

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.01, 531.8, 62-231, 621.833.61

Экспериментальное исследование зазоров в зацеплениях планетарных передач^{*}

С.П. Герасимов, А.С. Фомин

ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук»

Experimental study of clearances in the planetary gear engagements

S.P. Gerasimov, A.S. Fomin

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Рассмотрена проблема распределения нагрузок между сателлитами планетарных передач. Актуальность исследуемой проблемы заключается в повышении срока службы передач путем более равномерного распределения входного момента на все сателлиты. Исследованы модели трехсателлитных планетарных передач (редукторов), выпускаемых зарубежными компаниями Caterpillar, Komatsu и отечественной «Уралредуктор». Экспериментальным путем подтверждено отсутствие полного одновременного контакта между всеми зубчатыми колесами. Это свидетельствует о том, что работоспособность редукторов обеспечивают зазоры, введенные на этапе сборки. Ввиду неполного прилегания профилей зубьев колес предотвращается заклинивание. Полученные экспериментальные результаты соответствуют данным анализа подвижности, подтверждающим наличие избыточных связей в плоском движении. На основе результатов исследования разработан новый трехсателлитный планетарный редуктор с составным водилом, обеспечивающим переменное расстояние между некоторыми сателлитами, что способствует более равномерному распределению входного момента.

EDN: HZZTQV, <https://elibrary/hzztqv>

Ключевые слова: зубчатое колесо, трехсателлитная планетарная передача, редуктор с составным водилом, экспериментальное исследование зазоров

The paper considers a problem of load distribution between the planetary gear satellites. Relevance of the problem is in increasing the gear service life by a more uniform distribution of the input torque to all satellites. The paper analyzes samples of the three-satellite planetary gears (gearboxes) manufactured by the domestic (Uralreduktor) and foreign (Caterpillar and Komatsu) companies. It confirms experimentally the absence of simultaneous contact between all the gear wheels. This indicates that the gearbox performance is ensured by the clearances introduced at the assembly stage. Jamming is prevented due to partial absence of contacts between the wheel's teeth. The obtained experimental results correspond to the data of the mobility analysis, and confirm presence of the redundant constraints in

^{*} Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00796, <https://rscf.ru/project/25-29-00796/>.

the planar motion. Based on results of the conducted study, we developed a new three-satellite planetary gearbox with the multi-piece carrier, providing a possibility of a variable distance between certain satellites, which contributes to a more uniform distribution of the input torque.

EDN: HZZTQV, <https://elibrary/hzztqv>

Keywords: gear wheel, three-satellite planetary gearbox, gearbox with a multi-piece carrier, experimental study of clearances

Зубчатые передачи являются весьма распространенным видом механических систем. Их разрабатывают как отдельные устройства (редукторы, мультипликаторы и др.) [1, 2] и как узлы механизмов [3–5].

Среди зубчатых передач значительное место занимают планетарные передачи (ПП). Их широко используют практически во всех отраслях промышленности, когда есть необходимость увеличить или уменьшить передаваемую мощность и угловую скорость. Строение ПП схоже с механизмами параллельной структуры с круговой направляющей, где неподвижное колесо выполняет роль круговой направляющей, сателлиты — кинематических цепей, а водило — выходного звена в виде платформы [4, 5].

Повышение эффективности ПП, во многом определяемое их ресурсом, является комплексной задачей, требующей учета характеристик конструкции (структуры и кинематики), эксплуатационных параметров, а также точности изготовления элементов ПП [6–8]. Основными факторами, снижающими ресурс ПП, считаются внешние динамические нагрузки, тяжелые эксплуатационные условия, ошибки и неточности изготовления и сборки, приводящие к вибрации и нестабильности передачи усилий. Воздействие этих факторов зачастую становится причиной преждевременного выхода из строя ПП [9–12]. Среди обозначенных факторов одним из наиболее важных является неточность изготовления и сборки [13]. Дело в том, что идеально изготовить элементы любой механической передачи практически невозможно, так как производственное оборудование имеет заданные погрешности. Ввиду наличия в ПП избыточных связей данная проблема стоит наиболее остро. В связи с этим, при сборке ПП в зацеплениях вводятся зазоры [14]. Однако это приводит к неравномерному нагружению сателлитов.

