

Научная статья

УДК 534-8+621.813+62-771

doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-19-28

Анализ влияния факторов температуры, массы и амплитуды колебаний на сборку резьбового соединения с помощью ультразвука

Александр Вадимович Сухов¹, аспирант
Дмитрий Сергеевич Фатюхин², д.т.н.

^{1, 2} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

¹ sukhov-aleksandr96@mail.ru / <https://orcid.org/0009-0009-9097-8216>

² mitriy2@yandex.ru / <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415>

Аннотация. Проанализирован ряд работ, посвященных ультразвуковым сборке и разборке, а также выявлены их недостатки, в частности слабое внимание к вопросу многофакторного влияния на процессы сборки с применением ультразвука. На основе анализа источников определены факторы, способные значительно влиять на процесс сборки резьбовых соединений, которыми являются температура, масса собираемого соединения, а также амплитуда колебаний. Рассмотрено влияние на сборку указанных факторов в отдельности, а также их одновременное воздействие на процесс сборки с применением ультразвука. Результаты показали, что увеличение массы собираемого резьбового соединения увеличивает эффективность применения ультразвука. Также результаты показали, что увеличение или уменьшение температуры практически не оказывает влияния на эффективность сборки, что подтверждается статистической обработкой, которая показывает малую связь между откликом и фактором. При этом применение ультразвука в зависимости от температуры влияет на разброс полученных значений в рамках одной точки – полученные значения варьируются в диапазоне 5 % при средних значениях температуры и в диапазоне 10 % при граничных значениях. Результаты многофакторного эксперимента подтвердили характер влияния амплитуды колебаний, массы и температуры собираемого соединения, выявив значимость факторов амплитуды и массы, при этом фактором температуры можно пренебречь ввиду его малого влияния. Обработка результатов многофакторного эксперимента велась двумя различными методами, в результате чего были получены схожие зависимости, что, в свою очередь, подтверждает высокую достоверность полученных результатов.

Ключевые слова: технология, ультразвук, колебания, сборка, резьбовые соединения

Для цитирования: Сухов А.В., Фатюхин Д.С. Анализ влияния факторов температуры, массы и амплитуды колебаний на сборку резьбового соединения с помощью ультразвука // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 3 (165). С. 19–28. doi: 10.30987/2223-4608-2025-19-28

Impact analysis of temperature, mass, and oscillation amplitude on the assembly of a threaded fastening using ultrasound

Alexander V. Sukhov¹, PhD student

Dmitry S. Fatyukhin², D. Eng.

^{1, 2} Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹ sukhov-aleksandr96@mail.ru

² mitriy2@yandex.ru

Abstract. A number of works devoted to ultrasonic assembly and disassembly have been analyzed, and their disadvantages have been identified, in particular, lack of attention to the issue of multifactorial nature of the influence on assembly using ultrasound. Based on the analysis of the sources, the factors that can significantly affect the assembly process of threaded fastenings are determined. They are temperature, mass of the assembled fastening, as well as the amplitude of vibrations. The results showed that increasing the mass of the assembled threaded fastening increases the effectiveness of ultrasound application. The results also showed that increasing or decreasing the temperature has virtually no effect on the assembly efficiency, which is confirmed by statistical processing, which shows a small relationship between the response and the factor. At the same time, the use of ultrasound, depending on the temperature, affects the spread of the obtained values within a single point – the values obtained vary in the range of 5 % at average temperatures and in the range of 10% at boundary values. The results of the multifactorial experiment confirmed the nature of the influence of the oscillation amplitude, mass and temperature of the assembled fastening, revealing the importance of the amplitude and mass factors, while the temperature factor can be neglected due to its minor influence. The results of the multifactorial experiment were processed using two different methods, as a result of which similar dependencies were obtained, which, in turn, confirms the high reliability of the obtained results.

Keywords: technology, ultrasound, vibrations, assembly, threaded fastenings

For citation: Sukhov A.V., Fatyukhin D.S. Impact analysis of temperature, mass, and oscillation amplitude on the assembly of a threaded fastening using ultrasound / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 3 (165). P. 19–28. doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-19-28

Введение

К изделиям машиностроения предъявляются жесткие требования к качеству изделий и их надёжности. Особое внимание уделяется к изделиям транспортного машиностроения, которые работают в различных условиях эксплуатации, в том числе экстремальных.

