

УДК 621.838.21.059.14

**Е. С. Чавров**, аспирант, **Е. А. Ефременков**, канд. техн. наук, доц.  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия  
Тел./Факс: +7 (923) 4453696; E-mail: esc12@tpu.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ КОНТАКТИРУЮЩИХ ЗВЕНЬЕВ НА КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЗАЦЕПЛЕНИИ ПЕРЕДАЧИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

*В статье рассматриваются передачи с промежуточными телами качения и свободной обоймой (ПТКСО). Представлена схема передачи с ПТКСО. Рассмотрены формы тел качения и материалы из которых могут быть изготовлены тела качения, исследуемой передачи. Изучены материалы, используемые для изготовления деталей, имеющих циклоидальный профиль. Исследовано влияние материалов тел качения, кулачка и венца передачи с ПТКСО на контактные напряжения в ее зацеплении.*

**Ключевые слова:** контактное напряжение, зацепление, промежуточное тело качения, циклоидальный профиль, пятно контакта, прочность.

**E. S. Chavrov, E. A. Efremenkov**

## THE EFFECT OF CHANGES IN THE MATERIAL OF CONTACTING PARTS ON CONTACT STRESSES IN MESHING OF TRANSMISSIONS WITH INTERMEDIATE ROLLING BODIES AND FREE CAGE

*This article discusses transmissions with intermediate rolling bodies and free cage (IRBFC). A diagram of a transmission with IRBFC is presented. The shapes of the rolling elements and the materials from which they can be made are considered. Materials used for the manufacture of parts with a cycloidal profile are studied. The influence of the materials of the rolling elements, cam, and ring gear of a transmission with IRBFC on the contact stresses in its meshing is investigated.*

**Keywords:** contact stress, meshing, intermediate rolling body, cycloidal profile, contact spot, strength.

### 1. Введение

Передача с промежуточными телами качения (ПТК) находит широкое применение в различных областях машиностроения. Передачи с ПТК и им подобные активно используют в отраслях: нефтегазовой; сельскохозяйственной; подъемно-транспортной [1]. Широкое применение этих передач и возрастающий к ним интерес объясняется компактностью, большим диапазоном передаточных чисел в одной ступени и высоким коэффициентом полезного действия (КПД) (теоретически от 0,8 до 0,94) [2]. Но такая передача имеет существенный недостаток, во время работы механизма между стенками пазов сепаратора и телами качения возникает трение скольжения, в результате чего сепаратор получает износ, что является критическим для механизма, так как сепаратор является тонкостенной деталью, передающей крутящий момент [3].

Проектирование любой передачи в стандартном виде включает в себя проектировочный и проверочный расчеты. При выполнении проектировочного расчета, из условия прочности рассчитываются геометрические характеристики передачи. Найденные значения этих характеристик подставляются в проверочный расчет для проверки выполнения условия прочности. Для проверки выполнения условия прочности в передаче с ПТК и ей подобным, необходимо произвести сравнение максимального контактного напряжения в зацеплении с допускаримым контактным напряжением. Допускаемое контактное напряжение есть отношение допускаемого напряжения на растяжение к корректирующему коэффициенту. Максимальное

контактное напряжение в зацеплении определяется путем перебора усилий, действующих в зацеплении, и радиусов кривизны контактирующих звеньев. Кроме того, контактное напряжение в зацеплении зависит от материалов, которые используются для изготовления контактирующих деталей передачи. При правильном подборе материалов можно добиться снижения контактных напряжений в зацеплении и, как следствие, повышения КПД и долговечности передачи.

Передача с промежуточными телами качения и свободной обоймой (ПТКСО) является доработанным вариантом передачи с ПТК. Передача с ПТКСО периодически упоминается как передача с разгруженным сепаратором, поскольку сепаратор не участвует в передаче крутящего момента и является разгруженным. Поэтому передача с ПТКСО имеет преимущество перед передачей с ПТК и является более технологичной. А для того, чтобы производить высокотехнологичные редукторы на основе передач с ПТКСО, необходимо очень деликатно подходить к вопросам проектирования передачи и оценки контактных напряжений в зацеплении.