Цель работы — экспериментальное исследование по выявлению зазоров между зубьями колес в планетарных редукторах, что позволит подтвердить неравномерность распределения

передаваемого крутящего момента между всеми сателлитами.

Экспериментальное исследование и его результаты. В качестве объектов исследования выступали трехсателлитные планетарные редукторы (ТСПР) разных компаний: Caterpillar, Komatsu и «Уралредуктор».

Экспериментальное исследование ТСПР компании Caterpillar. Для эксперимента выбрали новый (ранее не бывший в эксплуатации) ТСПР компании Caterpillar (рис. 1). Эксперимент выполняли в условиях ремонтного цеха горно-шахтного оборудования следующим образом. Проводили поворот ведущего вала на одинаковые углы в течение полного поворота каждого из сателлитов. Всего ведущее звено прошло 82 положения. В каждом из положений измеряли зазор между контактирующими зубьями сателлитов и зубьями неподвижного колеса, используя сертифицированный индикатор часового типа NORGAU Industrial 10/0,01. Для наибольшей точности эксперимента каждое измерение повторяли трижды.

Результаты экспериментального исследования — зависимости зазора Δ между неподвижным зубчатым колесом и зубьями первого, второго и третьего сателлитов от положения ведущего звена ТСПР компании Caterpillar — приведены на рис. 2. Видно, что в



Рис. 1. Внешний вид ТСПР компании Caterpillar

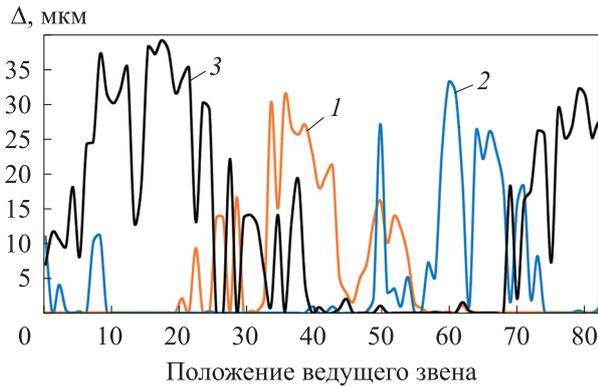


Рис. 2. Зависимости зазора Δ между неподвижным зубчатым колесом и зубьями первого (1), второго (2) и третьего (3) сателлитов от положения ведущего звена ТСПР компании Caterpillar

каждом положении имеются зазоры хотя бы у одного из трех сателлитов, что подтверждает гипотезу о невозможности обеспечения одновременного вхождения в зацепления всех сателлитов. Соответственно, крутящий момент не может равномерно передаваться через все три сателлита.

Экспериментальное исследование ТСПР компаний «Уралредуктор» и Komatsu. Для эксперимента выбрали ТСПР, находящиеся на момент исследования в эксплуатации в производственных линиях. ТСПР компании «Уралредуктор» (рис. 3, а) работал на вторичном отстойнике очистных сооружений, а ТСПР компании Komatsu (рис. 3, б) — на угольном разрезе в качестве привода экскаватора.

Эксперимент проводили по аналогии с описанной выше процедурой. В качестве инструмента промера использовали специальный набор щупов для контрольных измерений зазоров в соответствии с ГОСТ 882–75. Экспери-



