

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.833.3

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДИРОСТОЙКОСТИ В СПИРОИДНОМ ЗАЦЕПЛЕНИИ
ПРИ СОЧЕТАНИИ МАТЕРИАЛОВ ЗВЕНЬЕВ ПАРЫ: СТАЛЬ – СТАЛЬ****INVESTIGATION OF ANTI-SEIZING PROPERTY IN SPIROID GEARING TO A
COMBINATION OF MATERIALS THE PAIR OF STEEL – STEEL**

Коваленко Роман Константинович,
преподаватель, e-mail: kovalenkork@gmail.com
Kovalenko Roman K., teacher
Анферов Валерий Николаевич,
доктор техн. наук, профессор, e-mail: avn43@mail.ru
Anferov Valeriy N., Dr Sc. in Engineering, professor

Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, Россия, г. Новосибирск,
ул. Д. Ковальчук, 191
Siberian State Transport University, 191 street D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russian Federa-
tion

Аннотация: В статье представлены результаты экспериментального исследования задиростойкости спироидного зацепления с сочетанием материалов сталь-сталь. Цель исследования в получении критерия заедания и построении на его основе методики расчета спироидных передач. Это позволит установить условия, при которых в спироидном зацеплении будет происходить заедание, чтобы еще на стадии проектирования его предотвратить. Тем самым появятся возможности изготовления спироидных передач из более экономичных материалов, что повысит их распространенность и позволит в большей мере реализовать преимущества спироидных передач перед другими передачами червячного класса. Испытания были проведены на лабораторном стенде, основой которого является дисково-роликотый узел трения, являющийся физической моделью спироидной передачи. Для проведения исследования был предложен критерий задиростойкости применимый для оценки заедания в спироидных передачах. Предложенный безразмерный критерий учитывает две группы факторов: влияние температуры и нагрузочную способность масляной пленки. В качестве результатов испытаний получены зависимости коэффициента трения от скоростей скольжения, удельной нагрузки и температуры в спироидном зацеплении для сочетания материалов звеньев пары сталь-сталь. Приведены графики зависимостей критерия заедания от удельной нагрузки для интервала скоростей скольжения при разных температурах.

Abstract: Experimental results on anti-seizing property of spiroid gearing with a combination of steel-steel materials had been presented. Goal of investigations is to obtain scuffing criterion and to build on its base method for calculating spiroid gears. This will to establish scuffing conditions, so that even at the design stage to prevent it. Thus, there will be the possibility of manufacturing spiroid gears of more efficient materials that increase their prevalence and might better realize the benefits of spiroid gears to other gears worm class. Investigations were conducted on a laboratory-scale plant. Its basis is the disk-roller friction unit, which is a physical model spiroid gear. Scuffing criterion used for evaluation anti-seizing property of spiroid gears had been offered for research. Procured nondimensional criterion takes into account two groups of factors: temperature effect and load carrying capacity of the oil film. The test results are received characteristic curves friction coefficient of sliding velocities, nominal pressures and temperature for spiroid gearing with a combination of steel-steel materials. Scuffing criterion received characteristic of nominal pressures to step sliding velocities and temperature had been brought.

Ключевые слова: спироидная передача, задиростойкость, заедание, зацепление

Keywords: спироидная передача, задиростойкость, заедание, зацепление

С развитием техники постоянно возрастают требования к повышению нагрузок и передаваемых скоростей в приводах машин. В частности,

это касается передач с перекрещивающимися осями, одной из которых является спироидная передача. Имея определенные преимущества по срав-

нению с другими передачами того же класса спироидные передачи перспективны для применения в приводах машин.

При этом одним из недостатков передач червячного класса, к коим относится и спироидная передача, является опасность возникновения заедания между рабочими поверхностями звеньев. Во избежание этого вида повреждения в передачах данного класса применяют антифрикционные материалы для изготовления звеньев пары, что помимо риска возникновения заедания также существенно снижает и нагрузочную способность передачи [1].

