

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА ПРИ РЕМОНТЕ МАШИН

Шрон Л.Б.¹, Богуцкий В.Б.²

¹*Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, Симферополь;*

²*Севастопольский государственный университет, Севастополь*

Ключевые слова: ремонтное производство, размерный анализ, допуск на износ звеньев размерной цепи, распределение допуска замыкающего звена, остаточный ресурс звена размерной цепи, экономическая целесообразность проведения ремонта.

Аннотация. Показано, что в современном ремонтном производстве практике применения размерного анализа не уделяется должного внимания, что является одной из основных причин снижения ресурса отремонтированных машин в сравнении с ресурсом новых. Подчеркивается, что техническое состояние любого механизма во многом определяется состоянием замыкающего звена его размерной цепи, величина которого при проектировании и изготовлении машины назначается, исходя из требований конструкции и нормальной работы механизма. Отмечается, что существующие методы определения допусков на износ деталей машин являются сугубо приближенными, так как не учитывают взаимосвязей и взаимодействий между поверхностями деталей машины в процессе их работы. Приведены зависимости, позволяющие оценить уровень экономической эффективности выполняемого ремонта, распределения допуска замыкающего звена размерной цепи по составляющим звеньям с учетом скоростей изнашивания всех звеньев размерной цепи и остаточный ресурс любого звена размерной цепи. Сделан вывод, что применение теории размерного анализа в ремонтном производстве позволит улучшить не только экономические показатели использования машин, но и их надежность после ремонта.

APPLICATION FEATURES OF DIMENSIONAL ANALYSIS IN REPAIR OF MACHINE

Shron L.B.¹, Bogutsky V.B.²

¹*Crimean Engineering and Pedagogical University the name of Fevzi Yakubov, Simferopol;*

²*Sevastopol State University, Sevastopol*

Keywords: repair manufacture, dimensional analysis, wear tolerance a links in the dimensional chain, allocation of tolerance of the dimensional chain, remaining resource links of the dimensional chain, the economic feasibility of performing repairs.

Abstract. It is shown, that in modern repair production, the practice of using dimensional analysis is not given due attention, which is one of the main reasons for reducing the resource of repaired machines in comparison with the resource of new ones. It is emphasized, that the technical condition of any mechanism is largely determined by the state of the closing link of its dimensional chain, the value of which is assigned during the design and manufacture of the machine, based on the requirements of the design and normal operation of the mechanism. It is noted, that the existing methods for determining the wear tolerances of machine parts are purely approximate, since they do not take into account the relationships and interactions between the surfaces of machine parts during their operation. Are given dependences to assess the level of economic efficiency of the performed repair, the distribution of the tolerance of the closing link of the dimensional chain among the component links, taking into account the wear rates of all links of the dimensional chain and the residual resource of any link of the dimensional chain. It is concluded that the application of the theory of dimensional analysis in repair production will improve not only the economic performance of the use of machines, but also their reliability after repair.

Введение

Сущность размерного анализа при ремонте машин, как и при их проектировании и производстве, заключается в определении допусков и предельных отклонений всех звеньев размерной цепи. Однако в современном ремонтном производстве вопросам теории размерного анализа не уделяется внимание, что является одной из основных причин снижения ресурса отремонтированных машин в сравнении с ресурсом новых [1-5 и др.].

Недооценка возможностей теории размерного анализа в процессе потребителя машин в значительной мере затрудняет решение задач по отысканию причин, способствующих

снижению ресурса отремонтированных машин, а в ряде случаев может привести к неправильным выводам о способах его увеличения.

Основные закономерности и положения теории размерного анализа применительно к ремонтному производству имеют ряд существенных отличительных черт, поскольку и само ремонтное производство отличается от промышленного. Одной из главных отличительных особенностей ремонтного производства является то, что при ремонте машин допуски отдельных звеньев размерных цепей имеют более расширенные величины в сравнении с допусками завода-изготовителя, так как при ремонте машин, ввиду неравнопрочности деталей, исходя из экономических соображений, находят применение детали с допустимым износом [6-11 и др.].

Цель размерного анализа при ремонте машин заключается в определении таких величин допусков звеньев размерной цепи в пределах от наименьшего значения, принятого на заводе-изготовителе, до предельно допустимого при эксплуатации, чтобы получить от ремонта наибольшую экономическую эффективность.