Такие показатели надёжности, как работоспособность, безотказность, ремонтпригодность, обеспечиваются в значительной степени качеством сборки изделий. Наиболее распространённым видом разборных соединений является резьбовое, позволяющее проводить сборку и разборку изделий без их повреждения, создавать требуемые прочность и жесткость соединения, обеспечивать долговечность и сохраняемость конструкции, а также её ремонтпригодность. Резьбовые соединения размеров М8...М24 составляют порядка 70 % всех соединений автомобиля, на которые приходится 25...30 % трудоёмкости сборки и 25...64 % трудоёмкости разборочных работ. По разным оценкам, до 15...20 % отказов техники в процессе эксплуатации связано с резьбовыми соединениями. Основными причинами нарушения эксплуатационных характеристик резьбовых соединений являются самоотвинчивание соединений и уменьшение осевой силы вследствие действий знакопеременных и вибрационных нагрузок. Перечисленные причины могут приводить не только к отказам отдельных сборочных единиц и агрегатов, но и конструкций и изделий в целом.

Вопросам, связанным с повышением надёжности резьбовых соединений при сборке посвящено большое число работ [1 – 3]. Значительное их количество направлено на разработку конструктивных изменений деталей соединений или на создание технологий, основанных на использовании клеев и герметиков, что увеличивает трудоёмкость и стоимость как проектирования, так и изготовления соединения [4, 5]. Кроме того, перечисленные способы создают значительные трудности при разборке резьбовых соединений. Наиболее важными факторами, определяющими надёжность резьбового соединения как при сборке, так и при разборке, являются деформация элементов соединения и равномерность распределения нагрузки на витках резьбы, которые в основном зависят от характера трения [6, 7]. Перспективным направлением повышения надёжности резьбовых соединений является применение ультразвуковых колебаний, которое позволяет уменьшить трение при сборке и разборке, а также не требует увеличения трудоёмкости изготовления элементов соединения и дополнительных материалов.

Пути совершенствования сборки и разборки резьбовых соединений с применением ультразвука являются: выявление и оптимизация таких значимых технологических характеристик, как типоразмер и расположение соединения, амплитуда колебаний излучателя; выбор эффективного вида колебаний (продольных, продольно-крутильных, сдвиговых); создание рациональных технологических

решений, обеспечивающих повышение качества резьбовых соединений; разработка и создание цифровых продуктов, позволяющих выбирать и поддерживать оптимальные технологические режимы.

Влиянию ультразвуковых колебаний на повышение эффективности процессов сборки и разборки различных соединений деталей машин посвящено значительное количество исследований, в частности [8 – 13]. Однако работы по этому вопросу имеют определенные недостатки. В частности, внимание практически не уделяется факторам, влияющим на сборку, за исключением амплитуды колебаний, что не позволяет проводить комплексную оценку эффективности применения ультразвука при сборке резьбовых соединений. Практически не затронуты такие факторы как масса собираемого соединения и его температура, а также совокупное влияние массы соединения, температуры и амплитуды ультразвуковых колебаний. На основании вышеизложенного можно утверждать, что определение степени влияния таких факторов, как температура и масса соединения на сборку с помощью ультразвука является актуальной задачей.

Методика проведения эксперимента

Экспериментальное исследование по определению влияния ультразвука на сборку проводилось следующим образом – после закручивания болтового соединения с помощью динамометрического ключа до нормативного значения и контроля величины момента закручивания $M_{закр}$ включался источник колебаний. После включения колебаний проводилось дозакручивание соединения до нормативного значения $M_{закр}$ вследствие снижения $M_{закр}$ при наложении ультразвуковых колебаний

Исследования проводились на комплексе ультразвукового оборудования, включающем в себя генератор ГЗ-33, возбуждающий электрические колебания ультразвуковой частоты, генератор УЗГ5-1.6/22, усиливающий мощность сигнала, и магнитострикционную колебательную систему (рис. 1). Частота обработки составляла 22 кГц, тип колебаний – сдвиговые.

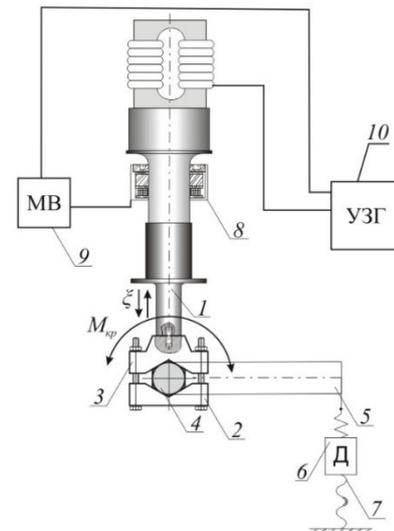


Рис. 1. Схема проведения эксперимента по определению влияния сдвиговых колебаний на процесс сборки:

1 – рабочий инструмент ультразвуковой колебательной системы; 2, 3 – скобы; 4 – болт; 5 – ключ; 6 – динамометр; 7 – винтовая передача; 8 – электродинамический датчик; 9 – милливольтметр; 10 – ультразвуковой генератор

Fig. 1. Scheme of an experiment to determine the effect of shear vibrations on the assembly process:

1 – working tool of an ultrasonic oscillatory system; 2, 3 – staples; 4 – bolt; 5 – wrench; 6 – dynamometer; 7 – screw-type gear; 8 – electrodynamic sensor; 9 – millivoltmeter; 10 – ultrasonic generator

При исследовании влияния массы на сборку в качестве элементов с наружной резьбой использовались оцинкованные болты М8 с крупным шагом, нормальной точности, класс прочности 5.8, в качестве элемента с внутренней резьбой использовалась гайка М8. Масса соединения составляла 15, 20, 25, 30 и 35 г. Амплитуда колебаний составляла 8 мкм. Момент закручивания соединения $M_{закр}$ обеспечивался динамометрическим ключом и контролировался с помощью динамометра и составил 24,5 Н·м.

Для определения влияния температуры собираемого соединения были проведены исследования по сборке с помощью ультразвука соединения М12 длиной 50 мм в диапазоне температур -15...80 °С. Амплитуда колебаний составляла 4 мкм. Такое значение амплитуды позволяет достигать высокой эффективности сборки, при этом не происходит тепловых потерь, влияющих на результаты. Вследствие этого повышается достоверность получаемых значений.

Для определения влияния на собираемое соединение амплитуды колебаний, массы и температуры были проведены исследования по сборке с помощью ультразвука типоразмера М8. Диапазоны значений факторов приведены в табл. 1.

Результаты экспериментов обрабатывались в программе Statistika. Для однофакторных экспериментов оценивалась достоверность полученной модели путем сравнения критериев достоверности для семи различных моделей [14, 15]. Оценка проводилась по совокупности таких показателей, как коэффициент детерминации R^2 , коэффициент корреляции R , F -статистика, уровень значимости p , стандартная ошибка оценки ϵ .

Результаты исследования

Результаты исследования влияния ультразвука на сборку соединения одного типоразмера с различной массой в виде диаграммы рассеяния зависимости относительного момента откручивания от массы соединения при подгонке методом наименьших квадратов представлены на рис. 2.

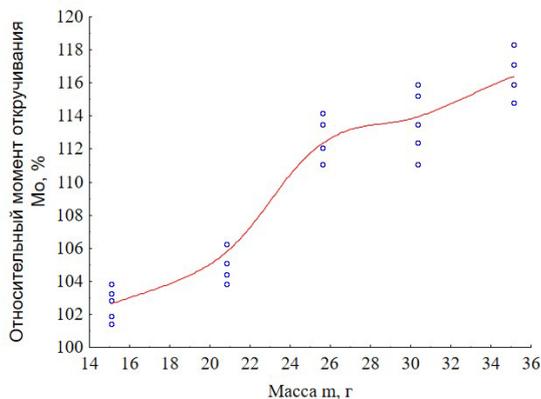


Рис. 2. Зависимость относительного момента откручивания M_o от массы соединения для типоразмера М8 с подгонкой методом наименьших квадратов

Fig. 2. Dependence of the relative torque of unscrewing the M_o on the mass of the joint for the standard size М8 with least-squares deviation method adjustment

По результатам анализа можно определить наиболее точный вид модели и коэффициенты для этой модели. Наиболее достоверной является модель полинома первой степени, описанная формулой:

$$Y = 91,78 + 0,72X, \quad (1)$$

В данном случае коэффициент детерминации $R^2 = 0,88$; коэффициент корреляции $R = 0,94$; значение F -статистики = 168,88 при уровне значимости $p < 0,00000$; значение стандартной ошибки оценки = 1,96. Учитывая вышеизложенное, гипотеза о нулевых значениях коэффициентов регрессии отклоняется. Несмотря на то, что у других моделей значения R^2 и R равны или немного больше, по совокупности факторов полином первой степени является наиболее достоверной моделью.

Окончательный вид модели зависимости относительного момента откручивания от амплитуды колебаний для типоразмера М8 при крутильных колебаниях выглядит как

$$M_o = 91,78 + 0,72m \pm 1,42\epsilon, \quad (2)$$

где m – масса резьбового соединения, г.

Обработка результатов показала, что зависимость является линейной. Это объясняется ступенчатым изменением длины болтов, что в свою очередь обуславливает плавный рост массы соединения, который является линейным.