В связи с этим актуальной задачей является установление условий, при которых в спироидном зацеплении будет происходить заедание, чтобы еще на стадии проектирования его предотвратить. Тем самым появятся возможности изготовления спироидных передач из более экономичных материалов, что повысит их распространенность и позволит в большей мере реализовать преимущества спироидных передач перед другими передачами червячного класса.

Заеданием называется процесс возникновения и развития повреждений поверхностей трения вследствие схватывания поверхностей и переноса материала. Заедание в сильной степени может завершаться прекращением относительного движения звеньев пары [2].

В настоящее время метода расчета спироидных передач на заедание не предложено, из-за отсутствия достаточно надежного критерия заедания. Расчетным критерием заедания называется некоторая функция от ряда переменных параметров, влияющих на заедание. Предполагается, что когда эта функция достигнет критического значения, наступит заедание поверхностей.

По результатам проведенного автором анализа существующих критериев заедания [3] установлено, что каждый критерий применим, как для определенного вида передач, так и для определенной стадии развития процесса заедания. Наиболее теоретически обоснованными и потенциально применимыми для различных типов передач, в том числе и спироидных, на наш взгляд являются критерии, которые в своей основе лежат на выводах из температурного уравнения Блока или контактно-гидродинамической теории смазки.

Для проведения исследования заедания на физической модели спироидного зацепления необходимо предложить безразмерный критерий, который будет учитывать все ключевые факторы, влияющие на процесс возникновения заедания.

С точки зрения контактно-гидродинамической теории смазки [4] заедание поверхностей наступает при непосредственном контакте поверхностей трения, когда между ними отсутствует масляная пленка. Толщина масляной пленки в контакте между двумя упругими цилиндрами прямо пропорциональна динамической вязкости масла, ско-

рости движения масляного слоя и обратно пропорциональна удельной нагрузке в контакте. В спироидной передаче масло в контакт образцов затягивается с суммарной скоростью качения, равной сумме окружных скоростей звеньев передачи. Соответственно на основе этой зависимости можно сформулировать первый критерий K_1 для оценки влияния кинематических свойств масла на задиристость зацепления.

$$K_1 = \frac{q}{v_{\Sigma}\eta}; \quad (1)$$

где v_{Σ} – суммарная скорость качения, Вт/(м·К); η – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Поскольку в каталогах и свободном доступе приводятся сведения о кинематической вязкости масел и вязкостно-температурные характеристики масел, то в формулу 1 подставим зависимость кинематической вязкости μ_0 масла от динамической η

$$\eta = \rho\mu_0; \quad (2)$$

где μ_0 – кинематическая вязкость, м²/с; ρ – удельная плотность жидкости, кг/м³.

$$K_1 = \frac{q}{v_{\Sigma}\rho\mu_0}. \quad (3)$$

Ниже приведен анализ размерностей величин, составляющих критерий K_1 .

$$K_1 = \frac{\text{Н/м}}{\text{м/с} \cdot \text{кг/м}^3 \cdot \text{м}^2/\text{с}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}/(\text{с}^2 \cdot \text{м})}{\text{м/с} \cdot \text{кг/м}^3 \cdot \text{м}^2/\text{с}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}}{\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}} = 1. \quad (4)$$

Также масляная пленка может разорваться при нагрузках ниже критических, когда температура масляной пленки выше критической температуры, при которой масло теряет смазывающие свойства.

Температура масляной пленки в контакте по критерию Блока зависит от температуры поверхности трения и температурной вспышки в контакте.

$$t_{\Sigma} = t_{\text{п}} + t_{\text{max}} \leq t_{\text{кр}} = \text{const}; \quad (5)$$

где $t_{\text{п}}$ – температура поверхности трения до вступления в контакт; t_{max} – мгновенная температура в контакте («температура вспышки»); $t_{\text{кр}}$ – критическая температура, при которой масло теряет смазывающие свойства.

Температура поверхностей трения незначительно отличается от температуры масла в редукторе и при расчетах эти температуры принимаются равными [6].

Мгновенная температура определяется согласно условию распределения температур в термическом контакте при локальном трении. Согласно работам М. В. Коровчинского при стационарном термическом контакте распределение температур в области контакта и в ее окрестностях пропорционально Ньютоновскому потенциалу простого слоя с плотностью, равной произведе-

нию скорости скольжения и контактных напряжений [5].