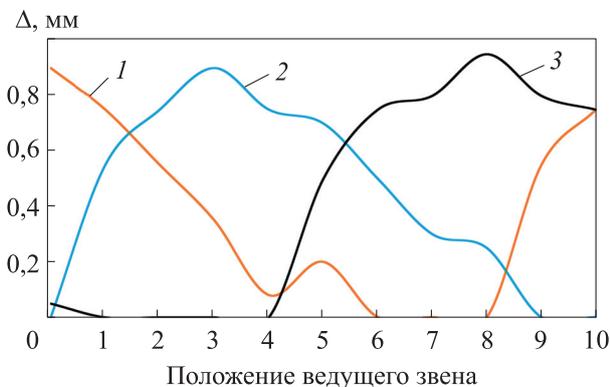
а



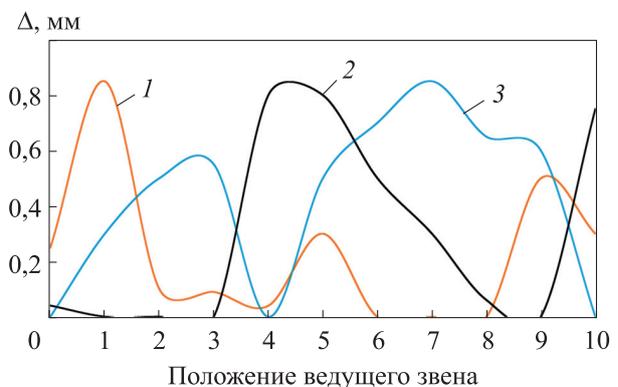
б

Рис. 3. Внешний вид ТСПР компаний «Уралредуктор» (а) и Komatsu (б)

менты выполняли в ремонтно-механических мастерских предприятий по месту их тестирования на входном контроле. Результаты экспериментального исследования ТСПР компаний «Уралредуктор» и Komatsu приведены соответственно на рис. 4, а и б.



а



б

Рис. 4. Зависимости зазора Δ между неподвижным зубчатым колесом и зубьями первого (1), второго (2) и третьего (3) сателлитов от положения ведущего звена ТСПР компаний «Уралредуктор» (а) и Komatsu (б)

Анализ результатов всех трех экспериментов показал, что между зубьями сателлитов и неподвижного зубчатого колеса имеются зазоры, исключающие их одновременный контакт. Это свидетельствует о том, что каждый из сателлитов в равной степени не может передавать нагрузку. Поэтому нагружение сателлитов происходит неравномерно, что сокращает срок службы ТСПР.

Обсуждение результатов. Для расчета подвижности (числа степеней свободы) ТСПР использовали формулу Чебышева

$$W = 3n - 2p_5 - p_4,$$

где n — число подвижных звеньев; p_5 и p_4 — число одно- и двухподвижных шарниров.

ТСПР имели следующие параметры: $n = 5$ (ведущая шестерня, три сателлита, водило), $p_5 = 5$ (шарнир между ведущей шестерней и стойкой; три шарнира между водилом и сателлитами, шарнир между водилом и стойкой) и $p_4 = 6$ (три шарнира между ведущей шестерней и сателлитами, три шарнира между неподвижным колесом и сателлитами).

Тогда подвижность $W = -1$. Отрицательная подвижность обусловлена наличием избыточ-