Таким образом, исследование влияния материалов контактирующих звеньев на контактные напряжения в зацеплении передачи с промежуточными телами качения и свободной обоймой является актуальным.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Как упоминалось ранее, передача с ПТКСО является наиболее перспективной для применения в современных механизмах. Поэтому оценку контактных напряжений при использовании различных материалов звеньев передачи будем проводить на примере передачи с ПТКСО.

Передача с промежуточными телами качения и свободной обоймой (рис. 1) включает в себя: 1 – входной вал с эксцентриком; 2 – подшипник; 3 – кулачок; 4 – тело качения; 5 – сепаратор; 6 – венец. У передачи три центра и два эксцентриситета:  $O_1$  – ось кулачка;  $O_2$  – ось центров тел качения;  $O_3$  – ось передачи (венца);  $e$  – полный эксцентриситет;  $e_1$  – межосевое расстояние (эксцентриситет) [2].

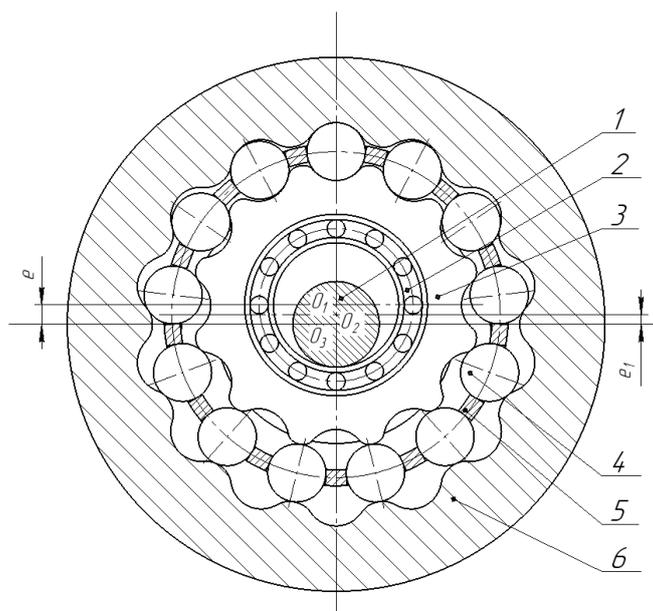


Рисунок 1. Схема передачи с ПТКСО

В зацеплении передачи возникают контактные напряжения в точках контакта: кулачка и тела качения; венца и тела качения. Наиболее нагруженным является контакт тела качения с профилем кулачка, т.к. кулачек имеет меньшие размеры, чем венец, и усилия на него действуют больше. Кроме того, найденные результирующие усилия на кулачке далее используются для определения грузоподъемности опоры под кулачком и подбора подшипника качения.

В качестве тел качения в передачах с ПТКСО применяют ролики и шарики. При использовании в конструкции цилиндрического ролика, пятно контакта имеет эллиптическую форму, вытянутую вдоль оси ролика, соответственно усилие  $f$  распределено на длину ролика  $l_p$  (рис. 2).

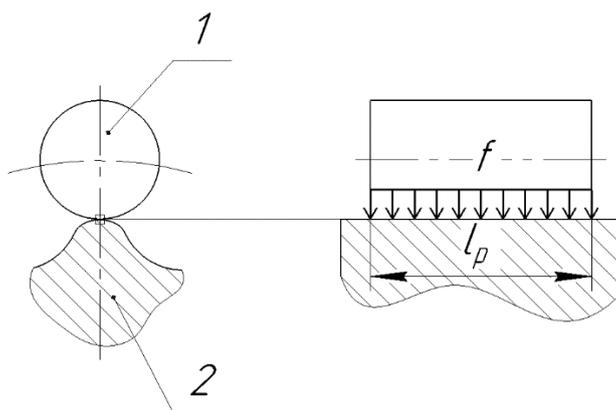


Рисунок 2. Контакт ролика с циклоидой: 1 – цилиндрический ролик; 2 – циклоидальный профиль кулачка

При использовании шарика в качестве тела качения, теоретически (при абсолютно твердых контактирующих звеньях) касание происходит в точке. Тогда, усилие  $F$  в зацеплении передачи с ПТКСО концентрируется непосредственно в точке контакта (рис. 3).