В связи с пропорциональностью температуры вспышки Ньютоновскому потенциалу В. В. Шульц в своей работе вывел прямо пропорциональную зависимость температурной вспышки от удельной мощности трения [6].

$$P_{\text{тр}} = qf v_{\text{ск}}; \quad (6)$$

где q – удельная нагрузка контакте, Н/м; f – коэффициент трения; $v_{\text{ск}}$ – скорость скольжения, м/с.

В общем случае температура вспышки пропорциональна мощности трения и обратно пропорциональна суммарной удельной теплопроводности λ материалов звеньев передачи, которые характеризуют отдачу тепла от образцов в масло.

$$t_{\text{max}} = \frac{qf v_{\text{ск}}}{\lambda_1 + \lambda_2}; \quad (7)$$

где λ_1, λ_2 – удельная теплопроводность материала звеньев пары, Вт/(м·К).

Разделив обе величины на температуру t_{max} и выразив температуру вспышки из (5), получен безразмерный критерий, оценивающий влияние температуры на заедание поверхностей.

$$K_2 = \frac{qf v_{\text{ск}}}{(t_{\text{кр}} - t_{\text{м}})(\lambda_1 + \lambda_2)} < 1 \quad (8)$$

Ниже приведен анализ размерностей величин, составляющих критерий K_2 .

$$K_2 = \frac{\text{Н/м} \cdot \text{м/с}}{\text{К} \cdot \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{м} \cdot \text{К}}{\text{К} \cdot \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{м}} = 1. \quad (9)$$

Согласно первой теореме подобия [7] перемножаем критерии 3 и 8. Поскольку степень влияния каждого фактора на начало процесса заедания неизвестно, возведем критерии в степени a и b .

$$K = \left(\frac{qf v_{\text{ск}}}{(t_{\text{кр}} - t_{\text{м}})(\lambda_1 + \lambda_2)} \right)^a \left(\frac{q}{v_{\Sigma} \rho \mu_0} \right)^b. \quad (10)$$

где a, b – коэффициенты, учитывающие влияние комплексов факторов на заедание поверхностей.

Предложенный критерий учитывает два ключевых комплекса факторов:

- температурный, т.е. влияние температуры масла на толщину масляной пленки в контакте;
- гидродинамический, т.е. влияние условий подачи масла и его физических свойств.

Основным достоинством предложенного критерия является его безразмерность, что означает возможность его использования при физическом моделировании по методу подобия. Предложенный безразмерный критерий позволяет оценивать и сравнивать по опасности возникновения заедания, как различные смазочные материалы, так и различные сочетания материалов для звеньев пары.

При физическом моделировании спироидного зацепления, согласно теореме подобия, для проведения испытаний на заедание необходимо обеспечить идентичность контакта спироидного зацепления и модели, выполнив следующие условия: обеспечить одинаковые контактные напряжения

$\sigma_{\text{к}}$; обеспечить одинаковые параметры кинематики (скорость скольжения $v_{\text{ск}}$; скорость качения v_{Σ} ; направление угловой скорости; угол между скоростью качения и скольжения); конструкционные материалы звеньев одних и тех же марок; смазочные материалы одного и того же сорта; одинаковые твердость и качество обработки поверхностей трения [8].

В качестве моделируемой передачи принята цилиндрическая спироидная передача со следующими исходными данными: межосевое расстояние: $a_w = 31,5$ мм; передаточное число: $u = 49$; номинальный вращающий момент на валу колеса – $T_2 = 30$ Н·м.

Для физического моделирования спироидного зацепления на кафедре «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины» Сибирского государственного университета путей сообщения был сконструирован лабораторный дисково-роликовый стенд. Этот стенд использовался В. Н. Анферовым и др. для проведения исследований коэффициента трения в спироидном зацеплении, на износостойкость и т.д. [1, 9]. Результаты, полученные в ходе этих испытаний, показали корректность использования данного лабораторного стенда для физического моделирования спироидного зацепления [1, 10].