Результаты определения влияния температуры соединения на сборку в виде диаграммы рассеяния зависимости относительного момента откручивания от температуры соединения при подгонке методом наименьших квадратов представлены на рис. 3.

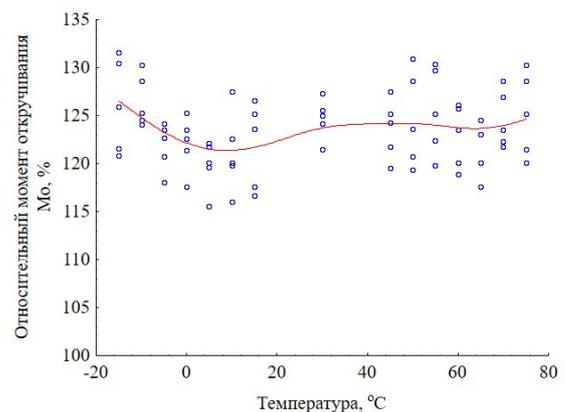


Рис. 3. Зависимость относительного момента откручивания от температуры соединения для типоразмера М12 с подгонкой методом наименьших квадратов

Fig. 3. Dependence of the relative torque of unscrewing on the fastening temperature for the standard size М12 with least-squares deviation method adjustment

По результатам анализа можно определить наиболее точный вид модели и коэффициенты для этой модели. В результате наиболее достоверной является модель полинома третьей степени, показанная в формуле:

$$Y = 122,35 - 0,1409X + 0,0064X^2 - 0,0001X^3, \quad (3)$$

В данном случае коэффициент детерминации $R^2 = 0,11$; коэффициент корреляции $R = 0,33$ для остальных моделей значения R^2 и R меньше указанных. Значение F -статистики = 2,98 при уровне значимости $p < 0,03722$; значение стандартной ошибки оценки = 3,6910. Учитывая вышеизложенное, можно утверждать, что связь между фактором и откликом является слабой и практически не значимой, из чего можно сделать вывод, что на величину M_0 температура соединения не оказывает заметного влияния.

Это также видно на рис. 2. В диапазоне температур $-20...80$ °С усредненные значения M_0 варьируются на 4...5 %. Однако необходимо отметить, что наложение колебаний влияет на такой аспект, как большой разброс значений M_0 . Так, при граничных значениях (-20 и 75 °С) диапазон составляет порядка 10 %, однако при достижении температуры 30 °С разброс снижается до 5...6 %.

Многофакторный эксперимент по определению влияния амплитуды, массы и температуры соединения на сборку был проведен с использованием некомпозиционного плана Бокса-Бенкина второго порядка для трех факторов, с числом опытов $N = 12$ и числом опытов на нулевом уровне факторов $n_0 = 3$. Кодированные значения факторов и соответствующие им физические значения факторов приведены в табл. 1. В качестве параметра оптимизации был выбран M_0 .

1. Кодированные значения факторов

1. Coded values of the factors

Фактор	Обозначение	Уровни варьирования факторов		
		верхний	нулевой	нижний
		Кодированное обозначение		
		+1	0	-1
Амплитуда, мкм	x_1	8	4	0
Масса, г	x_3	35	25	15
Температура, °С	x_2	+70	25	-20

Кодирование уровней факторов проводилось по формуле:

$$x_i = \frac{\bar{x}_i - 0,5(\bar{x}_{i\max} - \bar{x}_{i\min})}{0,5(\bar{x}_{i\max} - \bar{x}_{i\min})} \quad (4)$$

где x_i – кодированный уровень i -го фактора;
 \bar{x}_i – текущее значение i -го фактора;
 $\bar{x}_{i\max}$ – максимальное значение i -го

фактора; $\bar{x}_{i\min}$ – минимальное значение i -го фактора. Полученная модель имеет вид квадратичного полинома:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (5)$$

Следует отметить, что, поскольку переменные в данной модели закодированы, коэффициенты $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}...$ являются оценками истинных коэффициентов [16]. При этом перевести полученную модель вида (5) в модель, содержащую натуральные факторы, не

рекомендуется, поскольку это резко ухудшает возможность интерпретации модели и принятие по ней технико-экономических решений. Матрица плана и результаты эксперимента приведены в табл. 2.