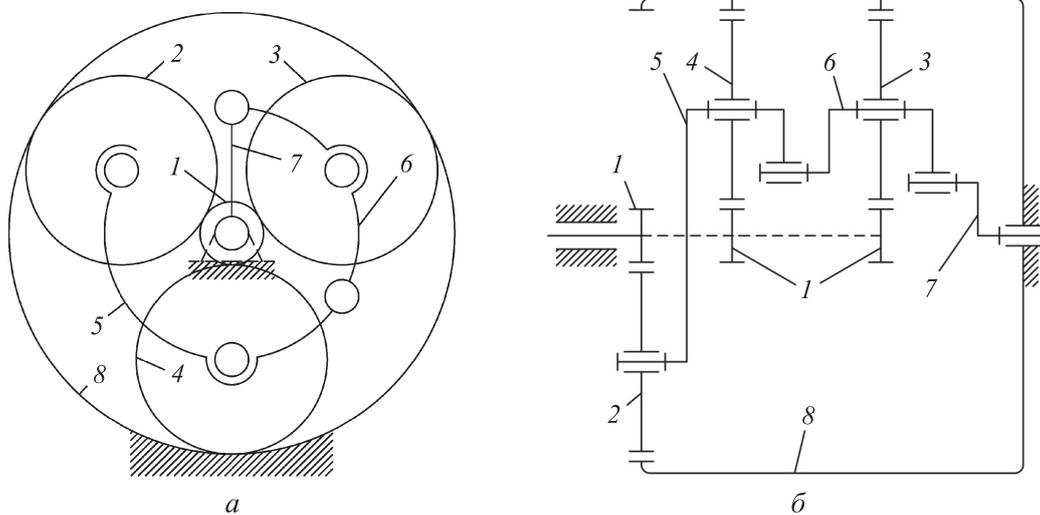


Рис. 5. Схемы ТСПР с составным водилом:
а — вид спереди; б — вид слева

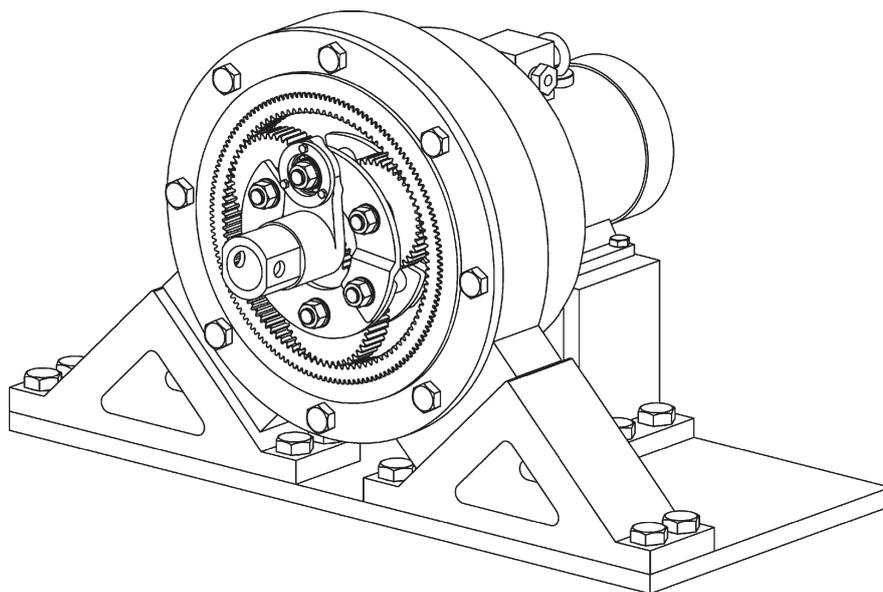


Рис. 6. Сборочная модель ТСПР с составным водилом

ных связей в плоском движении, из-за которых сборку ТСПР нельзя выполнить без деформации звеньев. Однако любая деформация звеньев повышает их износ и уменьшает срок службы устройства. Рассматриваемые ТСПР будут работоспособными, когда некоторые из сателлитов не входят в зацепления.

В связи с этим предложено обеспечить переменное расстояние между некоторыми из сателлитов ТСПР для обеспечения подвижности $W = 1$ путем введения составного водила. Созданная по такому принципу схема ТСПР приведена на рис. 5 [15], а построенная на ее основе модель ТСПР — на рис. 6.

ТСПР с составным водилом включает в себя центральное колесо 1, сателлиты 2–4, шатуны 5 и 6, рычаг 7 и неподвижное колесо 8. Звенья 5–7 образуют составное водило, обеспечивающее дополнительные степени свободы сателлитам относительно друг друга. Структурные параметры, входящие в состав формулы Чебышева, будут следующими: $n = 7$, $p_5 = 7$, $p_4 = 6$. Соответственно, подвижность W оказывается равной единице, что предполагает зависимое движение всех звеньев от един-

ственного приводного звена (центрального колеса) при одновременном обеспечении контактов во всех шести зубчатых зацеплениях (1–2, 1–3, 1–4, 2–8, 3–8, 4–8).

Выводы

1. По результатам экспериментального исследования трех ТСПР установлено, что они работают благодаря наличию зазоров, введенных на этапе сборки, а движение в них происходит ввиду частичного отсутствия контактов между зубьями колес, что предотвращает заклинивание. Однако благодаря проектированию с большим запасом прочности они продолжают работать даже при нагрузке на один сателлит.