Основой данного лабораторного стенда является узел трения (рис. 1), выполненный по схеме диск – ролик, применяемой для передач червячного типа, где диск является аналогом спироидного колеса, а ролик – червяка.

В своих работах В. Н. Анферов провел анализ конструкций узлов трения различных машин, где обосновал, что схема «диск – ролик» наиболее подходит для физического моделирования спироидного зацепления [1, 9].

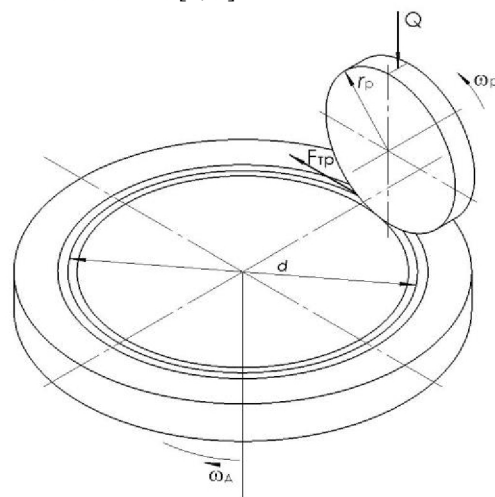


Рис. 1. Схема узла трения «диск – ролик»
Fig. 1. Scheme of friction unit «disk - roller»

Целью проводимых на дисково-роликовом стенде исследований является определение условий возникновения заедания для сочетания материалов пары сталь – сталь в условиях идентичных

работе спиройдной передачи. Под условиями возникновения заедания понимается такое соотношение факторов, влияющих на заедание при котором будут заметны внешние признаки данного вида повреждения поверхностей.

Начало процесса заедания фиксировалось с помощью измерительной рычажной системы, служащей для определения коэффициента трения в контакте образцов. При возникновении заедания, а именно при контакте микронеровностей происходит резкое увеличение коэффициента трения, более чем на 30%, что также сопровождается вибрацией лабораторного стенда [2]. Коэффициент трения тем самым служит параметром отклика или индикатором для отслеживания возникновения заедания поверхностей.

Из всех факторов, влияющих на заедание в спиройдной передаче, лабораторный дисково-роликотый стенд позволяет регулировать следующие факторы:

1. Удельную нагрузку в контакте, регулирующую с помощью нагрузочного устройства и изменения длины контактной линии, т.е. ширины ролика.

2. Скорость скольжения, которая регулируется изменением частоты вращения электродвигателя в приводе ролика.

3. Скорость качения, которая также регулируется изменением частоты вращения электродвигателя в приводе ролика.

4. Температуру масла, которая регулируется при помощи нагревателя, установленного в баке и системы управления подогревом. Температура масла условно принята равной объемной температуре поверхности трения, которая, наряду с температурой вспышки, является одной из двух составляющих температуры масляной пленки в контакте.

Остальные параметры, оказывающие меньшее влияние на задиростойкость в спиройдном зацеплении, такие как: твердость и шероховатость поверхностей трения, сорт масла и другие задаются идентичными моделируемой спиройдной передаче.

Материал диска, являющегося аналогом колеса – сталь 45 (HRC₃ 48...53).

Материал ролика, являющегося аналогом червяка – сталь 40X (HRC₃ 48...53).

Начало процесса заедания фиксировалось с помощью измерительной рычажной системы, служащей для определения коэффициента трения в контакте образцов. При возникновении заедания, а именно при контакте микронеровностей происходит резкое увеличение коэффициента трения, более чем на 30%, что также сопровождается вибрацией лабораторного стенда. Коэффициент трения тем самым служит параметром отклика или индикатором для отслеживания возникновения заедания поверхностей.

Результаты экспериментального исследования

задиростойкости в спиройдном зацеплении на физической модели представлены на рис. 2.

На всех графиках присутствуют общие тенденции изменения коэффициента трения:

– снижение коэффициента трения при увеличении скоростей скольжения и суммарной скорости качения;

– увеличение коэффициента трения при увеличении удельной нагрузки на единицу длины контактной линии;

– снижение коэффициента трения при увеличении температуры масла в редукторе;

– более высокие значения коэффициента трения для сочетания материалов сталь-сталь, по сравнению с сочетанием материалов сталь-бронза, полученные в работе [5].