2. Матрица плана и результаты эксперимента

2. The matrix of the plan and the results of the experiment

№	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y
1	-1	-1	0	+1	0	0	+1	+1	0	102,82
2	+1	-1	0	-1	0	0	+1	+1	0	178,9
3	-1	+1	0	-1	0	0	+1	+1	0	103,85
4	+1	+1	0	+1	0	0	+1	+1	0	176,5
5	-1	0	-1	0	+1	0	+1	0	+1	101,76
6	+1	0	-1	0	-1	0	+1	0	+1	171,9
7	-1	0	+1	0	-1	0	+1	0	+1	107,38
8	+1	0	+1	0	+1	0	+1	0	+1	182,51
9	0	-1	-1	0	0	+1	0	+1	+1	139,76
10	0	+1	-1	0	0	-1	0	+1	+1	140,69
11	0	-1	+1	0	0	-1	0	+1	+1	146,79
12	0	+1	+1	0	0	+1	0	+1	+1	145,43
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	141,68
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	137,25
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	143,93
Σ	294	-1,8	28	-3,43	4,99	-2,29	1125,62	1134,74	1136,22	2121,15

Ошибка S_y и дисперсия параметра S_y^2 находятся по результатам трех опытов на нулевом уровне факторов и составляют $S_y = 3,4$ и

$S_y^2 = 11,55$. Значения коэффициентов b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} определяются по соотношениям (6) – (9):

$$b_0 = \frac{1}{n_0} * \sum_{n=1}^{n_0} y_{0n}, \quad (6)$$

$$b_i = A \sum_{n=1}^N x_{in} y_n, \quad (7)$$

$$b_{ij} = D \sum_{n=1}^N x_{in} x_{jn} y_n, \quad (8)$$

$$b_{ii} = B \sum x_{in}^2 y_n + C \sum_{i=1}^k \sum_{n=1}^N x_{in}^2 y_n - \frac{\sum_{n=1}^{n_0} y_{0n}}{n_0 p}, \quad (9)$$

где k – число факторов; y_{0n} – значение параметра оптимизации на нулевом уровне факторов; y_n – значение параметра оптимизации в n -й строке матрицы; x_i – кодированные уровни факторов; $A = 0,125$; $B = 0,25$; $C = 0,0625$; $D = 0,25$; $p = 2$.

Значимость коэффициентов определяется по формуле:

$$\Delta b_i = \pm t \cdot S_{bi}; \quad (10)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента при уровне доверия $\alpha = 0,05$; S_{bi} – ошибка определения коэффициентов b_i ,

определяемая как $S_{bi} = \sqrt{S_{bi}^2}$, где S_{bi}^2 – дисперсия при определении коэффициентов.

Дисперсии коэффициентов определяются как:

$$S_{bi}^2 = AS_y^2, \quad (11)$$

$$S_{bij}^2 = DS_y^2, \quad (12)$$

$$S_{bii}^2 = (B + \frac{1}{p^2 n_0}) S_y^2. \quad (13)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 3

3. Значения коэффициентов расчетной математической модели

3. The values of the coefficients of the calculated mathematical model

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
b_0	140,95	b_{11}	-0,43	S_{bij}	1,70
b_1	36,75	b_{22}	1,6	S_{bii}	1,96
b_2	-0,23	b_{33}	-0,14	ΔS_{b0}	7,24
b_3	3,50	S_{bi}^2	1,44	ΔS_{bi}	2,56
b_{12}	-0,86	S_{bij}^2	2,89	ΔS_{bij}	3,62
b_{13}	1,25	S_{bii}^2	3,85	ΔS_{bii}	4,18
b_{23}	-0,57	S_{bi}	1,20		

Расчеты показывают, что значимыми являются коэффициенты b_0, b_1, b_3 , в связи с чем итоговая зависимость имеет следующий вид (14):

$$y = 140,95 + 36,75x_1 + 3,50x_3, \quad (14)$$

Проверка адекватности полученного уравнения проводится по критерию Фишера $F = S_{ад}^2/S_y^2$. $S_{ад}$ – дисперсия адекватности, которая определяется как (15):

$$S_{ад} = \frac{SS_{ост} - SS_y}{N - m - (n_0 - 1)}, \quad (15)$$

где m – число значимых коэффициентов;

$$SS_{ост} = \sum_{n=1}^N (\hat{y}_n - y_n)^2;$$

$$SS_y = \sum_{n=1}^{n_0} (y_{0n} - \bar{y}_0)^2;$$

\bar{y}_0 – среднее значение параметра оптимизации трех опытов на нулевом уровне факторов; $(\hat{y}_n - y_n)$ – разность между расчетным значением и опытным значением.

В данном случае $SS_y = 23,1$, $SS_{ост} = 58,47$. Следовательно, $F = 10,34/11,55 < 1$, т. е. уравнение адекватно при всех уровнях доверия α .