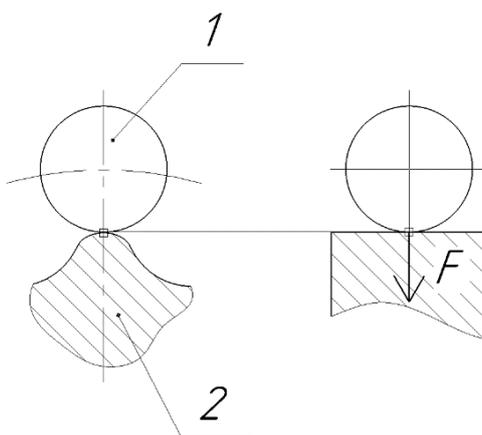


Рисунок 3. Контакт шарика с циклоидой: 1 – шарик; 2 – циклоидальный профиль кулачка

В данной работе исследуются материалы для передачи с ПТКСО с телами качения, выполненными в форме шара. Использование шариков в конструкции

передачи, способствует уменьшению трения скольжения за счет уменьшения пятна контакта.

Согласно литературному источнику [4] выбраны два подходящих типа контакта: для случая, когда тело качения находится во впадине циклоидального профиля – сферическое тело и цилиндрический желоб (выпукло-вогнутый контакт) (рис. 4а); для случая, когда тело качения находится на вершине циклоидального профиля – сферическое тело и цилиндр (выпукло-выпуклый контакт) (рис. 4б).

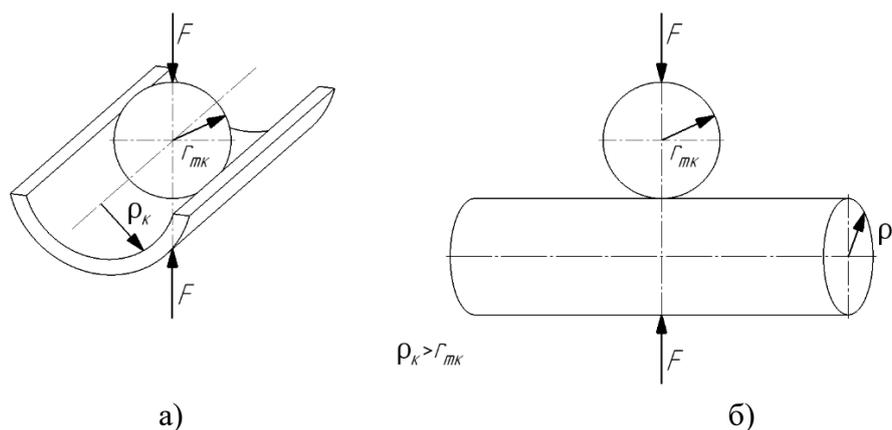


Рисунок 4. Схема касания: а – сферическое тело и цилиндрический желоб; б – сферическое тело и цилиндр

То есть согласно рисунку 4а цилиндрический желоб является впадиной циклоидального профиля кулачка, а исходя из рисунка 4б цилиндр является вершиной циклоидального профиля кулачка. В качестве материалов для кулачка может быть использован АМг6 или полипропилен PP-1200. Оба материала имеют низкий коэффициент удельной массы и представлены на рынке в качестве порошка, поэтому детали из этих материалов могут быть изготовлены при помощи 3D-печати технологией SLS. Шарики, которые могут быть использованы как тела качения в передаче, в основном изготавливаются из материалов: Q235 (аналог Ст3пс); керамика  $Si_3N_4$ ; керамика  $ZrO_2$ ; AISI 304 (аналог 08X18H10), широко представлены на рынке и доступны для покупки. При проведении исследования необходимо установить механические характеристики материалов: коэффициент Пуассона и модуль Юнга. Проведя анализ источников [4-9], сформирована таблица 1 с необходимыми характеристиками для определенных материалов.

