

УДК 621.81: 621.88

doi: 10.21685/2072-3059-2024-4-10

Новая методика проектирования соединений с натягом при применении упрочняющей технологии

И. И. Воячек¹, Д. В. Кочетков², А. Д. Тарханов³, Ю. В. Истомина⁴

^{1,2,3,4}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹voyachek@list.ru, ²denis.kochetkov80@yandex.ru,

³tmspgu@mail.ru, ⁴u.istomina@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* При общепринятой методике проектирования соединений с натягом используется метод полной взаимозаменяемости или теоретико-вероятностный метод. При реализации этих методов подавляющее большинство соединений в партии имеют существенно избыточный запас прочности, что приводит к дополнительным затратам. Возможность упрочнения соединений при сборке, например путем применения анаэробных материалов, позволяет реализовать другой, более рациональный, подход к их проектированию. *Материалы и методы.* Предлагаемая методика базируется на предположении, что определенная (задаваемая) часть партии соединений будет упрочняться путем применения анаэробных материалов, так как не может с назначенным запасом прочности передавать эксплуатационную нагрузку. Используется вероятностный подход. Рассматривается нормальное и равномерное распределения размеров деталей в партии. *Результаты.* Приводится теоретическое обоснование новой методики и подтверждение ее эффективности при компьютерном моделировании процесса изготовления партии соединений с натягом. *Выводы.* Методика позволяет существенно снизить уровень натягов в соединении и назначить более широкие допуски на размеры сопрягаемых деталей без потери функциональных свойств.

Ключевые слова: соединения с натягом, методика проектирования, вероятностный подход, анаэробные материалы, избирательное упрочнение

Для цитирования: Воячек И. И., Кочетков Д. В., Тарханов А. Д., Истомина Ю. В. Новая методика проектирования соединений с натягом при применении упрочняющей технологии // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 4. С. 118–129. doi: 10.21685/2072-3059-2024-4-10

New methodology for designing tension joints using strengthening technology

I.I. Voyachek¹, D.V. Kochetkov², A.D. Tarkhanov³, Yu.V. Istomina⁴

^{1,2,3,4}Penza State University, Penza, Russia

¹voyachek@list.ru, ²denis.kochetkov80@yandex.ru,

³tmspgu@mail.ru, ⁴u.istomina@mail.ru

Abstract. *Background.* The generally accepted design methodology for tension joints uses the method of complete interchangeability or the probability-theoretical method. When implementing these methods, the vast majority of connections in a batch have a significantly excess safety factor, which leads to additional costs. The possibility of strengthening joints during assembly, for example, by using anaerobic materials, allows for a different, more rational approach to their design. *Materials and methods.* The proposed method is

based on the assumption that a certain (specified) part of a batch of compounds will be strengthened by using anaerobic materials, since it cannot transfer the operational load with the designated safety margin. A probabilistic approach is used. Normal and uniform distributions of part sizes in a batch are considered. *Results.* The theoretical substantiation of the new method and confirmation of its effectiveness in computer modeling of the manufacturing process of a batch of tension joints are presented. *Conclusions.* The technique allows to significantly reduce the level of tension in the connection and assign wider tolerances to the dimensions of the mating parts without losing functional properties.

Keywords: tension joints, design methodology, probabilistic approach, anaerobic materials, selective strengthening

For citation: Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Tarkhanov A.D., Istomina Yu.V. New methodology for designing tension joints using strengthening technology. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(4):118–129. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-4-10

Введение

При проектировании соединений с натягом (СН) методом полной взаимозаменяемости применяется стандартная методика [1–3], согласно которой определяется минимально необходимый расчетный натяг $N_{\min}^P$ для передачи эксплуатационной нагрузки P_3 с заданным запасом прочности (коэффициент n_3) $P = n_3 P_3$. Затем выбирается стандартная посадка с натягом по условию (метод полной взаимозаменяемости) $N_{\min}^{\Pi} \geq N_{\min}^P$, где $N_{\min}^{\Pi}$ – минимальный натяг посадки. Таким образом, практически все соединения с натягом в партии деталей, у которых действительный натяг находится в диапазоне $N_{\min}^{\Pi} < N_d \leq N_{\max}^{\Pi}$, имеют избыточный запас прочности. При максимальных натягах посадки коэффициент запаса прочности может достигать значений $n_{\max} = (3...4)n_3$. Это приводит к повышенным затратам при сборке СН из-за неоправданного увеличения усилия запрессовки или энергозатрат при поперечной сборке. Часто соединение с большими натягами невозможно собрать из-за пластических деформаций деталей и схватывания сопрягаемых поверхностей при сборке.

