

Список літератури: 1. *Благут Е.М.* Спосіб нарізки зубчастих коліс синусоїдальної передачі Благута. Патент України №73550: МПК7 В23Р15/14. – Опубл. бюл. №8, 2005р. 2. *Грицай І.Є., Благут Е.М., Яворський В.З.* Синусоїдальні зубчасті колеса та новий ефективний метод їх виготовлення // УІЦ "Наука. Техніка. Технологія", – К., 2004. – С.47-50. 3. *Литвиняк Я.М., Грицай І.Є., Юрчишин І.І.* Технологічні особливості отримання зубчастих коліс із синусоїдальним профілем бічних поверхонь зубців // 7-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. Тези доповідей. – Львів, 18-20 травня 2005. – С.86-87. 4. *Коганов І.А.* Прогрессивная обработка зубчатых профилей и фасонных поверхностей. – Тула: Приокское книжн. из-во, 1970. – 180с. 5. *Грицай І.Є., Громнюк С.І.* Підвищення ефективності процесу нарізання зубчастих коліс на основі радіально-оберткового методу в умовах обкочування // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць Донбаської державної машинобудівної академії. – Вип.32-2013. – Краматорськ, 2013. – С.226-229. 6. *Грицай І.Є., Громнюк С.І., Кук А.М.* Параметри поперечного перерізу зрізів в радіально-обкочуальному способі нарізання зубчастих коліс з осью подачею // Вісник НУ "Львів. політехніка". Оптимізація виробничих процесів і техн. контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – №772. – Львів.: Вид-во НУ "Львів. політехніка", 2014. – С.8-14. 7. *Громнюк С.І., Грицай І.Є.* Моделювання складових сумарної похибки і точності зубчастих коліс в радіально-коловому способі зубонарізання // Вісник НТУ "Харківський політехнічний інститут". Серія "Проблеми механічного приводу". – №31(1074) – Харків: НТУ "ХПІ", 2014. – С.24-28. 8. *Hromniuk S., Hrytsaj I.* THE STUDY OF THE CUTTING FORCE AND ITS COMPONENTS IN RADIAL-CIRCULAR CUTTING OF THE GEARS // Оптимізація виробничих процесів і техн. контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – №786. – Львів: Вид-во НУ "Львів. політехніка", 2014. – С.61-67. 9. *Данильченко Ю.М., Кривошея А.В., Пастернак С.І.* Математичне моделювання законів руху дискового інструменту при обробці зубчастих коліс довольного профілю // Вісник НТУУ "КПІ", сер. Машиностроєння. – Київ, 2006. – №49. – С.104-108. 10. *Пастернак С.І., Данильченко Ю.М.* Контурна обробка зубчастих коліс з довольним профілем зубів дисковими інструментами // Матеріали доповідей Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Прогресивні напрямки розвитку машино-приладобудівних галузей та транспорту". – Севастополь: В-во СевНТУ, 2007. – С.90-91. 11. *Пастернак С.І.* Економічне обґрунтування методу контурної обробки деталей з періодичними профілями дисковим інструментом // Вісник НТУ "ХПІ": Сборник научных трудов. Сер. Проблемы механичного приводу. – Харків, 2009. – №19. – С.118-126.