Таблица 1. Характеристики материалов для кулачка и тел качения

Параметр, ед. изм.	Материалы кулачка		Материалы тел качения			
	АМг6	Полипропилен PP-1200	Q235 (аналог Ст3пс)	Керамика $Si_3N_4$	Керамика $ZrO_2$	AISI 304 (аналог 08X18H10)
Модуль Юнга $E$ , Па	$70 \cdot 10^9$	$1,25 \cdot 10^9$	$201 \cdot 10^9$	$315 \cdot 10^9$	$225 \cdot 10^9$	$211 \cdot 10^9$
Коэффициент Пуассона $\mu$	0,3	0,41	0,26	0,225	0,225	0,275

Рассмотрим формулу для определения контактных напряжений в зацеплении для ранее рассмотренных (рис.4) схем контакта [4]. Наибольшее контактное напряжение, возникающее на площадке при давлении сферического тела на цилиндрический желоб со знаком “-” и при давлении сферического тела на цилиндр со знаком “+”, определяется по формуле:

$$\sigma_{max} = 0,365n_p \sqrt[3]{F \frac{\left(\frac{2\rho_k \pm r_{TK}}{r_{TK}\rho_k}\right)^2}{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)^2}}, \quad (1)$$

где  $n_p$  - коррекционный коэффициент;  $F$  – взаимное усилие в контакте тела качения с профилем кулачка;  $\rho_k$  – радиус кривизны кулачка;  $r_{TK}$  – радиус тел качения;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициенты Пуассона материалов тел качения и кулачка;  $E_1$  и  $E_2$  – модули упругости материалов тел качения и кулачка.

После определения наибольшего контактного напряжения в зацеплении, необходимо провести проверку прочности согласно следующему условию [4]:

$$\sigma_{max} \leq \frac{[\sigma]_p}{m} = [\sigma]_{\text{конт}},$$

где  $[\sigma]_p$  – допускаемое напряжение на растяжение;  $[\sigma]_{\text{конт}}$  – допускаемое контактное напряжение;  $m$  – коррекционный коэффициент.

В настоящей работе приняты к исследованию 2 материала для кулачка и 4 материала для тел качения. Рассмотрев данные литературных источников [4-5, 10-11] сведем необходимый нам параметр для различных материалов в таблицу 2.

Таблица 2. Допускаемое напряжения на растяжение

Материал кулачка/тела качения	$[\sigma]_p$ , МПа
АМг6	53
Полипропилен PP-1200	22
Q235 (аналог Ст3пс)	152
Керамика Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	292
Керамика ZrO <sub>2</sub>	413
AISI 304 (аналог 08X18H10)	245

Согласно принятым ранее к исследованию материалам будем рассматривать 8 вариантов сочетаний материалов: 4 из которых для кулачка из материала АМг6 ( $[\sigma]_p=53$  МПа) и другие 4 для кулачка из материала PP-1200 ( $[\sigma]_p=22$  МПа).

Для расчета контактных напряжений в зацеплении потребуются входные параметры передачи с ПТКСО [2], примем следующие:  $r_2=5,5$  мм (радиус производящей окружности);  $\chi=1,45$  (коэффициент смещения);  $r_{TK}=1$  мм (радиус тел качения);  $Z_2=22$  (число тел качения) и  $T_k=7,5$  Нм (крутящий момент на кулачке).

Используя формулу (1) при помощи программного обеспечения Microsoft Excel произведены расчеты контактных напряжений и построены необходимые для оценки графики. Нулевое и одиннадцатое тела качения расположены на одной вертикали с полюсом зацепления  $P$  и осью кулачка  $O_I$ , соответственно из-за отсутствия плеча, усилия и контактные напряжения в зацеплении с этими телами стремятся к 0. В

зацеплении постоянно участвуют до 50% тел качения [2]. Так под нагрузкой могут находиться максимально 11 из 22 тел качения, исследуемой передачи. Поэтому контактные напряжения рассматриваем на телах качения с 1 по 10.

На рисунке 5 изображен график, на горизонтальной оси которого указан номер тела качения, а на вертикальной оси – контактные напряжения в зацеплении с этими телами качения. Материал тел качения для обоих вариантов выбран Q235.