Более целесообразным является вероятностный подход к проектированию СН, так как при изготовлении партий СН реализуются два случайных процесса, оказывающих решающее влияние на параметры соединений, их вариацию и, естественно, на уровень дефектности партии:

1) случайное распределение сопрягаемых размеров деталей в партии при изготовлении;

2) случайное сочетание пар деталей при сборке.

Влияние случайных процессов на уровень дефектности в партии СН полностью исключается при их проектировании и изготовлении на основе метода полной взаимозаменяемости при условии нахождения сопрягаемых размеров деталей в пределах допуска. Классический теоретико-вероятностный метод [2] предполагает допустимым уровень дефектности партии СН в 0,27 %, нормальное распределение размеров деталей и натягов и не предполагает упрочнение соединений при сборке.

На рис. 1 показана схема формирования натягов в партии сборочных единиц при реализации указанных выше случайных процессов. Для простоты и наглядности предполагается, что распределения размеров валов и отверстий подчиняются закону нормального распределения, хотя данная схема применима к любому распределению размеров.

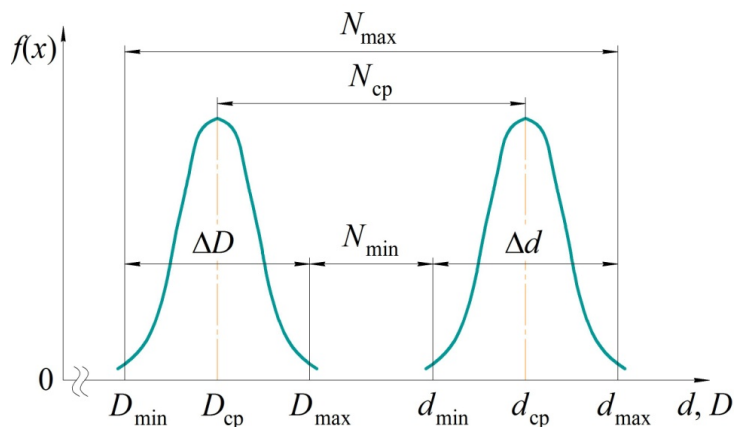


Рис. 1. Схема формирования натягов в партии сборочных единиц

Уменьшить влияние случайного распределения сопрягаемых размеров деталей в партии на изменение натяга можно путем повышения статистической стабильности технологических процессов их изготовления, исключения особых причин изменчивости, достижения идентичного закона распределения сопрягаемых размеров соединяемых деталей и др. Этот путь достаточно труден и затратен, связан с совершенствованием технологических процессов изготовления деталей ССН.

Значительно проще улучшать процессы организации и технологии сборки ССН. Один из подходов заключается, например, в реализации селективной сборки [4], в частности индивидуальной селективной сборки ССН [5]. Другой подход основан на технологии избирательного упрочнения ССН при сборке с анаэробными материалами (АМ), полимеризующимися в пустотах зоны контакта деталей и повышающими прочность соединений [6–8]. Предполагаемое применение упрочняющей технологии при сборке позволяет использовать новую, более рациональную методику проектирования ССН. Данный подход подтверждает эффективность разработанной И. И. Воячком [3] интеграционной конструкторско-технологической системы проектирования неподвижных соединений.

Теоретическое обоснование новой методики проектирования

При реализации предлагаемой методики применяется вероятностный подход к определению параметров деталей и соединения. Предполагается, что распределения размеров вала, отверстия во втулке и натяга подчиняются нормальному или равномерному законам распределения случайных величин.

Методика базируется на предположении, что определенная (задаваемая) часть партии ССН будет упрочняться путем применения АМ, так как не может с назначенным запасом прочности передавать эксплуатационную

нагрузку. Таким образом, вероятностный минимальный натяг в партии ССН при выборе посадки может быть меньше расчетного значения $N_{\min, \text{в}}^{\text{п}} < N_{\min}^{\text{р}}$.

Методика позволяет существенно снизить уровень натягов в соединении и назначить более широкие допуски на размеры сопрягаемых деталей без потери функциональных свойств.