Bibliography (transliterated): 1. *Blagut E.M.* Sposib narizky zubchastyh kolis sinusoidal'noyi peredachi Blaguta. Patent Ukrayiny No73550: MPK7 B23P15/14: Opubl. byul. No8, 2005 r. 2. *Gricaj I.E., Blagut E.M., Yavors'kiy V.Z.* Sinusoidal'ni zubchasti koleasa ta novij efektyvnyj metod yih vygotovlennya // UITs "Nauka. Tehnika. Tehnologiya", – Kyiv, 2004. – P.47-50. 3. *Litvynyak Ya.M., Gricaj I.E., Yurchyshyn I.I.* Tehnologichni osoblyvosti otrymannya zubchastyh kolis iz sinusoidal'nym profilem bichnyh poverhon' zubciv. // 7-j Mizhnarodnyj simpozium ukrajin's'kyh inzheneriv-mehaniikov u L'vovi. Tezy dopovidey. L'viv, 18-20 travnya 2005. – P.86-87. 4. *Koganov I.A.* Progressivnaya obrabotka zubchatyh profiley i fasonnyh poverhnostey. Tula: Priokskoe knizhn. izd., 1970. – 180p. 5. *Gricaj I.E., Gromnyuk S.I.* Pidvyshhennya efektyvnosti procesu narizannya zubchastyh kolis na osnovi radial'no-obertovogo metodu v umovah obkochuvannya. Nadijnist' instrumentu ta optimizaciya tehnologichnyh sistem. Zb. nauk. prats' Donbas'koyi derzhavnoyi mashynobudivnoyi akademiyi. – Vol.32-2013. Kramators'k, 2013. – P.226-229. 6. *Gricaj I.E., Gromnyuk S.I., Kuk A.M.* Parametry poperechnogo pererizu zriziv v radial'no-obkochuval'nomu sposobi narizannya zubchastyh kolis z os'ovoyu podacheyu. Visnyk NU "L'viv. politehnika" Optimizaciya vyrobnychyh procesiv i tehn. kontrol' u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni. – No772. – L'viv. Vyd. NU "L'viv. politehnika". – 2014. – P.8-14. 7. *Gromnyuk S.I., Gricaj I.E.* Modelyuvannya skladovykh sumarnoyi pokhybky i tochnosti zubchastykh kolis v radial'no-kolovomu sposobi zubonarizannya. Visnyk NTU "KhPI". Seriya "Problemy mehanichnoho pryvodu". – 31(1074). – Kharkiv, NTU "KhPI", 2014. – P.24-28. 8. *Gromnyuk S., Gricaj I.* THE STUDY OF THE CUTTING FORCE AND ITS COMPONENTS IN RADIAL-CIRCULAR CUTTING OF THE GEARS // Optimizaciya vyrobnychyh procesiv i tehn. kontrol' u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni. – No786. – L'viv. Vyd. NU "L'viv. politehnika". – 2014. – P.61-67. 9. *Danylchenko Yu.M., Kryvosheya A.V., Pasternak S.I.* Matematychno modelyuvannya zakoniv ruhu dyskovoho instrumentu pry obrobci zubchastyh kolis dovil'nogo profilyu // Vestnyk NTUU "KPI", ser. "Mashynostroenye". – Kyiv, 2006. – No49. – P.104-108. 10. *Pasternak S.I., Danylchenko Yu.M.* Konturna obrobka zubchastyh kolis z dovil'nym profilem zubiv dyskovymy instrumentamy // Materialy dopovidey Mizhnarodnyj nauko-technichnoyi konferenciyi studentiv, aspirantiv i molodyh vchenykh "Prohresyvni napryamky rozvytku mashyno-prykladobudivnyh galuzey ta transport". – Sevastopol': Vyd. SevNTU, 2007. – P.90-91. 11. *Pasternak S.I.* Ekonomichne obgruntuвання методу контурної обробки деталей з періодичними профілями дисковим інструментом // Vestnyk NTU "KhPI" Sb. nauch. trudov. Ser.: "Problemy mehanichnoho pryvodu". – Kharkiv, 2009. – No19. – P.118-126.

Надійшла (received) 20.03.2015

В.Л. ДОРОФЕЕВ, д.т.н., проф., главный научный сотрудник ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Россия;
Д.В. ДОРОФЕЕВ, к.т.н., доцент "МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского", Москва, Россия;
В.Н. ЖУРАВЛЁВ, д.т.н., зам. нач. управления информационных технологий ГП "Ивченко-Прогресс", Запорожье;
А.Б. ЕДИНОВИЧ, ведущий конструктор отдела зубчатых передач НИО ГП "Ивченко-Прогресс"

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК ПО ШИРИНЕ ЗУБЬЕВ, ПРОГИБА ВАЛОВ, СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ОПОРЫ, И ПОЛУЧЕНИЕ СИГНАЛОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ В СИСТЕМЕ ASGEARS

В статье описывается применение программного комплекса ASGEARS для расчета распределения нагрузок по ширине зубьев, прогиба валов и сил, действующих на опоры трансмиссий. Была применена специальная конечно-элементная модель расчета, функция формы которой полностью соответствует дифференциальному уравнению изгиба. Число ступеней вала, имеющих разные диаметры, не имеет ограничений. Учитывается угловое или радиальное закрепление узлов, радиальные силы или изгибающие моменты. ASGEARS имеет пятнадцатую уровневую реляционную базу данных, в которой хранятся данные о размерах валов. Результаты расчета выводятся в численном и графическом виде. Полученные результаты расчета о прогибах валов передаются в систему расчета зубчатых передач, где рассчитываются распределение контактных и изгибных напряжений по ширине зубьев, жесткость элементов системы, радиальные и крутильные колебания. Приведены примеры ввода данных, результаты расчета.

Ключевые слова: ASGEARS, опоры, валы, трансмиссия, функция формы, распределение нагрузок по ширине зубьев.

Введение. Программный комплекс ASGEARS разработан авторами настоящей работы, и в основном предназначен для проектирования авиационных зубчатых передач [1-4] и именно этим отличается от других известных программ расчета и проектирования зубчатых передач. В общем машиностроении этот программный комплекс используется под названием AEROFLANK, его отличие в применяемых стандартах.