Анализ уравнения показывает, что наибольшее влияние на M_0 оказывает x_1 , (амплитуда колебаний), x_3 (масса соединения) влияет незначительно, а x_2 (температура соединения) не влияет вообще. Кроме того, можно говорить об отсутствии корреляции между факторами. Таким образом, чем больше амплитуда колебаний и масса соединения – тем больше эффективность применения ультразвука на

этапе сборки соединения в сравнении с традиционным методом сборки.

Дополнительно в программе Statistica была проведена проверка на предмет взаимосвязи между влияющими факторами, для чего была проанализирована корреляционная матрица (рис. 4). Анализ показал, что корреляция отсутствует полностью и факторы между собой никак не связаны.

N=15				
Переменная	X1	X2	X3	Y
X1	1,00	-0,00	-0,00	0,99
X2	-0,00	1,00	0,00	-0,01
X3	-0,00	0,00	1,00	0,09
Y	0,99	-0,01	0,09	1,00

Рис. 4. Корреляционная матрица параметров

Fig. 4. The correlation matrix of the parameters

Также с целью проверки полученных результатов расчетным методом в программе Statistica была получена математическая модель методом факторного анализа без поворота осей. Данный метод был выбран, поскольку даже при числе главных компонент, равном трем, доля общей дисперсии, обработанной тремя факторами, составляет 99,9 % (рис. 5)

Перемен.	Фактор		
	1	2	3
X1	0,579524	0,000000	0,814955
X2	0,814955	0,000000	-0,579524
X3	0,000000	1,000000	0,000000
Общ дис.	1,000000	1,000000	1,000000
Доля общ	0,333333	0,333333	0,333333

Рис. 5. Факторы нагрузки методом анализа без поворота осей

Fig. 5. Load factors using the analysis method without rotation of axes

Отсюда связь между главными компонентами и нормализованными факторами представляется в виде:

$$F_1 = 0,579524X_1 + 0,814955X_2; \quad (16)$$

$$F_2 = X_3; \quad (17)$$

$$F_3 = 0,814955X_1 - 0,579524X_2; \quad (18)$$

С помощью инструмента «множественная регрессия» были определены основные параметры искомой модели (рис. 6):

R= ,99749029 R2= ,99498688 Скоорект. R2= ,99361966
F(3,11)=727,75 p<,00000 Станд. ошибка оценки: 2,2347

N=15	БЕТА	Ст.Ош. БЕТА	B	Ст.Ош. B	t(11)	p-знач.
Св.член			141,4100	0,576999	245,0786	0,000000
Ф1	0,570500	0,021348	15,9608	0,597250	26,7238	0,000000
Ф2	0,094569	0,021348	2,6458	0,597250	4,4299	0,001012
Ф3	0,812756	0,021348	22,7383	0,597250	38,0717	0,000000

Рис. 6. Основные параметры модели, основанной на независимых факторах

Fig. 6. The main parameters of the model based on independent factors

Модель, основанная на независимых факторах, имеет вид (19):

$$Y = 141,41 + 15,9608F_1 + 2,6458F_2 + 22,7383F_3 \quad (19)$$

После подстановки на место независимых факторов нормализованных физических факторов получаем модель вида:

$$Y = 141,41 + 27,78X_1 - 0,17X_2 + 2,65X_3 \quad (20)$$

Анализ с использованием программы Statistica показал результаты, схожие с результатами, полученными первым методом, за исключением наличия минимального отрицательного влияния температуры. Факт такого расхождения косвенно подтверждается граничным коэффициентом корреляции для зависимости M_0 от температуры. Также подтверждается отсутствие корреляции между факторами. Таким образом можно утверждать, что влияющими факторами являются амплитуда и масса, и чем больше амплитуда колебаний и масса соединения – тем больше эффективность применения ультразвука на этапе сборки соединения в сравнении с традиционным методом сборки.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования показали, что факторы температуры и массы собираемого резьбового соединения при сборке с ультразвуком влияют на процесс сборки по-разному, в частности:

– увеличение массы собираемого резьбового соединения увеличивает эффективность применения ультразвука. Так, при увеличении массы в 2 раза (с 15 до 30 г) создаваемое осевое усилие увеличивается на 10 %, при этом наблюдается линейная зависимость увеличения эффективности в зависимости от увеличения массы.

– увеличение или уменьшение температуры практически не оказывает влияния на эффективность сборки, что подтверждается статистической обработкой, которая показывает малую связь между откликом и фактором. При этом применение ультразвука в зависимости от температуры влияет на разброс полученных значений в рамках одной точки – полученные значения варьируются в диапазоне 5 % при 30 °С и в диапазоне 10 % при граничных значениях (-20 и 75 °С).