Используемые параметры:

$\delta_{\max}$ – назначенная максимальная доля соединений в партии, требующих упрочнения;

$\delta^{\text{п}}$ – доля соединений в партии, требующих упрочнения при выбранной посадке;

$T_{\text{в}}$ и $T_{\text{вт}}$ – допуски вала и отверстия во втулке;

$\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{\text{вт}}$ – среднеквадратичные отклонения размеров вала и отверстия во втулке;

$d_{\min}$, $d_{\max}$ – минимальный и максимальный предельные размеры диаметра вала, d_m – средний размер;

$D_{\min}$, $D_{\max}$ – минимальный и максимальный предельные размеры диаметра отверстия, D_m – средний размер;

$N_{\min}^{\text{п}}$, $N_{\max}^{\text{п}}$, $N_m^{\text{п}}$ – минимальный, максимальный и средний натяги посадки;

$N_{\min, \text{в}}^{\text{п}}$ – минимальный вероятностный натяг посадки;

$TN_{\text{в}}^{\text{п}}$ и $TN_{\text{вт}}^{\text{п}}$ – табличный и вероятностный допуски посадки;

$\sigma_N^{\text{п}}$ – среднеквадратичное отклонение натяга в посадке;

$\Phi(z^{\text{AM}})$ – интеграл Лапласа при квантиле z^{AM} , соответствующем доле $\delta_{\max}$.

Основные соотношения, применяемые в методике проектирования:

$$\delta^{\text{п}} \leq \delta_{\max}, \quad (1)$$

$$N_{\min, \text{в}}^{\text{п}} = N_m^{\text{п}} - \frac{TN_{\text{в}}^{\text{п}}}{2}. \quad (2)$$

При нормальном распределении:

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{T_{\text{в}}}{6}, \quad \sigma_{\text{вт}} = \frac{T_{\text{вт}}}{6}, \quad (3)$$

$$\sigma_N^{\text{п}} = \sqrt{\sigma_{\text{в}}^2 + \sigma_{\text{вт}}^2}, \quad (4)$$

$$TN_{\text{в}}^{\text{п}} = 6\sigma_N^{\text{п}}. \quad (5)$$

Квантиль, соответствующий минимальному расчетному натягу в выбранной по предлагаемой методике посадки, рассчитывается по формуле

$$z^{\text{AM}} = \frac{N_m^{\text{II}} - N_{\min}^{\text{P}}}{\sigma_N^{\text{II}}} . \quad (6)$$

По таблицам находится интеграл Лапласа $\Phi(z^{\text{AM}})$ и вероятностная доля ССН, требующих упрочнения, рассчитывается по формуле

$$\delta^{\text{II}} = 0,5 - \Phi(z^{\text{AM}}) . \quad (7)$$

Проверяется неравенство (1).

При равномерном распределении. Сумма двух законов равномерного распределения при условии, что диапазоны изменения случайных величин (СВ) равны, подчиняется закону Симпсона или треугольника. Если диапазоны изменения не равны, но соизмеримы, то считается, что закон Симпсона можно применить с некоторым приближением, что для оценки соотношения (1) вполне допустимо.

Таким образом, если распределение размеров в партии соединяемых валов и втулок подчиняется закону равномерного распределения, то

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{T_{\text{в}}}{2\sqrt{3}}, \quad \sigma_{\text{вт}} = \frac{T_{\text{вт}}}{2\sqrt{3}}, \quad (8)$$

$$TN_{\text{в}}^{\text{II}} = 2\sqrt{6} \sigma_N^{\text{II}} . \quad (9)$$

Функция распределения закона Симпсона слева от математического ожидания M описывается зависимостью (L – половина диапазона рассеивания СВ):

$$F(x) = \frac{[x - (M - L)]^2}{2L^2} . \quad (10)$$

Применительно к соединению с натягом (сумма двух законов равномерного распределения) формула (10) преобразуется к виду

$$F(N) = \frac{\left[N - \left(N_m^{\text{II}} - \frac{TN^{\text{II}}}{2} \right) \right]^2}{2 \left(\frac{TN^{\text{II}}}{2} \right)^2} . \quad (11)$$

Можно с некоторым приближением принять, что

$$F(N) = F(N_{\min}^{\text{P}}) = \delta^{\text{II}}, \quad (12)$$

для этого в формулу (11) нужно подставить $N = N_{\min}^{\text{P}}$.