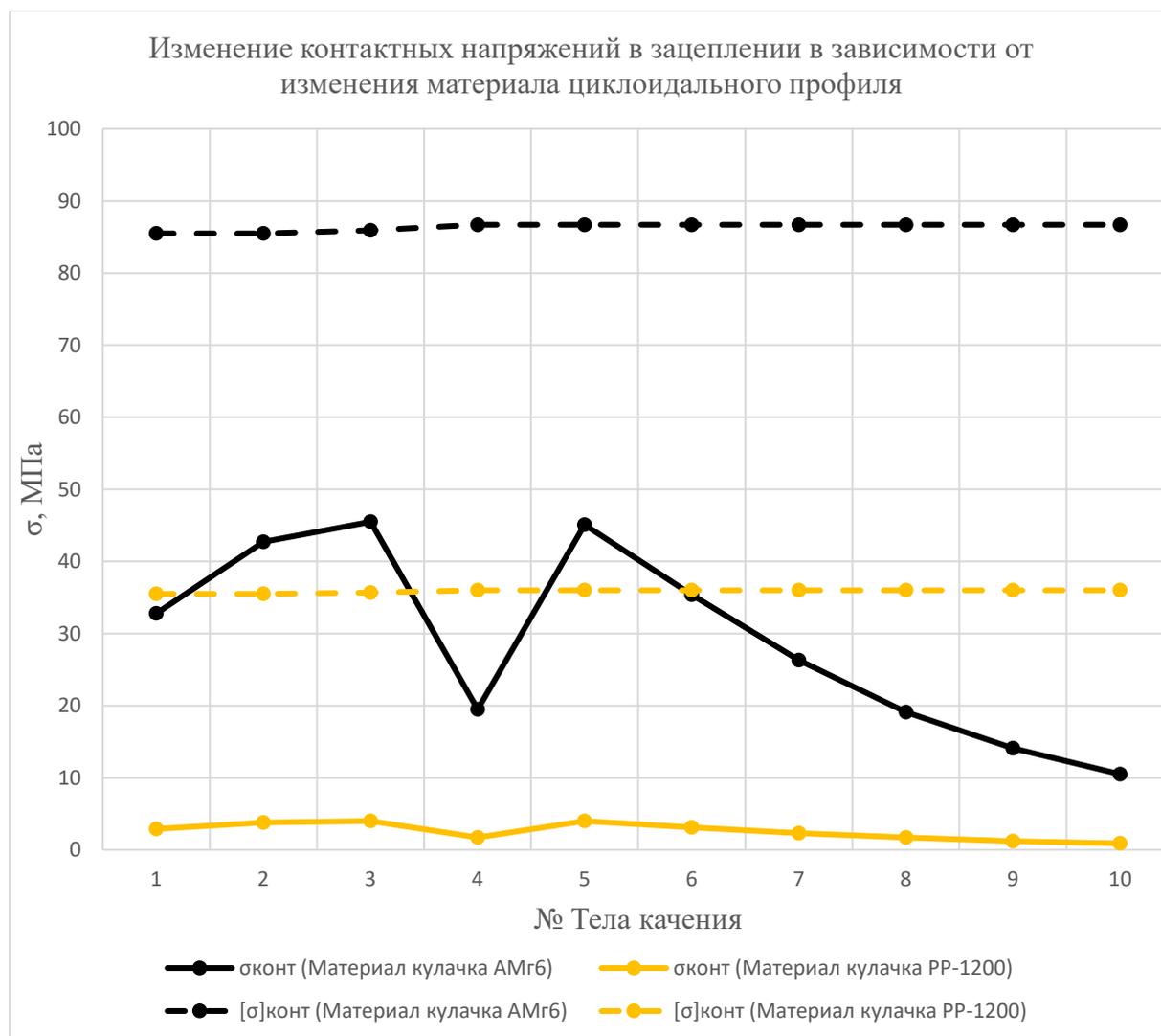


Рисунок 5. График зависимости контактных напряжений в зацеплении от тела качения, участвующего в зацеплении при изменении материала циклоидального профиля кулачка