При испытании образцов с сочетанием материалов сталь-сталь начало процесса заедания рабочих поверхностей образцов было зафиксировано при температурах 60°C, 80°C и 100°C при нагрузках свыше 250% от номинальной для моделируемой передачи и при скоростях скольжения свыше 152% от номинальной. На графике зависимостей коэффициентов трения это можно увидеть по резкому увеличению коэффициента трения и отклонению его значений от линии тренда.

Далее методами статистической обработки результатов эксперимента были рассчитаны коэффициенты a и b в критериальном уравнении (формула 10), после чего формула примет вид:

$$K = \left(\frac{qf v_{ск}}{(t_{кр} - t_m)(\lambda_1 + \lambda_2)} \right)^{1,42} \left(\frac{q}{v_{\Sigma} \rho \mu_0} \right)^{0,28} \quad (11)$$

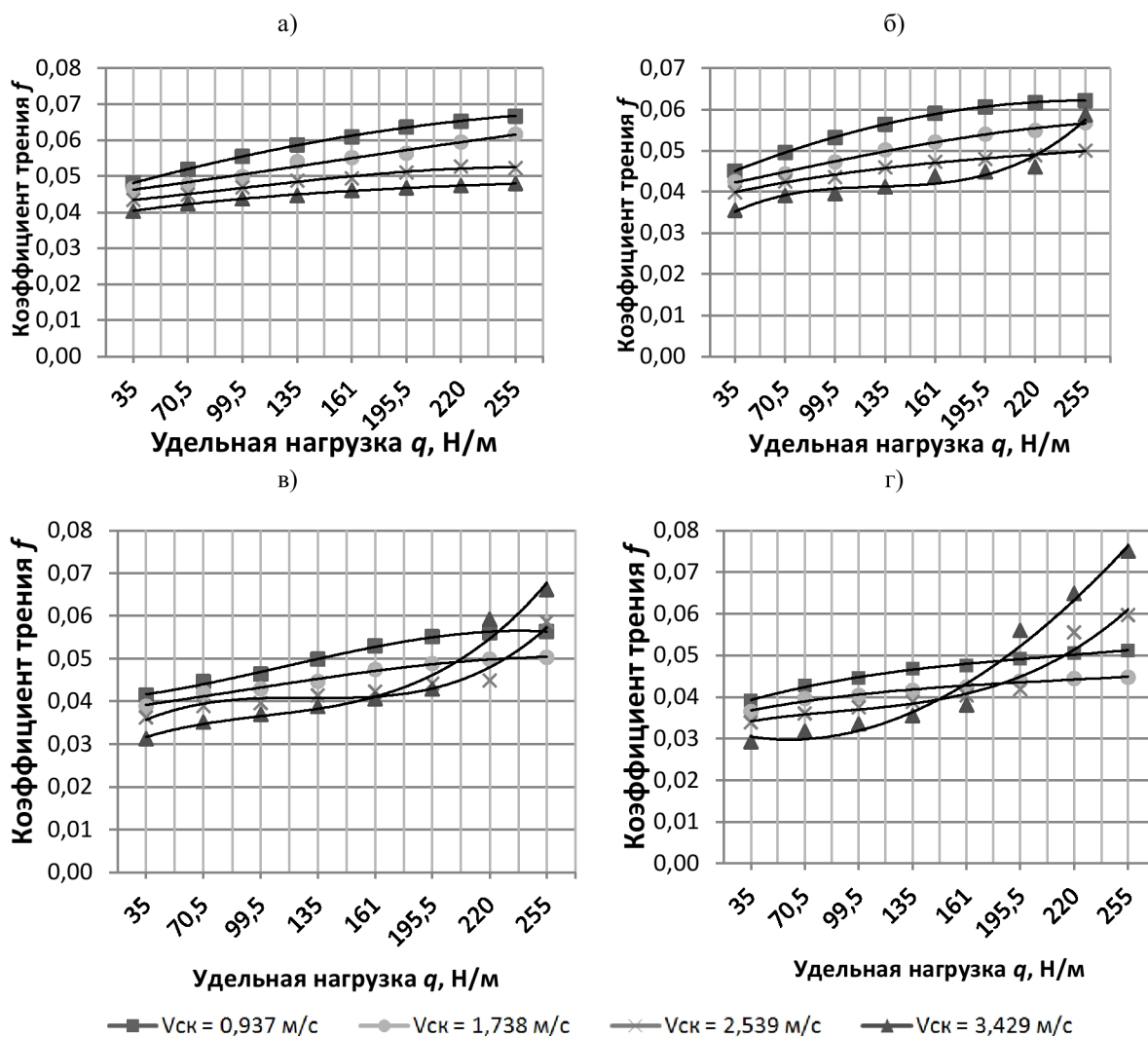
Затем были рассчитаны значения критерия заедания K на полученных экспериментальных данных с использованием базы коэффициентов трения для различных сочетаний материалов. Графики зависимостей критерия заедания от скорости скольжения и удельной нагрузки при различных температурах представлены на рис. 3.