Значение δ^{II} находится по следующему алгоритму:

1. По известной методике определяется минимальный расчетный натяг $N_{\min}^{\text{P}}$, обеспечивающий передачу эксплуатационной нагрузки.

2. Назначается допустимая максимальная доля соединений в партии, требующих упрочнение $\delta_{\max}$.

3. Выбирается стандартная посадка, у которой минимальный натяг посадки, а также минимальный вероятностный натяг меньше расчетного значения:

$$N_{\min}^{\Pi} < N_{\min}^P, \quad (13)$$

$$N_{\min, \text{в}}^{\Pi} < N_{\min}^P. \quad (14)$$

При этом можно принять, что максимальный натяг посадки и максимальный расчетный натяг по методу максимума-минимума должны соответствовать соотношению

$$N_{\max}^{\Pi} \leq N_{\max}^P. \quad (15)$$

4. Когда посадка выбрана, проводится проверочный расчет, чтобы обеспечить неравенство (1).

При нормальном распределении используются соотношения (1)–(7).

При равномерном распределении применяются соотношения (1), (2), (8)–(12).

Пример проектирования соединений по новой методике

1. Исходные данные. Объем собираемой партии ССН $N = 100$ соединений. Посадочный диаметр $D = 40$ мм. Минимальный расчетный натяг $N_{\min}^P = 0,0175$ мм = 17,5 мкм, максимальный расчетный натяг $N_{\max}^P = 70$ мкм. Допустимая максимальная доля соединений в партии, требующих упрочнения, $\delta_{\max} = 0,1$.

2. По методу полной взаимозаменяемости была выбрана посадка $\text{Ø}40\text{H}7/\text{s}6$ ($N_{\min}^{\Pi} = 18$ мкм, $N_{\max}^{\Pi} = 59$ мкм, $N_m^{\Pi} = 38,5$ мкм, $TN^{\Pi} = 41$ мкм). По новой методике предлагается выбрать посадку $\text{Ø}40\text{H}8/\text{s}7$ ($N_{\min}^{\Pi} = 4$ мкм, $N_{\max}^{\Pi} = 68$ мкм, $N_m^{\Pi} = 36$ мкм, $TN^{\Pi} = 64$ мкм). Допуск диаметра вала $\text{Ø}40\text{s}7$ – $T_{\text{в}} = 25$ мкм, допуск диаметра отверстия $\text{Ø}40\text{H}8$ – $T_{\text{вт}} = 39$ мкм. Диаметры: $d_{\min} = 40,043$ мм, $d_{\max} = 40,068$ мм, $d_m = 40,0555$ мм; $D_{\min} = 40$ мм, $D_{\max} = 40,039$ мм, $D_m = 40,0195$ мм. На рис. 2 показаны схемы полей допусков выбранных посадок.

3. Принимается, что размеры деталей подчиняются нормальному закону распределения. По формулам (3) и (4) находятся параметры:

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{T_{\text{в}}}{6} = \frac{25}{6} = 4,17 \text{ мкм},$$

$$\sigma_{\text{вт}} = \frac{T_{\text{вт}}}{6} = \frac{39}{6} = 6,5 \text{ мкм},$$

$$\sigma_N^{\Pi} = \sqrt{\sigma_{\text{в}}^2 + \sigma_{\text{вт}}^2} = \sqrt{4,17^2 + 6,5^2} = 7,72 \text{ мкм}.$$

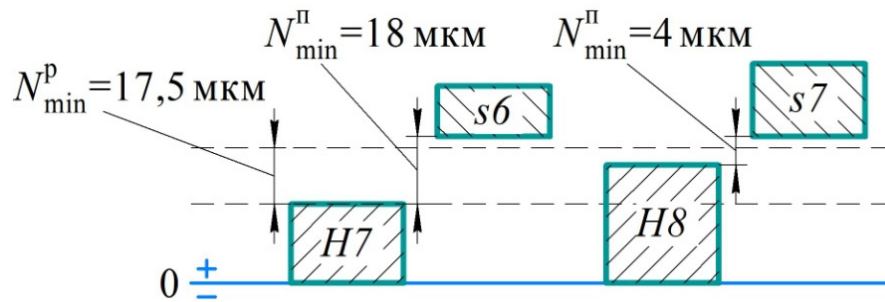


Рис. 2. Схемы расположения полей допусков выбранных посадок

Вероятностный допуск посадки с натягом равен

$$TN_B^П = 6\sigma_N^П = 6 \cdot 7,72 = 46,32 \text{ мкм},$$

что существенно меньше табличного значения.