Результаты многофакторного эксперимента подтвердили характер влияния амплитуды колебаний, массы и температуры собираемого соединения, выявив значимость

факторов амплитуды и массы, при этом фактором температуры можно пренебречь ввиду его малого влияния.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Хажметов Л.М. и др. Повышение эксплуатационной надежности сельскохозяйственных машин // Техника и оборудование для села. 2023. № 4 (310). С. 12–16. DOI 10.33267/2072-9642-2023-4-12-16. – EDN NHJDDY.

2. Липка В.М., Копп В.Я., Рапачкий Ю.Л. Исследование возможности повышения надежности резьбовых соединений, получаемых автоматизированной сборкой, на основе рационального выбора параметров резьбонакатывания // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: материалы международной научно-технической конференции, Севастополь, 07–11 сентября 2015 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2015. С. 46–49. EDN VXSNTZ.

3. Рапачкий Ю.Л., Липка В.М., Хаустович А.Г. Повышение качества автоматизированной сборки резьбовых соединений на основе системы активного контроля параметров затяжки // Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения: материалы международной научно-технической конференции, Севастополь, 05–09 сентября 2016 года / Севастопольский государственный университет; науч. ред. В.Я. Копп. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2016. С. 35–36. EDN WPWHQR.

4. Белевский Л.С., Ефимова Ю.Ю., Дема Р.Р. и др. Испытания резьбовых покрытий муфт насосно-компрессорных труб на муфтонаверточной машине // Тяжелое машиностроение. 2021. № 7-8. С. 39–44. EDN FYKKTG.

5. Винников Д.А., Ягопольский А.Г., Комкова Т.Ю. Фиксация резьбовых соединений в конструкции распорки-гасителя // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 4. С. 5–9. EDN XNRBTN.

6. Иванов А.С., Муркин С.В., Новиков Е.С. Влияние контргайки на распределение нагрузки по виткам резьбы винта затянутого резьбового соединения // Вестник машиностроения. 2024. Т. 103, № 3. С. 189–192. DOI 10.36652/0042-4633-2024-103-3-189-192. EDN NIBTZM.

7. Прокофьев А.Н. Технологическое обеспечение и повышение качества резьбовых соединений: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Прокофьев Александр Николаевич. Брянск, 2008. 34 с. EDN NJIWRZ.

8. Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Сухов А.В., Фатюхин Д.С. Особенности сборки резьбовых соединений различных размеров при использовании сдвиговых ультразвуковых колебаний // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2021. № 12 (126). С. 26–30. DOI 10.30987/2223-4608-2021-12-26-30. EDN SLAKSG.

9. Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Sukhov A.V. et al. Improvement of Threaded-Joint Assembly Using Ultrasound // Russian Engineering Research. 2021. Vol. 41, No. 6. P. 567–569. DOI 10.3103/S1068798X21060150. – EDN AHAISB.

10. Nechai A.A., Nigmatzyanov R.N., Sundukov S.K. et al. Assembly of Threaded Joints in the Presence of Shear Ultrasound // Russian Engineering Research. 2022. Vol. 42, No. 2. P. 169–171. DOI 10.3103/S1068798X22020174. EDN LEXJUE.

11. Нечай А.А., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К. и др. Сборка резьбовых соединений под воздействием сдвиговых ультразвуковых колебаний // СТИН. 2021. № 12. С. 16–19. EDN EOHUYR.

12. Вишневская А.Н. Повышение производительности и качества ультразвуковой сборки резьбовых соединений // Ультразвук: проблемы, разработки, перспективы: Материалы международной научной конференции, Уфа, 25–29 сентября 2017 года / Ответственный редактор А.А. Назаров. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2017. С. 24–26. EDN YRBVOS.

13. Шуваев В.Г., Шуваев И.В. Повышение надежности резьбовых соединений применением ультразвуковой сборки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4-2. С. 394–398. EDN XAZQBT.

14. Использование модулей программы STATISTICA и расчетных моделей для решения научных задач в области технической эксплуатации автомобилей: учебное пособие для студентов, магистрантов и аспирантов учреждений высшего образования / А.П. Болдин, В.Н. Богумил. М.: Техполиграфцентр, 2016. 154 с.

15. Основы научных исследований: учебник для студ. Учреждений высш. проф. образования / А.П. Болдин, В.А. Максимов. М.: Издательский центр «Академия», 2012. 336 с.

16. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Статистика, 1981. 264 с.