В результате работы были получены:

– критерий заедания, применимый для спиройдного зацепления, на основе которого может быть основана методика расчета спиройдных передач на задиростойкость;

– базы значений коэффициента трения в спиройдном зацеплении при различных нагрузках, скоростях скольжения и температуре масла для сочетания материалов сталь-сталь, которые применимы для повышения точности расчетов спиройдных передач на задиростойкость, износ, самоторможение передачи, тепловой расчет, а также расчет КПД;

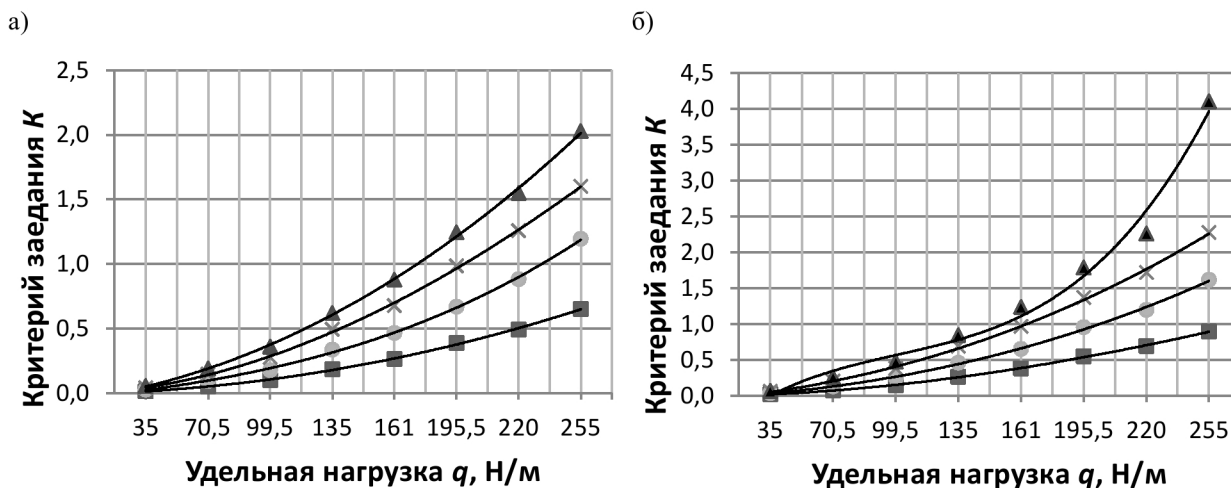
– выявлена закономерность поведения звеньев пары трения с сочетанием материалов сталь – сталь при удельной нагрузке до 250% от номинальной, скорости скольжения до 150% от номинальной и интервале температур от 40°C до 100°C.