Основная часть

Одной из важнейших характеристик, определяющей техническое состояние любого механизма, является замыкающее звено его размерной цепи, величина которого при проектировании и изготовлении механизма назначается, исходя из требований конструкции и нормальной работы механизма. Однако механизм может нормально функционировать при различных величинах замыкающего звена в пределах от наименьшего предельного значения, принятого на заводе-изготовителе, до предельно допустимого при эксплуатации. Это всегда имеет место при ремонте машин, поэтому проблема заключается в выборе такой величины замыкающего звена в указанных пределах, которая с учетом эксплуатационных требований к отремонтированному механизму обеспечила бы наибольшую экономическую эффективность от ремонта механизма [12-15 и др.]. Другими словами, при ремонте машин величина замыкающего звена должна назначаться с учетом экономических и конструктивных требований.

При использовании нового механизма только до первого ремонта себестоимость единицы произведенной работы равна $\frac{Q_n}{\tau_n}$. Если же механизм отремонтировать, то удельные затраты

после проведения ремонта $\frac{Q_n + Q_p}{\tau_n + \tau_p}$, что меньше $\frac{Q_n}{\tau_n}$ (в приведенных отношениях Q_n – затраты,

связанные с приобретением нового механизма и его использованием до первого ремонта, руб.; Q_p – затраты, связанные с ремонтом механизма и его использованием до следующего ремонта, руб.; τ_n, τ_p – соответственно межремонтные ресурсы нового и отремонтированного механизмов в единицах произведенной работы (станко час, мото-час, тыс. км и т. д.).

Следовательно, разность $\frac{Q_n}{\tau_n} - \frac{Q_n + Q_p}{\tau_n + \tau_p}$ – это экономический эффект, полученный от ремонта механизма. Если разность приняла отрицательное значение, то ремонт механизма экономически нецелесообразен.

Следует заметить, что при определении экономического эффекта ряд исследователей [16-18 и др.] удельные затраты после ремонта определяют отношением $\frac{Q_p}{\tau_p}$. Такое

допущение не совсем обоснованно, более точным будет отношение $\frac{Q_n + Q_p}{\tau_n + \tau_p}$, учитывающее в

производстве объема работ и остаточную стоимость механизма. В данном случае стоимость новой машины распределена как на выполнение объема работ до первого ремонта, так и после его проведения.

Разность $\frac{Q_n}{\tau_n} - \frac{Q_n + Q_p}{\tau_n + \tau_p}$ еще не характеризует в полной мере экономическую

целесообразность проведения ремонта механизма, так как одна и та же величина экономического эффекта может быть получена при различных затратах, поэтому с экономической точки зрения важно знать, ценой каких затрат получен экономический эффект т.е. уровень экономической эффективности проведения ремонта.

Уровень экономической эффективности проведения ремонта механизма \mathcal{E} (величина сэкономленных средств от ремонта механизма на единицу суммарных затрат, за счет которых получена экономия) можно оценить, используя следующее отношение

$$\mathcal{E} = \frac{\frac{Q_n}{\tau_n} - \frac{Q_n + Q_p}{\tau_n + \tau_p}}{\frac{Q_n + Q_p}{\tau_n + \tau_p}}, \quad (1)$$

Проведя несложные математические преобразования, получим выражение

$$\mathcal{E} = \frac{Q_n \frac{\tau_p}{\tau_n} - Q_p}{Q_n + Q_p}. \quad (2)$$

Величины Q_p и τ_p представим как функции от величины допуска Δ_0 замыкающего звена механизма, так как от этой величины зависит не только ресурс механизма, но и затраты на восстановление его работоспособности.

Задаваясь различными значениями Δ_0 в пределах от наименьшего предельного значения, принятого на заводе-изготовителе, до предельно допустимого при эксплуатации, определяем значения функций $Q_p = f_1(\Delta_0)$ и $\tau_p = f_2(\Delta_0)$, которые подставляются в формулу (1). Величина Δ_0 , при которой $\mathcal{E} \rightarrow \mathcal{E}_{\max}$ является при ремонте допустимой, а соответствующая ей величина τ_p может быть принята как межремонтный ресурс, так как в этом случае получается наибольшая экономия средств от ремонта механизма на единицу затрат.