2. Предложена модель ТСПР, в которой структурно обеспечена одноподвижность. Распределение входного момента одновременно на все три сателлита позволит не только увеличить срок службы ТСПР, но и уменьшить их массогабаритные характеристики, одновременно повысив их нагрузочную способность.

Литература

- [1] Jelaska D.T. *Gears and gear drives*. Wiley, 2012. 464 p.
- [2] Vullo V. *Gears*. Vol. 1. Geometric and kinematic design. Springer, 2020. 844 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-030-36502-8>
- [3] Glazunov V.A., Albagachiev A.Y., Erofeev M.N. et al. Development and investigation of a parallel-structure mechanism with toothed gears taking into account friction. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2022, vol. 51, no. 2, pp. 143–152, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618822020042>
- [4] Laryushkin P., Antonov A., Fomin A. et al. Novel reconfigurable spherical parallel mechanisms with a circular rail. *Robotics*, 2022, vol. 11, no. 2, art. 30, doi: <https://doi.org/10.3390/robotics11020030>
- [5] Fomin A., Antonov A., Glazunov V. Forward kinematic analysis of a rotary hexapod. In: ROMANSY 23 — Robot design, dynamics and control. Springer, 2021, pp. 486–494, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58380-4_58
- [6] Руденко Н.Ф. *Планетарные передачи. Теория, расчет, применение и проектирование*. Москва, Ленинград, Машгиз, 1947. 756 с.
- [7] Chen Z., Shao Y. Dynamic features of planetary gear train with tooth errors. *Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci.*, 2015, vol. 229, no. 10, pp. 1769–1781, <https://doi.org/10.1177/0954406214549503>
- [8] Li M., Xie L., Ding L. Load sharing analysis and reliability prediction for planetary gear train of helicopter. *Mech. Mach. Theory*, 2017, vol. 115, pp. 97–113, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.05.001>
- [9] Jiang F., Ding K., He G. et al. Vibration fault features of planetary gear train with cracks under time-varying flexible transfer functions. *Mech. Mach. Theory*, 2021, vol. 158, art. 104237, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104237>
- [10] Han H., Ma H., Tian H. et al. Sideband analysis of cracked planetary gear train considering output shaft radial assembly error. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2023, vol. 200, art. 110618, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2023.110618>

- [11] Pan A.-X., Yang Z.-G. Cause analysis and countermeasure on premature failure of a driven gear for the high-speed train. *Eng. Fail Anal.*, 2022, vol. 139, art. 106487, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106487>
- [12] Liu X. Vibration modelling and fault evolution symptom analysis of a planetary gear train for sun gear wear status assessment. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2022, vol. 166, art. 108403, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108403>
- [13] Кудрявцев В.Н. *Планетарные передачи*. Москва, Машиностроение, 1966. 307 с.
- [14] Дворников Л.Т., Герасимов С.П. Принципиальные проблемы многосателлитных планетарных зубчатых передач и возможные пути их разрешения. *Фундаментальные исследования*, 2017, № 12–1, с. 44–51.
- [15] Герасимов С.П., Дворников Л.Т. *Самоустанавливающийся трехсателлитный планетарный редуктор*. Патент РФ 2541049. Заявл. 06.12.2013, опубл. 10.02.2015.