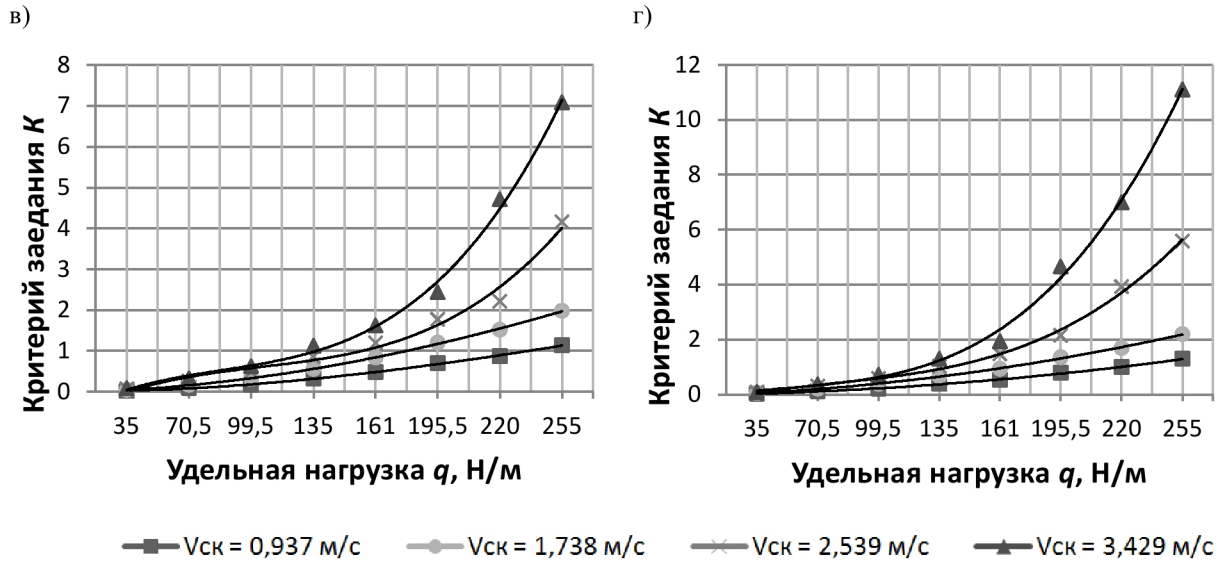


а) при температуре масла 40°C; б) при температуре масла 60°C; в) при температуре масла 80°C; г) при температуре масла 100°C;

Рис. 2. Графики зависимостей коэффициента трения от скоростей скольжения при различных удельных нагрузках для сочетания материалов сталь-сталь

Fig. 2. Charts regularity friction coefficient of sliding velocities at different specific loads for the combination of materials-steel steel





а) при температуре масла 40°C; б) при температуре масла 60°C; в) при температуре масла 80°C; г) при температуре масла 100°C

Рис. 3. Графики зависимостей критерия заедания от скоростей скольжения при различных удельных нагрузках для сочетания материалов сталь-сталь

Fig. 3. Charts regularity scuffing criterion of sliding velocities at different specific loads for the combination of materials-steel steel

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анферов В. Н. Проектирование приводов подъемно-транспортных машин на основе спироидных передач с гарантированным ресурсом по износу: монография / В. Н. Анферов. – Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 216 с.
2. Генкин М. Д., Кузьмин Н. Ф., Мишарин Ю. А. Вопросы заедания зубчатых колес. М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 296 с.
3. Коваленко Р. К. К вопросу выбора критерия для оценки задиристости спироидного зацепления // Инженерная мысль машиностроения будущего: Сборник материалов Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием. Екатеринбург: УрФУ, 2013. 524 с
4. Петрусевич А. И. Основные выводы из контактно-гидродинамической теории смазки / Известия академии наук СССР. Отделение технических наук. 1951. №2. С. 209–223.
5. Коровчинский М. В. Основы теории термического контакта при локальном трении. – В сб.: Новое в теории трения и Вопросы трения и проблемы смазки, М.: Наука, 1966, 1968
6. Шульц В. В. Температура поверхности фрикционного кольца // Надежность и долговечность машин: Сб. научн. трудов. Ин-та ЛИСИ, Л.: 1973. Вып. 79. С. 50–58.
7. Основы теории инженерного эксперимента. Ч1. Методы математического планирования эксперимента: Учебное пособие / Ю. А. Евдокимов, В. В. Гудима, А. В. Щербаков. Ростов: Изд-во РГУПС, 1994. 83 с.
8. Будински К. Дж. Испытания на износ / Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ / под ред. В. А. Белого, К. Лудемы, Н. К. Мышкина. – Нью Йорк: Аллертон пресс, 1993 – 454 с.
9. Анферов В. Н., Кузьмин А. В., Коваленко Р. К. Экспериментальное исследование коэффициента трения в спироидном зацеплении на дисково-роликовом стенде // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. Новосибирск: СГУПС, 2015. №2 (32). С. 46-52.
10. Сергеева И. В. Моделирование зацепления при проектировании приводов машин на основе спироидных передач: Дис. (...) канд. техн. наук. Новосибирск, 2012. 176 с.

