ridge Institute for Science and Education // Integrating Materials and Manufacturing Innovation. 2020. V. 9. №1. pp. 89-102.

4. Jensen A.C.Ø., Poikkimäki M., Brostrøm A., Dal Maso M., Nielsen O.J., Rosenørn T., Butcher A., Koponen I.K., Koivisto A.J. The Effect of Sampling Inlet Direction and Distance on Particle Source Measurements for Dispersion Modelling Tampere University of Technology // Aerosol and Air Quality Research. 2019. V 19. №5. pp. 1114-1125.

5. Волосова М.А., Федоров С.В., Тет У, Колосова Н.В. Влияние антифрикционных покрытий на процесс сверления титанового сплава // XIV международная научно-техническая конференция «Трибология – машиностроению». 2022. С. 83-36.

6. Abid M., Nazir H.Z., Tahir M., Riaz M., Abbas T. A Comparative Analysis of Robust Dispersion Control Charts with Application Related to Health Care Data // Journal of Testing and Evaluation. 2020. V. 48. №1. pp. 247-259.

7. Khazini L., Dehkharghanian M.E., Vaezihir A. Dispersion and modeling discussion of aerosol air pollution caused during mining and processing of open-cast mines // International Journal of Environmental Science and Technology. 2022. V.19. pp. 913–924.

8. Diskaeva E., Vecher O.V., Bazikov I.A., Maltsev Alexandr Nikolaevich Dispersion analysis of niosomes different composition // Journal of Nanoparticle Research. 2019. V. 21. №1. URL: doi.org/10.1007/s11051-018-4453-6.
9. Aslam M., Anwar S.M., Khan M., Abiodun N.L., Rasheed Z. Efficient Auxiliary Information–Based Control Charting Schemes for the Process Dispersion with Application of Glass Manufacturing Industry // Mathematical Problems in Engineering. 2022. V. 2022. №1. pp. 1-21.
10. Grohmann J., Eismann S., Elflein S., von Kistowski J., Kounev S., Mazkatli M. Detecting Parametric Dependencies for Performance Models Using Feature Selection Techniques // 2019 IEEE 27th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS). IEEE, 2019. pp. 309-322.
11. Ghosh A., Ahmed S., Khan F. Memorial Modeling and Testing of Temporal Dependency in the Failure of a Process System // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2019. V. 58. №19. pp. 8162-8171.
12. Benoumechiara N., Bousquet N., Michel B., Saint-Pierre Ph. Detecting and modeling critical dependence structures between random inputs of computer models // Dependence Modeling. 2020. V. 8. №1. pp. 263-297.

### References

1. Mailyan D.R., Pol'skoy P.P., Khishmakh M., Kurgin K.V. Inzhenernij vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2096
  2. Yamashkin S.A., Yamashkin A.A., Zarubin O.A., Kiryushin A.V. Inzhenernij vestnik Dona, 2022, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8028
  3. Wenzlick M., Bauer J., Rose K., Hawk J.A., Devanathan R. Integrating Materials and Manufacturing Innovation. 2020. v. 9. №1. pp. 89-102.
-



4. Jensen A.C.Ø., Poikkimäki M., Brostrøm A., Dal Maso M., Nielsen O.J., Rosenørn T., Butcher A., Koponen I.K., Koivisto A.J. Aerosol and Air Quality Research. 2019. V 19. №5. pp. 1114-1125.
5. Volosova M.A., Fedorov S.V., Tet U, Kolosova N.V. XIV mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Tribologiya – mashinostroeniye». 2022. pp. 83-36.
6. Abid M., Nazir H.Z., Tahir M., Riaz M., Abbas T. A Journal of Testing and Evaluation. 2020. V. 48. №1. pp. 247-259.
7. Khazini L., Dehkharghanian M.E., Vaezihir A. International Journal of Environmental Science and Technology. 2022. V.19. pp. 913–924.
8. Diskaeva E., Vecher O.V., Bazikov I.A., Maltsev A.N. Journal of Nanoparticle Research. 2019. V. 21. №1. URL: doi.org/10.1007/s11051-018-4453-6.
9. Aslam M., Anwar S.M., Khan M., Abiodun N.L., Rasheed Z. Mathematical Problems in Engineering. 2022. V. 2022. №1. pp. 1-21.
10. Grohmann J., Eismann S., Elflein S., von Kistowski J., Kounev S., Mazkatli M. 2019 IEEE 27th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS). IEEE, 2019. pp. 309-322.
11. Ghosh A., Ahmed S., Khan F. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2019. V. 58. №19. pp. 8162-8171.
12. Benoumechiara N., Bousquet N., Michel B., Saint-Pierre Ph. Dependence Modeling. 2020. V. 8. №1. pp. 263-297.

**Дата поступления: 6.09.2024**

**Дата публикации: 15.10.2024**