References

- [1] Jelaska D.T. *Gears and gear drives*. Wiley, 2012. 464 p.
- [2] Vullo V. Gears. Vol. 1. Geometric and kinematic design. *Springer*, 2020. 844 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-030-36502-8>
- [3] Glazunov V.A., Albagachiev A.Y., Erofeev M.N. et al. Development and investigation of a parallel-structure mechanism with toothed gears taking into account friction. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2022, vol. 51, no. 2, pp. 143–152, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618822020042>
- [4] Laryushkin P., Antonov A., Fomin A. et al. Novel reconfigurable spherical parallel mechanisms with a circular rail. *Robotics*, 2022, vol. 11, no. 2, art. 30, doi: <https://doi.org/10.3390/robotics11020030>
- [5] Fomin A., Antonov A., Glazunov V. Forward kinematic analysis of a rotary hexapod. In: ROMANSY 23 — Robot design, dynamics and control. *Springer*, 2021, pp. 486–494, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58380-4_58
- [6] Rudenko N.F. *Planetarnye peredachi. Teoriya, raschet, primeneniye i proektirovaniye* [Planetary gears. Theory, calculation, application and design]. Moscow, Leningrad, Mashgiz Publ., 1947. 756 p. (In Russ.).
- [7] Chen Z., Shao Y. Dynamic features of planetary gear train with tooth errors. *Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci.*, 2015, vol. 229, no. 10, pp. 1769–1781, <https://doi.org/10.1177/0954406214549503>
- [8] Li M., Xie L., Ding L. Load sharing analysis and reliability prediction for planetary gear train of helicopter. *Mech. Mach. Theory*, 2017, vol. 115, pp. 97–113, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.05.001>
- [9] Jiang F., Ding K., He G. et al. Vibration fault features of planetary gear train with cracks under time-varying flexible transfer functions. *Mech. Mach. Theory*, 2021, vol. 158, art. 104237, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104237>
- [10] Han H., Ma H., Tian H. et al. Sideband analysis of cracked planetary gear train considering output shaft radial assembly error. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2023, vol. 200, art. 110618, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110618>
- [11] Pan A.-X., Yang Z.-G. Cause analysis and countermeasure on premature failure of a driven gear for the high-speed train. *Eng. Fail Anal.*, 2022, vol. 139, art. 106487, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106487>
- [12] Liu X. Vibration modelling and fault evolution symptom analysis of a planetary gear train for sun gear wear status assessment. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2022, vol. 166, art. 108403, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108403>
- [13] Kudryavtsev V.N. *Planetarnye peredachi* [Planetary gears]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 307 p. (In Russ.).
- [14] Dvornikov L.T., Gerasimov S.P. The fundamental problem megasatellite planetary gear sets and possible ways of their permission. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Research], 2017, no. 12–1, pp. 44–51. (in Russ.).
- [15] Gerasimov S.P., Dvornikov L.T. *Samoustavlivayushchiysya trekh-satelitnyy planetarnyy reduktor* [Self-alignment three-satellite planetary gearbox]. Patent RU 2541049. Appl. 06.12.2013, publ. 10.02.2015.

Информация об авторах

ГЕРАСИМОВ Семен Павлович — аспирант. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: semyon05@bk.ru).

ФОМИН Алексей Сергеевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: alexey-nvkz@mail.ru).

Information about the authors

GERASIMOV Semyon Pavlovich — Postgraduate. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: semyon05@bk.ru).

FOMIN Alexey Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: alexey-nvkz@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Герасимов С.П., Фомин А.С. Экспериментальное исследование зазоров в зацеплениях планетарных передач. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 5, с. 3–9.

Please cite this article in English as:

Gerasimov S.P., Fomin A.S. Experimental study of clearances in the planetary gear engagements. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 5, pp. 3–9.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «Реновация машин и оборудования полимерными материалами»

Автор А.С. Кононенко

Рассмотрены современные технологические процессы реновации и методы сборки машин и оборудования с использованием полимерных материалов, обеспечивающие повышение качества и долговечности изделий машиностроения, снижение их стоимости. Описаны свойства основных групп полимеров, применяемых в реновации машин и оборудования, методы их исследования и улучшения механических и эксплуатационных характеристик. Представлены сведения о технологическом оборудовании, инструментах и приспособлениях, используемых в реновации. Приведен расчет полимерного участка. Представлены основные положения охраны труда при восстановлении деталей машин полимерными материалами. Приведены технико-экономические показатели применения полимерных материалов в реновации машин. Рассмотрена утилизация и вторичная переработка полимеров.

Для студентов направления подготовки «Машиностроение» профиля «Реновация средств и объектов материального производства в машиностроении» (уровень бакалавриата). Учебное пособие может быть использовано студентами других машиностроительных специальностей, аспирантами и специалистами в области реновации машин и оборудования полимерными материалами.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>