REFERENCES

1. Anferov V. N. Proektirovanie privodov pod'emno-transportnyh mashin na osnove spiroidnyh peredach s garantirovannym resursom po iznosu [Designing drive handling machines, based on spiroid gears with a guaranteed resource for wear]: monograph. Berlin: Direct-Media, 2015. –216 p.

2. Genkin M. D., Kuzmin N. F., Misharin Y. A. Voprosy zaedaniya zubchatykh kolez [Problems of gear scuffing]. Moscow, 1959. – 296 p.
3. Kovalenko R. K. K voprosu vybora kriteriya dlja ocenki zadirostojkosti spiroidnogo zacepleniya [Revisited to the choice for evaluating anti-seizing property of spiroid gearing] // Inzhenernaja mysl' mashinostroeniya budushhego: Sbornik materialov Vserossijskoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem [Engineering engineering thought of the future]. Ekaterinburg: UrFU, 2013. p. 207-211.
4. Petrusovich A. I. Osnovnye vyvody iz kontaktno-gidrodinamicheskoj teorii smazki [The main conclusions of the contact-hydrodynamic lubrication theory] / Izvestija akademii nauk SSSR. Otdelenie tehniceskikh nauk [Proceedings of the Academy of Sciences USSR. Department of Technical Sciences]. 1951. №2. P. 209–223.
5. Korovchinskiy M. V. Osnovy teorii termicheskogo kontakta pri lokal'nom trenii [Fundamentals of the theory of thermal contact with the local friction] // Novoe v teorii treniya i Voprosy treniya i problemy smazki [New to the theory of friction; Questions of friction and lubrication problems], Moscow: Nauka, 1966, 1968
6. Shulz V. V. Temperatura poverhnosti frikcionnogo kol'ca [The temperature of the surface of the friction ring // Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin: Sb. nauchn. Trudov. In-ta LISI [Reliability and durability of machines: Digest of scientific papers LISI], Leningrad: 1973. R. 79. P. 50–58.
7. Yevdokimov Y. A. Osnovy teorii inzhenernogo jeksperimenta. Ch1. Metody matematicheskogo planirovaniya jeksperimenta [Fundamentals of engineering experiment theory. N1. Methods of mathematical experiment planning] / Y. A. Yevdokimov, V. V. Gudima, A. V. Shcherbakov. Rostov: RSTU, 1994. 83 p.
8. Budinski K. J. Ispytaniya na iznos [Abrasion testing] / Tribologija: Issledovaniya i prilozheniya: opyt SSHA i stran SNG [Tribology: investigations and appendices: experience practice by USA and Commonwealth of Independent countries]/ под ред. V. A. Belyi, K. Ludema, N. K. Myshkin. – New York: Allerton press, 1993 – 454 p.
9. Anferov V. N., Kuzmin A. V., Kovalenko R. K. Eksperimental'noe issledovanie koeficienta treniya v spiroidnom zaceplении na diskovo-rolikovom stende [Investigation of friction coefficient in spiroid gearing on disk and roller machine] // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya [Bulletin of Siberian transport university]. Novosibirsk, 2015. №2 (32). p. 46-52.
10. Sergeeva I. V. Modelirovanie zacepleniya pri proektirovanii privodov mashin na osnove spiroidnykh peredach [Physical modeling of gearing on the design based on machine transmissions of spiroid gears]: dissertacija kandidata tehniceskikh nauk. Novosibirsk, 2012. 176 p.

Поступило в редакцию 12 октября 2016
Received 12 October 2016