Таким образом, вероятностное значение минимального натяга в посадке при законе нормального распределения равно

$$N_{\min,в}^П = N_m^П - \frac{TN_B^П}{2} = 36 - 23,16 = 12,84 \text{ мкм},$$

что больше, чем табличное значение, но меньше расчетного минимального натяга. Возможность выхода за пределы вероятностного значения минимального натяга в соответствии с законом нормального распределения оценивается в 0,135 %.

4. По формуле (6) определяется квантиль:

$$z^{AM} = \frac{N_m^П - N_{\min}^П}{\sigma_N^П} = \frac{36 - 17,5}{7,72} = 2,39.$$

Интеграл Лапласа, соответствующий данному квантилю, равен

$$\Phi(z^{AM}) = 0,4916.$$

5. По формуле (7) находится значение

$$\delta^П = 0,5 - 0,4916 = 0,0084.$$

6. Соотношение (1) при нормальном законе распределения выполняется с большим запасом $0,0084 < 0,1$.

7. Если распределение размеров в партии соединяемых валов и втулок подчиняется закону равномерного распределения, то

$$\sigma_B = \frac{T_B}{2\sqrt{3}} = \frac{25}{2\sqrt{3}} = 7,217 \text{ мкм}, \quad \sigma_{BT} = \frac{T_{BT}}{2\sqrt{3}} = \frac{39}{2\sqrt{3}} = 11,258 \text{ мкм}.$$

По формуле (4) получаем

$$\sigma_N^П = \sqrt{\sigma_B^2 + \sigma_{BT}^2} = \sqrt{7,217^2 + 11,258^2} = 13,37 \text{ мкм}.$$

Вероятностный допуск посадки с натягом:

$$TN_B^{\Pi} = 2\sqrt{6} \sigma_N^{\Pi} = 4,9 \cdot 13,37 = 65,5 \text{ мкм},$$

что больше табличного значения.

Таким образом, вероятностное значение минимального натяга в посадке при законе равномерного распределения

$$N_{\min, B}^{\Pi} = N_m^{\Pi} - \frac{TN_B^{\Pi}}{2} = 36 - 32,75 = 3,25 \text{ мкм},$$

что близко к табличному значению минимального натяга посадки.

Если бы диапазоны изменения размеров вала и отверстия были равны, то вероятностные значения допуска и минимального натяга посадки при равномерном распределении равнялись табличным значениям.

В соответствии с рассматриваемым примером $N = N_{\min}^P = 17,5 \text{ мкм}$, $N_m^{\Pi} = 36 \text{ мкм}$, $TN^{\Pi} = 64 \text{ мкм}$. Согласно соотношению (12) можно с некоторым приближением принять, что $F(N) = F(N_{\min}^P) = \delta^{\Pi}$, следовательно

$$\delta^{\Pi} = \frac{[17,5 - 4]^2}{2 \cdot 32^2} = 0,089 < 0,1.$$

Таким образом, даже с учетом приблизительной оценки δ^{Π} соотношение (1) выполняется.

Статистическое моделирование процессов изготовления и сборки деталей ССН

Для подтверждения разработанной методики применялось статистическое моделирование процессов изготовления и сборки деталей в программе Excel.

Моделирование проводилось по следующему алгоритму.

1. Исходные данные соответствовали выбранной посадке $\varnothing 40H8/s7$, расчетный натяг $N_{\min}^P = 17,5 \text{ мкм}$.

2. В программе Excel в соответствии с нормальным и равномерным распределениями размеров, которые наиболее часто встречаются при изготовлении деталей в пределах 5–8 квалитетов, с помощью генератора случайных чисел формировались массивы размеров диаметров вала и отверстия во втулке в пределах указанных выше допусков (по пять генераций, соответствующих пяти партиям по 100 штук). Определялись статистические параметры распределения натягов в партии: средние, минимальные, максимальные значения, диапазон изменения натягов, стандартные отклонения.

3. При сборке сопрягаемые пары деталей формировались случайным образом, в частности согласно порядку генерации чисел, соответствующих их сопрягаемым размерам.

В табл. 1 представлены статистические данные по натягам для пяти реализаций.