Обсуждение результатов

Определение допуска при ремонте замыкающего звена по изложенному методу может быть успешным только тогда, когда известны численные величины функций $Q_p = f_1(\Delta_0)$ и $\tau_p = f_2(\Delta_0)$. Такой подход возможен в тех случаях, когда известно количество звеньев размерной цепи, имеющих допуск на износ. Кроме того, необходимо знать величины этих допусков и степень их влияния на интенсивность изнашивания звеньев размерной цепи [19-22 и др.]. Для указанных цепей вначале распределяется допуск при ремонте замыкающего звена по составляющим звеньям. Практически, в первоначальном приближении распределение допуска замыкающего звена размерной цепи по составляющим звеньям с учетом скоростей изнашивания всех звеньев размерной цепи производится по формуле

$$\Delta_i = \frac{\Delta_0 V_i^n}{\sum_{i=1}^n V_i^n \xi_i}, \quad (3)$$

где Δ_i – допуск на износ i -го звена; Δ_0 – допуск замыкающего звена; V_i^n – скорость изнашивания i -го звена в новом механизме; n – количество звеньев в размерной цепи, то есть $i=1, 2, 3, \dots, n$; ξ_i – передаточное отношение.

В тоже время при ремонте такое распределение допуска достаточно приближенное, так как не учитывает величины остаточного ресурса каждого из составляющих звеньев размерной цепи и изменения интенсивности их изнашивания в зависимости от величины допусков на износ, поэтому расчет целесообразно производить по зависимости

$$\Delta_i = \frac{\Delta_0 K_i}{\sum_{i=1}^{i=n} K_i}, \quad (4)$$

где K_i – коэффициент, показывающий, во сколько раз остаточный ресурс i -го звена больше остаточного ресурса базового.

За базовое звено принято звено, имеющее наименьший остаточный ресурс. Остаточный ресурс любого i -го звена размерной цепи определяется по формуле

$$T_i^0 = \frac{S_i^n - S_i^{np} - \Delta_i}{V_i^\phi}, \quad (5)$$

где T_i^0 – остаточный ресурс i -го звена размерной цепи; S_i^n – фактический размер нового i -го звена; S_i^{np} – предельно допустимый размер i -го звена при эксплуатации; Δ_i – допуск на износ i -го звена, определенный по формуле (3); V_i^ϕ – фактическая скорость изнашивания i -го звена при распределении допуска замыкающего звена по формуле (3).

Предлагаемый метод расчета размерных цепей при ремонте машин применим для расчета любых размерных цепей, имеющих изнашиваемые звенья, как линейных, так и угловых, плоскостных и пространственных, с регулируемыми и нерегулируемыми звеньями, с замыкающим звеном в виде зазора и в виде натяга, если известны закономерности изменения технического состояния изнашиваемого сопряжения во времени. Последнее условие имеет особенное значение для сопряжений с неподвижными посадками, так как в настоящее время нет методов по определению технического состояния неподвижного сопряжения без разборки.

Так как изнашиваемые звенья размерных цепей механизмов обычно задаются зазорами [6, 9, 15 и др.], то расчет допусков на износ по формуле (4) производится не для отдельных деталей, а в целом для всего сопряжения.

Расчет допусков на износ отдельных деталей, образующих сопряжение, производится аналогичными методами, что и на заводах изготовителях: методом полной взаимозаменяемости, теоретико-вероятностным и селективным подбором. Исходными данными для расчета допусков на износ отдельных деталей, образующих сопряжение, являются допуски на износ сопряжений, определенные по формуле (4), и законы распределения размеров изношенных деталей механизмов, поступающих в ремонт.

Комплектовка сопряжений по методу полной взаимозаменяемости производится из изношенных деталей при условии, что при любом сочетании двух сопрягаемых деталей допуск на износ сопряжения не будет превышать допуска сопряжения, определенного по формуле (4). При использовании теоретико-вероятностного метода допускается выход допуска на сопряжение за пределы величины, определенной по формуле (4), с некоторой вероятностью при условии, что перекомпоновка дефектных сопряжений связана с меньшими затратами, чем сэкономленные средства за счет расширения пределов применения изношенных деталей. При селективном подборе сопряжений пределы применения изношенных деталей еще более расширяются, причем в каждой группе двух сопрягаемых деталей допуск на износ сопряжения должен соответствовать расчетному по формуле (4) с определенной погрешностью, вызываемой контрольно-измерительным инструментом при разбивке деталей на группы.

Экономическая эффективность применения того или иного метода расчета допусков на износ деталей определяется количеством механизмов, поступающих в ремонт, то есть программой ремонтного предприятия.

Для использования предлагаемого метода расчета размерных цепей при ремонте машин необходимы следующие исходные данные:

- законы распределения размеров изношенных деталей поступающих в ремонт машин, которые определяются путем массового микрометража:

- скорости изнашивания деталей машин до первого ремонта, которые также можно определить путем массового микрометража с учетом фактической наработки машин до первого ремонта;

- предельные зазоры (натяги), которые находятся экспериментально или расчетным путем;
- фактические скорости изнашивания деталей механизмов в зависимости от величины любого из зазоров (натягов) рассматриваемых механизмов, которые рассчитываются по специальной методике.