REFERENCES

1. Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A., Khazhmetov L.M., et al. Improving the operational reliability of agricultural machinery // Machinery and equipment for rural areas. 2023, no. 4 (310), pp. 12–16. DOI 10.33267/2072-9642-2023-4-12-16. EDN NHJDDY.

2. Lipka V.M., Kopp V.Ya., Rapatsky Yu.L. Investigation of the possibility of preventing the sudden destruction of threaded connections containing parts with external threads is demonstrated by the optimal choice of the parameters of the thread-rolling process. // Automation: problems, ideas, solutions: proceedings of the international scientific and technical conference, Sevastopol, September 07-11, 2015. Sevastopol: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University», 2015. pp. 46-49. EDN VXSNTZ.

3. Rapatsky Yu.L., Lipka V.M., Khaustovich A.G. Improving the quality of automated assembly of threaded connections based on a system of active control of tightening

parameters // Automation and instrumentation: problems, solutions : materials of the international scientific and technical conference, Sevastopol, 05-09 September 2016 / Sevastopol State University; scientific ed. by V.Ya. Kopp. – Sevastopol: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University», 2016. pp. 35–36. EDN WPWHQR.

4. Belevsky L.S., Efimova Yu.Y., Dema R.R., et al. Tests of threaded coatings of tubing couplings on a coupling winding machine. // Heavy engineering. 2021, no. 7-8. pp. 39–44. EDN FYKKTf.

5. Vinnikov D.A., Yagopolsky A.G., Komkova T.Y. Fixation of threaded connections in construction of spacer damper // Repair. Rebuild. Modernization. 2018, no. 4, pp. 5–9. EDN XNRBTN.

6. Ivanov A.S., Murkin S.V., Novikov E.S. Effect of a locknut on load distribution along the threads of the screw of a tightened threaded connection // Bulletin of Mechanical Engineering. 2024, vol. 103, no. 3, pp. 189–192. DOI 10.36652/0042-4633-2024-103-3-189-192. EDN NIBTZM.

7. Prokofiev A.N. Technological support and quality improvement of threaded connections: specialty 05.02.08 «Technology of mechanical engineering»: thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences / Prokofiev Alexander Nikolaevich. Bryansk, 2008. 34 p. EDN NJIWRZ.

8. Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S. Assembly features of threaded fastenings having various sizes when using shear ultrasonic vibrations // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2021, no. 12 (126), pp. 26–30. DOI 10.30987/2223-4608-2021-12-26-30. EDN SLAKSG.

9. Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Sukhov A.V. et al. Improvement of Threaded-Joint Assembly Using Ultrasound // Russian Engineering Research. 2021. Vol. 41,

No. 6. P. 567–569. DOI 10.3103/S1068798X21060150. – EDN AHAISB.

10. Nechai A.A., Nigmatzyanov R.N., Sundukov S.K. et al. Assembly of Threaded Joints in the Presence of Shear Ultrasound // Russian Engineering Research. 2022. Vol. 42, No. 2. P. 169–171. DOI 10.3103/S1068798X22020174. EDN LEXJUE.

11. Nechai A.A., Nigmatzyanov R.N., Sundukov S.K., et al. Assembly of threaded joints in the presence of shear ultrasound // STIN. 2021, no 12, pp. 16-19. EDN EOHUYR.

12. Vishnevskaya A.N. Improving the productivity and quality of ultrasonic assembly of threaded connections // Ultrasound: problems, developments, prospects: Proceedings of the international scientific conference, Ufa, September 25-29, 2017 / The responsible editor is A.A. Nazarov. Ufa: Bashkir State University, 2017, pp. 24–26. EDN YRBVOS.

13. Shuvaev V.G., Shuvaev I.V. Improving the reliability of threaded connections using ultrasonic assembly // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016, vol. 18, no. 4-2, pp. 394–398. EDN XAZQBT

14. Use of modules of the STATISTICA program and computational models for solving scientific problems in the field of technical operation of automobiles: a textbook for students, undergraduates and postgraduates of institutions of higher education / A.P. Boldin, V.N. Bogumil. Moscow: Technopoligrftsentr, 2016, 154 p.

15. Fundamentals of scientific research: a textbook for students. Institutions of higher Prof. education / A.P. Boldin, V.A. Maksimov. Moscow: Publishing Center «Academy», 2012, 336 p.

16. Voznesensky V. A. Statistical methods of experiment planning in technical and economic research. Moscow: Statistik Publ, 1981, 264

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.12.2024; одобрена после рецензирования 22.01.2025; принята к публикации 30.01.2025.

The article was submitted 26.12.2024; approved after reviewing 22.01.2025; assepted for publication 30.01.2025.