Таблица 1

**Результаты компьютерного статистического моделирования
распределения натягов в партии ССН, посадка Ø40H8/s7**

Статисти- ческие параметры натягов, мм	Нормальное распределение		Равномерное распределение	
	Значения в пяти реализациях (партии по $N = 100$)	Среднее значение, (теоретическое значение)	Значения в пяти реализациях (партии по $N = 100$)	Среднее значение, (теоретическое значение)
1. Средний натяг	0,0354 0,036 0,0373 0,0375 0,037	0,0366 (0,036)	0,0381 0,0368 0,0375 0,0367 0,0375	0,0373 (0,036)
2. Минималь- ный / макси- мальный натяги	0,012/0,0522 0,0179/0,0589 0,018/0,0585 0,0154/0,0589 0,0202/0,0585	0,0167/0,0574 (0,0128/0,0592)	0,009/0,067 0,0113/0,0662 0,0085/0,0633 0,0101/0,0663 0,0084/0,0658	0,0095/0,0657 (0,00325/0,0688)
3. Стандартное отклонение	0,0080 0,0076 0,0077 0,008 0,0079	0,0078 (0,00772)	0,0125 0,0136 0,0129 0,0131 0,0131	0,0130 (0,0134)
4. Диапазон изменения натяга	0,0401 0,041 0,0405 0,0435 0,0383	0,0407 (0,0463)	0,0579 0,0548 0,0548 0,0561 0,0573	0,0562 (0,0655)
5. Сборочные единицы в партии с натягом меньше расчетного значения	2 0 0 2 0	0,8 (0,84)	7 9 5 10 8	7,8 (8,9)
6. Сборочные единицы, требующие упрочнения	1 0 0 2 0	0,6	4 9 5 7 7	6,4

По результатам компьютерного моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Если размеры деталей в партии ССН подчиняются нормальному закону, то вероятность необходимости упрочнения ССН, даже при выполнении условий выбора посадки (13) и (14), минимальна. При этом нужно помнить, что при соотношении $N_i - N_{\min}^p \leq 1 \text{ мм}$ (N_i – натяг в конкретном соединении) упрочнять бессмысленно, имея в виду применяемый при расчете коэффициент запаса прочности. В частности, моделирование показало, что при

заданных параметрах нужно упрочнять в среднем менее одного соединения из 100.

2. Если размеры деталей подчиняются равномерному распределению, то при заданных параметрах вероятность необходимости упрочнения возрастает, следует упрочнять до 6–7 соединений из 100. В реальности чаще встречается сочетание нормального и равномерного законов распределения, поэтому нужно ориентироваться на среднюю оценку в 3–4 соединения из 100.

3. Наблюдается хорошая сходимость теоретической оценки количества соединений, имеющих натяги $N_i < N_{\min}^p$, с результатами моделирования (см. табл. 1).

4. Определять ССН при сборке деталей, имеющих $N_i < N_{\min}^p$, можно прямым способом, определяя натяг при измерении собираемых деталей, или косвенным способом – по усилию запрессовки [7, 9].

Заключение

Предлагается подход к проектированию соединений с натягом, основанный на технологии избирательного упрочнения ССН при сборке с АМ полимеризующимися в пустотах зоны контакта деталей и повышающими прочность соединений.

При реализации предлагаемой методики проектирования применяется вероятностный подход к определению параметров деталей и соединения.

Методика базируется на предположении, что определенная (задаваемая) часть партии ССН будет упрочняться путем применения АМ, так как не может с назначенным запасом прочности передавать эксплуатационную нагрузку. Таким образом, вероятностный минимальный натяг в партии ССН при выборе посадки может быть меньше расчетного значения $N_{\min,в}^p < N_{\min}^p$.

Приведена методика теоретической оценки доли соединений, требующих упрочнения, при нормальном и равномерном законах распределения. Проведено компьютерное моделирование процесса сборки партий ССН, подтверждены результаты теоретической оценки.

Методика позволяет существенно снизить уровень натягов в соединении и назначить более широкие допуски на размеры сопрягаемых деталей без потери функциональных свойств.