Из графика видно, что для контакта стального тела качения с кулачком из АМг6 и РР-1200 напряжения в зацеплении ниже допускаемых, для выбранных параметров передачи с ПТКСО. Так для обоих вариантов условие прочности на контакт удовлетворяется:

$$\sigma_{\text{конт3 АМг6}} \leq [\sigma]_{\text{конт3 АМг6}}; 45,5 \text{ МПа} \leq 85,9 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\text{конт3 РР-1200}} \leq [\sigma]_{\text{конт3 РР-1200}}; 4 \text{ МПа} \leq 35,7 \text{ МПа}.$$

С материалом АМг6 допускаемое напряжение превышает расчетное в 2 раза, а с материалом РР-1200 в 9 раз. Отсюда следует, что при выборе РР-1200 в качестве материала для кулачка, запас прочности значительно больше. Тогда дальнейшие исследования будут проводиться на материале РР-1200.

На рисунках 6 и 7 изображены графики контактных напряжений в зацеплении кулачка с третьим телом качения, изготовленного из различных материалов.

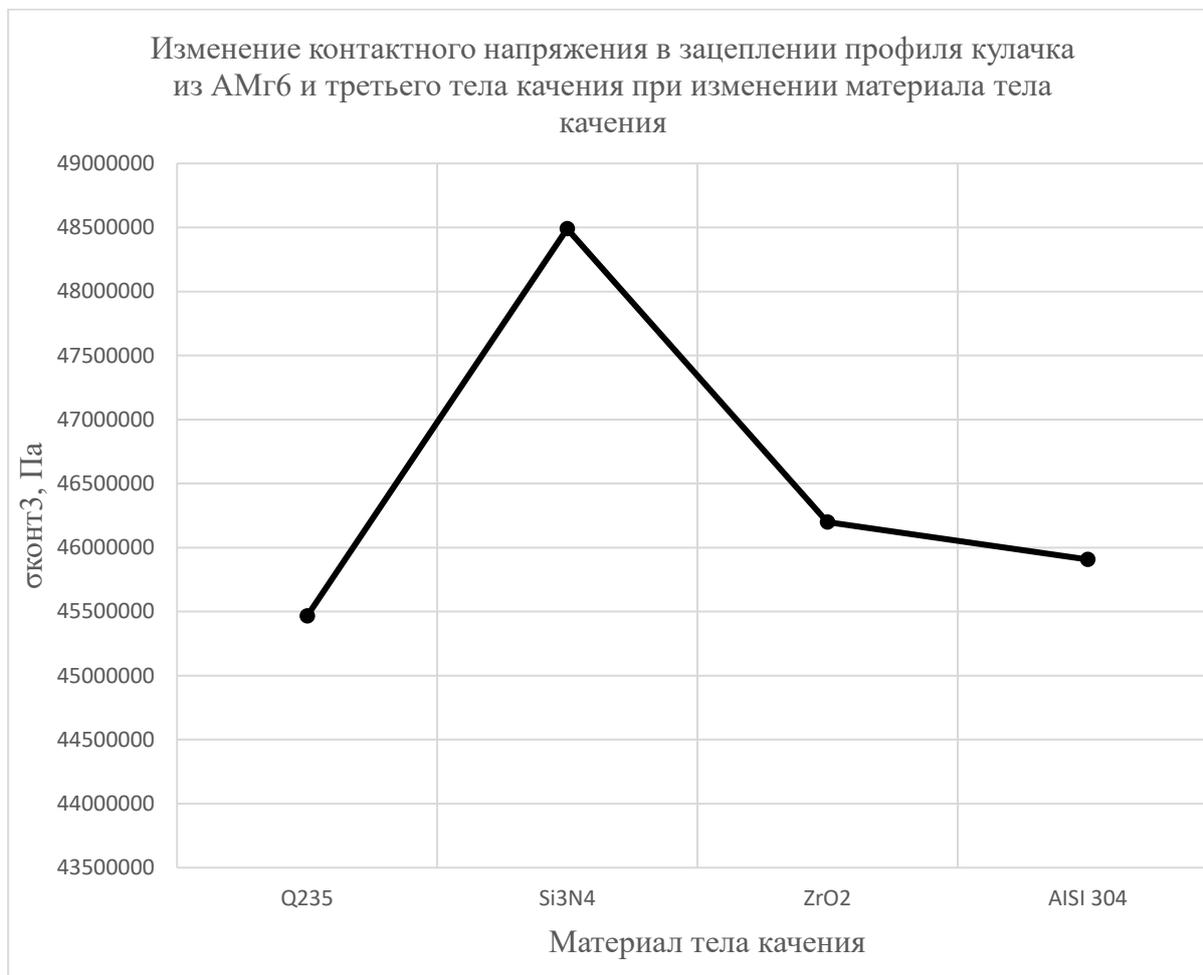


Рисунок 6. График зависимости контактных напряжений в зацеплении профиля кулачка, выполненного из АМг6 с третьим телом качения при изменении материала тела качения