Заключение

Существующие методы определения допусков на износ деталей машин являются сугубо приближенными, так как они не учитывают взаимосвязей и взаимодействий между поверхностями деталей машин в процессе их работы. Применение теории размерного анализа в ремонтном производстве за счет улучшения качества технических условий на ремонт машин позволит значительно улучшить не только экономические показатели использования машин, но и их надежность после ремонта.

Список литературы

1. Соломахо В.Л., Спесивцева Ю.Б. Комплексный подход к расчету размерных цепей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение. – 2009. – № 8. – С. 63-70.
2. Булдаков В.А. Методы расчета многопараметрических размерных цепей при ремонте машин: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Саранск, 1997. – 16 с.
3. Lealin S. Comparison and evaluation of classical methods of dimensional chains theory and their modern analogues // Journal of Engineering Science. 2024, vol. 30(4), pp. 20-30.
4. Kulderknap E., Laaneots R., Raba K. Modified calculation method of tolerance of dimensional chain dependent link // 4th International DAAAM symposium «Industrial engineering – innovation as competitive edge SME». – Tallinn, Estonia: 2004. – P. 43-46.
5. Польский Е.А., Никонов О.А., Филиппук Г.П. Технологическое обеспечение качества сборочных единиц на основе анализа размерных связей с применением CALS-технологий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – №8-2. – С. 86-93.
6. Шамин В.Ю. Теория и практика решения конструкторских и технологических размерных цепей: учеб. пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. – 429 с.
7. Польский Е.А. Технологическое обеспечение требуемой долговечности сборочных соединений на основе анализа размерных связей с учетом износа при эксплуатации // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, №4(3). – С. 1189-1191.
8. Богущкий В.Б., Шрон Л.Б., Мануйленко В.М., Пянковская М.В. Размерный анализ как инструмент обеспечения эксплуатационных характеристик электроинструмента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8-2. – С. 64-70.
9. Бейлин А.Б. Предельные области допустимых производственных отклонений размеров деталей // Исследование и оптимальное проектирование станочных систем. Сборник трудов. – Самара: СамГТУ, 1993. – С. 45-51.
10. Хмельницкий С.В. Методика назначения видов ремонтных воздействий на основе оценки точности размерных параметров: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Оренбург, 2015. – 18 с.
11. Rodriguez G.S., Prado E.M. An application of dimensional analysis techniques in an industrial // IEEE Latin America Transactions. 2007, vol. 5, iss. 2, pp. 76-80.
12. Давыдова Н.С., Ключков Ю.П. Бережливое производство на предприятиях машиностроения: теория и практика внедрения. – М.: Изд-ий дом Академии Естествознания, 2012. – 112 с.
13. Бондаренко С.Г., Чередников О.Н., Губий В.П., Игнатцев Т.М. Размерный анализ конструкций: Справочник / Под общ. ред. С.Г. Бондаренко. – К.: Техника, 1989. – 150 с.
14. Dimensioning and Tolerancing. The American Society of Mechanical Engineers, 2009. – 227 p.
15. Богущкий В.Б., Шрон Л.Б. Выбор технологических методов, обеспечивающих оптимальный стык посадок // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – №4-2(336). – С. 119-126.
16. Щербаков В.А., Щербакова Н.А. Стоимостная оценка целесообразности капитального ремонта технологического оборудования // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2006. – №3(32). – С. 33-34.
17. Лялякин В.П. Восстановление и упрочнение деталей машин в агропромышленном комплексе России и Беларуси // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2004. – №2. – С. 2-6.
18. Безуглов А.Е., Кислицына О.А. Ключевые показатели эффективности при проведении технического обслуживания и ремонта оборудования // Вопросы инновационной экономики. – 2019. – Т. 9, №4. – С.1501-1514.
19. Мышкин Н.К., Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
20. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.

21. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Темасова Г.Н., Вергазова Ю.Г., Голиницкий П.В. Расчет допуска посадки с зазором для повышения относительной износостойкости соединений // Трение и износ. – 2023. – Т. 44, № 3. – С. 261-269.
22. Богущкий В.Б., Шрон Л.Б., Гордеева Э.С. Уменьшение количества не собираемых пар методом плавающих номиналов сопрягаемых деталей // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2019. – Т. 6, №1-4. – С. 22-27.