Список литературы

1. Орлов П. И. Основы конструирования : справ.-метод. пособие : в 2 кн. 3-е изд. М. : Машиностроение, 1988. Кн. 2. 544 с.
2. Палей М. А., Романов А. Б., Брагинский В. А. Допуски и посадки : справочник : в 2 ч. 9-е изд., перераб. и доп. СПб. : Политехника, 2011. Ч. 1. 530 с.
3. Воячек И. И. Обеспечение качества неподвижных соединений на основе интеграционной системы конструкторско-технологического проектирования : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08. Пенза, 2006. 401 с.
4. Бонч-Осмоловский М. А. Селективная сборка. М. : Машиностроение, 1974. 142 с.
5. Воячек И. И., Кочетков Д. В., Илюхин А. С. Рациональное обеспечение функциональных свойств соединений с натягом при индивидуальной селективной сборке // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 160–171. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-15

6. Воячек И. И., Кочетков Д. В., Митясов С. Г. Избирательное упрочнение соединений с натягом при сборке с анаэробными материалами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2015. № 2. С. 192–204.
7. Воячек И. И., Кочетков Д. В., Митясов С. Г. Избирательное упрочнение соединений с натягом при сборке деталей путем запрессовки // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 3. С. 113–123. doi: 10.21685/2072-3059-2018-3-11
8. Voyachek I. I., Kochetkov D. V., Sobrino D. R. D. [et al.]. Rational Provision of Functional Properties of Interference Fit Joints in Case of Assembly with Implementation of Anaerobic Materials // Novel Trends in Production Devices and Systems V : Materials Science Forum. Switzerland : Trans Tech Publications, 2019. Vol. 952. P. 123–132. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.952.123
9. Патент 2747172 Российская Федерация, МПК F16B 4/00, B23P 19/02. Способ соединения деталей с натягом / Воячек И. И., Кочетков Д. В., Митясов С. Г. ; заявитель и патентообладатель Пензенский государственный университет. № 2019108418 ; заявл. от 22.03.2019 ; опубл. 28.04.2021, Бюл. № 13. 12 с.

References

1. Orlov P.I. *Osnovy konstruirovaniya: sprav.-metod. posobie: v 2 kn. 3-e izd. = Basics of design: reference and methodological manual: in 2 books. The 3rd edition.* Moscow: Mashinostroenie, 1988;Bk.2:544. (In Russ.)
2. Paley M.A., Romanov A.B., Braginskiy V.A. *Dopuski i posadki: spravochnik: v 2 ch. 9-e izd., pererab. i dop. = Tolerances and fits: reference: in 2 parts. The 9th edition, revised and supplemented.* Saint Petersburg: Politekhnik, 2011;Pt.1:530. (In Russ.)
3. Voyachek I.I. *Quality assurance of fixed connections based on the integrated system of design and technological engineering.* DSc dissertation: 05.02.08. Penza, 2006:401. (In Russ.)
4. Bonch-Osmolovskiy M.A. *Selektivnaya sborka = Selective assembly.* Moscow: Mashinostroenie, 1974:142. (In Russ.)
5. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Ilyukhin A.S. Rational provision of functional properties of tension joints during individual selective assembly. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):160–171. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-15
6. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Mityasov S.G. Selective strengthening of tension joints during assembly with anaerobic materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2015;(2):192–204. (In Russ.)
7. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Mityasov S.G. Selective strengthening of tension joints during assembly of parts by pressing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2018;(3):113–123. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2018-3-11
8. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Sobrino D.R.D. et al. Rational Provision of Functional Properties of Interference Fit Joints in Case of Assembly with Implementation of Anaerobic Materials. *Novel Trends in Production Devices and Systems V: Materials Science Forum.* Switzerland: Trans Tech Publications, 2019;952:123–132. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.952.123
9. Patent 2747172 Russian Federation, MPK F16B 4/00, B23P 19/02. *Sposob soedineniya detaley s natyagom = Method of joining parts with tension.* Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Mityasov S.G.; applicant and patent holder Penzenskiy gosudarstvennyy universitet. № 2019108418; appl. 22.03.2019; publ. 28.04.2021, Bull. № 13. 12 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Иванович Воячек

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: voyachek@list.ru

Igor I. Voyachek

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of mechanical engineering technologies
and equipment, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Денис Викторович Кочетков

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой металлорежущих
станков, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: denis.kochetkov80@yandex.ru

Denis V. Kochetkov

Candidate of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of Metal cutting machines, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Андрей Дмитриевич Тарханов

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tmspgu@mail.ru

Andrey D. Tarkhanov

Master's degree student, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Юлия Валериевна Истомина

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: u.istomina@mail.ru

Yuliya V. Istomina

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor of the sub-
department of technologies and equipment,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 18.09.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 24.10.2023

Принята к публикации / Accepted 18.11.2023