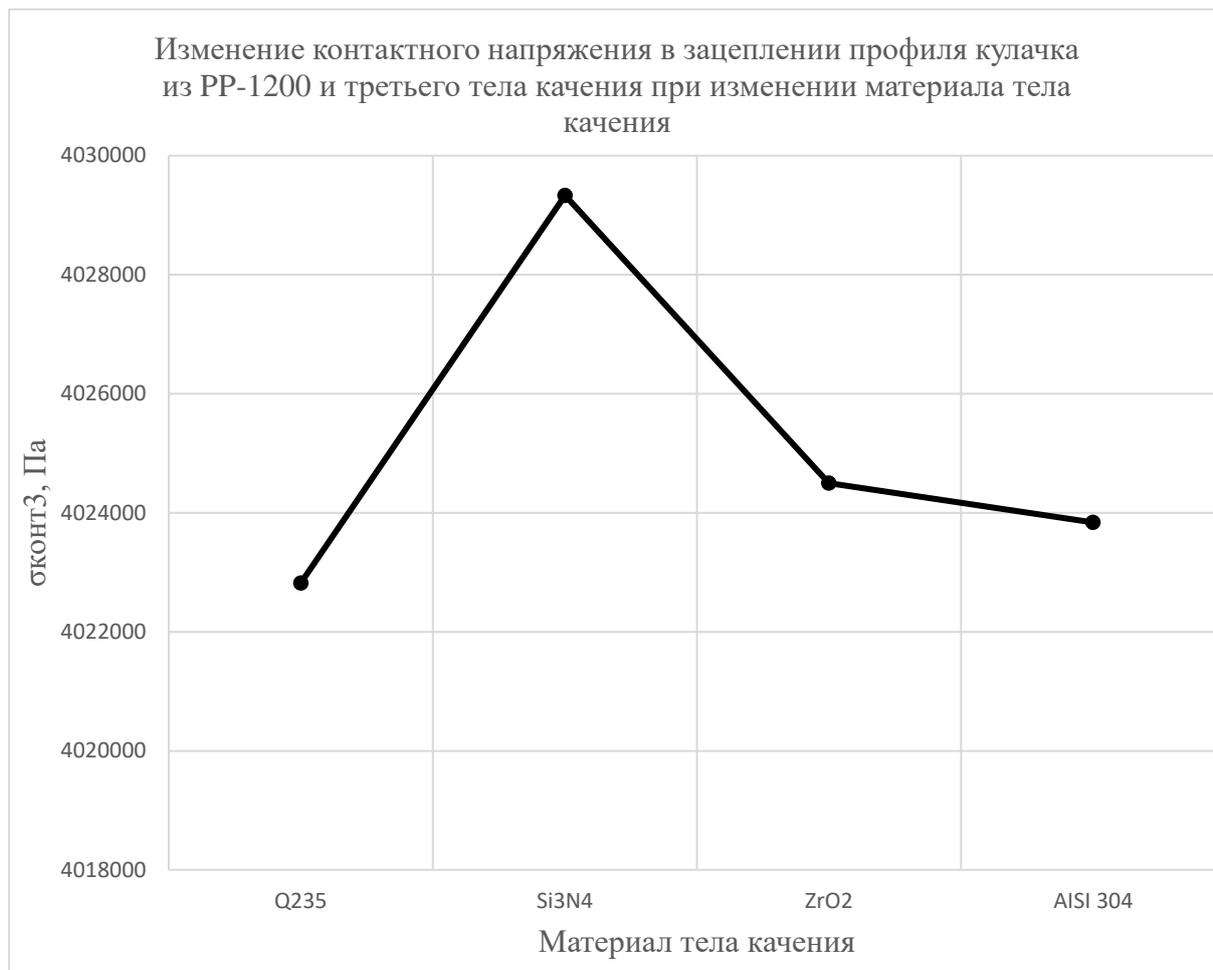


Рисунок 7. График зависимости контактных напряжений в зацеплении профиля кулачка, выполненного из PP-1200 с третьим телом качения при изменении материала тела качения

Графики 6 и 7 показывают, что при использовании, в качестве материала тел качения металлы Q235 и AISI 304, контактные напряжения в зацеплении будут снижены. Установлено, что при изменении материала тела качения, контактные напряжения в зацеплении меняются на 0,03-0,16%, в отличие от материала кулачка, где изменения более значительны. Следовательно, при проектировании передачи с ПТКСО необходимо уделять повышенное внимание материалам, используемым для изготовления кулачка.

### 3. Заключение

Таким образом, выполненные исследования показали, что при использовании шариковых тел качения в передаче с ПТКСО рекомендуется выбирать материал для них сталь или керамику. Но для уменьшения контактных напряжений лучше выбирать стальные тела качения. Циклоидальные профили кулачка и венца рекомендуется изготавливать из полипропилена PP-1200, при использовании полипропилена PP-1200 в конструкции механизма возможно снижение контактных напряжений в зацеплении в 11 раз в сравнении с колесами, изготовленными из АМг6.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Панкратов Э. Н. Проектирование механических систем автоматизированных комплексов для механообрабатывающего производства. Практикум лидера-проектировщика. – Томск: ТГУ, 1998. – 296 с.
2. Ефременков Е. А., Ефременкова С. К., Пашков Е. Н. Проектирование циклоидальных механических передач с промежуточными телами качения и свободной обоймой. – Томск: ТПУ, 2022. – 90 с.