References

1. Solomakho V.L., Spesivtseva Yu.B. An integrated approach to the calculation of dimensional chains // Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied sciences. Mechanical engineering. 2009, no. 8, pp. 63-70.
2. Buldakov V.A. Calculation methods for multiparametric dimensional circuits in machine repair: abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – Saransk, 1997. – 16 p.
3. Lealin S. Comparison and evaluation of classical methods of dimensional chains theory and their modern analogues // Journal of Engineering Science. 2024, vol. 30(4), pp. 20-30.
4. Kulderknuip E., Laaneots R., Raba K. Modified calculation method of tolerance of dimensional chain dependent link // 4th International DAAAM symposium «Industrial engineering – innovation as competitive edge SME». – Tallinn, Estonia: 2004. – P. 43-46.
5. Polsky E.A., Nikonov O.A., Pilipchuk G.P. Technological quality assurance of assembly units based on the analysis of dimensional relationships using CALS technologies // News of Tula State University. Technical sciences. 2016, no. 8-2, pp. 86-93.
6. Shamin V.Yu. Theory and practice of solving design and technological dimensional circuits: textbook. – Chelyabinsk: Publ. house of SUSU, 1999. – 429 p.
7. Polsky E.A. Technological support of the required durability of assembly joints based on the analysis of dimensional connections, taking into account wear during operation // News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2011, vol. 13, no. 4(3), pp. 1189-1191.
8. Bogutsky V.B., Shron L.B. and others. Dimensional analysis as a tool to ensure the performance of power tools // News of Tula State University. Technical sciences. 2016, no. 8-2, pp. 64-70.
9. Beilin A.B. Marginal areas of permissible production deviations in the dimensions of parts // Research and optimal design of machine tool systems. Proceedings. – Samara: SamSTU, 1993. – P. 45-51.
10. Khmel'nitsky S.V. The method of assigning types of repair effects based on the assessment of the accuracy of dimensional parameters: abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – Orenburg, 2015. – 18 p.
11. Rodriguez G.S., Prado E.M. An application of dimensional analysis techniques in an industrial // IEEE Latin America Transactions. 2007, vol. 5, iss. 2, pp. 76-80.
12. Davydova N.S., Klochkov Yu.P. Lean manufacturing at machine-building enterprises: theory and practice of implementation. – M.: Publ. house of the Academy of Natural Sciences, 2012. – 112 p.
13. Bondarenko S.G., Cherednikov O.N., Gubiy V.P., Ignatsev T.M. Dimensional analysis of structures: Handbook / Under the general editorship of S.G. Bondarenko. – K.: Technic, 1989. – 150 p.
14. Dimensioning and Tolerancing. The American Society of Mechanical Engineers, 2009. – 227 p.
15. Bogutsky V.B., Shron L.B. The choice of technological methods that ensure an optimal joint of landings // Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2019, no. 4-2(336), pp. 119-126.
16. Shcherbakov V.A., Shcherbakova N.A. Cost assessment of the feasibility of major repairs of technological equipment // Metalworking: technology, equipment, tools. 2006, no. 3(32), pp. 33-34.
17. Lyalyakin V.P. Restoration and hardening of machine parts in the agro-industrial complex of Russia and Belarus // Repair, restoration, modernization. 2004, no. 2, pp. 2-6.
18. Bezuglov A.E., Kislytsyna O.A. Key performance indicators during maintenance and repair of equipment // Issues of innovative economics. 2019, vol. 9, no. 4, pp.1501-1514.
19. Myshkin N.K., Myshkin N.K., Petrokovets M.I. Friction, lubrication, wear. Physical foundations and technical applications of tribology. – M.: FIZMATLIT, 2007. – 368 p.
20. Pronikov A.S. Parametric reliability of machines. – M.: Publ. house of the Bauman Moscow State Technical University, 2002. – 560 p.
21. Leonov O.A., Shkaruba N.J., Temasova G.N., Vergazova Yu.G., Golnitsky P.V. Calculation of the clearance tolerance for increasing the relative wear resistance of joints // Friction and wear. 2023, vol. 44, no. 3, pp. 261-269.
22. Bogutsky V.B., Shron L.B., Gordeeva E.S. Reducing the number of non-assembled pairs by floating nominal values of mating parts // Actual problems in mechanical engineering. 2019, vol. 6, no. 1-4, pp. 22-27.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Шрон Леонид Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Кафедра электромеханики и сварки»	Shron Leonid Borisovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of «Electromechanics and welding»
Богущкий Владимир Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» shronlb@mail.ru	Bogutsky Vladimir Borisovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of «Mechanical engineering technology»

Получена 10.06.2024