3. Evaluation of techniques for determining the loading of a cycloidal satellite rolling bearing / E. A. Efremenkov, E. S. Chavrov, E. P. Khaleyeva, V. V. Tynchenko // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. – 2024. – Vol. 4, No. 466. – P. 72-84. – DOI 10.32014/2024.2518-170x.426. – EDN GITRPC.
4. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов. Изд. 2-е., переработанное и дополненное / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с. ISBN 5-12-000299-4.
5. Дарков, А. В. Сопротивление материалов. Учебник для вузов. Изд. 4-е / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. – Москва: Издательство «Высшая школа», 1975. – 654 с.
6. Коэффициент Пуассона для керамики [Электронный ресурс] // URL: [https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/36210/1/m\\_th\\_y.a.perevozchikova\\_2015.pdf](https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/36210/1/m_th_y.a.perevozchikova_2015.pdf) (дата обращения 01.06.2025).
7. Модули упругости для керамики [Электронный ресурс] // URL: <https://gnaxel.ru> (дата обращения 01.06.2025).
8. Модуль упругости для полипропилена [Электронный ресурс] // URL: [https://i3d.ru/catalog/poroshki\\_dlya\\_sls/poroshok-polipropilen-pp-pro/](https://i3d.ru/catalog/poroshki_dlya_sls/poroshok-polipropilen-pp-pro/) (дата обращения 01.06.2025).
9. СН 550-82. Инструкция по проектированию технологических трубопроводов из пластмассовых труб. Государственный комитет СССР по делам строительства. - М.: Стройиздат, 1983. - 64 с.
10. Допускаемые напряжения для диоксида циркония [Электронный ресурс] // URL: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=133> (дата обращения 02.06.2025).
11. Допускаемые напряжения для нитрида кремния [Электронный ресурс] // URL: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=53> (дата обращения 02.06.2025).

Поступила в редколлегию 15.04.2025 г.