Программный комплекс ASGEARS и состоит из следующих подсистем:

- 1) геометрия цилиндрических зубчатых колес с модифицированным исходным контуром (притупленные кромки зубьев, поднутренные основания, приграничные зоны, и т.д.);
- 2) геометрия цилиндрических зубчатых колес с несимметричными зубьями;
- 3) геометрия радиальных шевронных зубчатых колес;
- 4) геометрия конических с круговыми зубьями и арочных зубчатых колес;
- 5) допуски по стандартам ISO, DIN, ГОСТ;
- 6) поля допусков на форму модификации профиля и направления зубьев;
- 7) ключевые элементы наладки зубошлифовальных станков, в том числе подготовка файлов управления *.pfl;
- 8) построение графиков коэффициентов формы зубьев и графиков удельной жесткости зубьев;
- 9) расчеты прочности по ГОСТ 21354-87, ISO 6336, DIN 3990;

© В.Л. Дорофеев, Д.В. Дорофеев, В.Н. Журавлёв, А.Б. Единолич, 2015

10) построение кинематической погрешности методом решения обратной задачи теории зацепления и расчет кинетической погрешности, учитывающей деформацию зубьев;

11) подсистемы решения интегральных и дифференциальных уравнений;

12) подсистемы расчета полей напряжений с глубоким анализом глубины залегания контактных напряжений на основе интегральных уравнений В.Л. Устиненко – В.Я. Рубенчика;

13) моделирование хода изменения контактных и изгибных напряжений от входа зубьев в зацепление до выхода него и распределение напряжений по всей ширине зубьев;

14) моделирование изменения толщины слоя смазки между контактными поверхностями каждого зуба и температуры в каждой точке контакта с учетом характеристик масла;

15) моделирование крутильных и радиальных колебаний, а также их спектрального состава;

16) моделирование динамических сил, действующих на подшипники;

17) расчет стационарных и бифуркационных амплитудно-частотных характеристик вышеперечисленных процессов;

18) прямые расчеты по данным измерения погрешностей профиля зубьев колес;

19) диагностика зубчатых передач.

Чтобы реализовать перечисленные возможности ASGEARS использует большие массивы исходных данных включающих, например, зависимость вязкости масла от давления, метод формирования переходной кривой или ширину канавки между полушевронами зубчатого колеса и т.д. Поэтому ASGEARS имеет пятнадцать уровневую реляционную базу данных, каждый уровень которой допускает ввод до 256 параметров зубчатой передачи, существенно упрощающую проектирование.

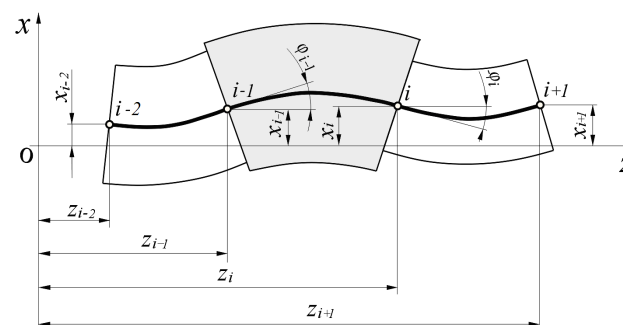
Контроль правильности входных данных и результатов расчета и моделирования выполняется с помощью двух или трехмерных изображений.

Исходные принципы расчета валов. Расчет сложных многоступенчатых и многоопорных валов выполняется численными методами. Обычно считается, что численные методы – это методы приближенные. Однако, если прогиб элемента вала определять по формуле $x_i(z) = N_i^T Y_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, а функцию формы и вектор перемещений выразить в виде:

$$N_i = \begin{Bmatrix} \frac{(z - z_i)^2 (z - z_{i-1})}{h_i^2} \\ \frac{(z - z_{i-1})^2 (z - z_i)}{h_i^2} \\ \frac{(z_i - z)^2 [2(z - z_{i-1}) + h_i]}{h_i^3} \\ \frac{(z_i - z_{i-1})^2 [2(z_i - z) + h_i]}{h_i^3} \end{Bmatrix}; Y_i = \begin{Bmatrix} \varphi_{i-1} \\ \varphi_i \\ x_{i-1} \\ x_i \end{Bmatrix},$$

где входящие в формулы величины показаны на рисунке 1, то результаты расчета будут такими же, как при аналитическом расчете.

Связь с внешними силами, учет граничных условий и техника программной реализации приведены в работах [5, 6], итоговые результаты включены в программный комплекс ASGEARS [1-4].



Расчет валов в ASGEARS. Ввод исходных данных с использованием базы данных в ASGEARS показан на рисунке 2. Результат расчета показан на рисунке 3.

Рисунок 1 – Схема дискретизации вала конечными элементами

Копир.Рис		Сохранить изменения в базу данных		Сдвиг шестерни		Сдвиг колеса		Доп. Парам.	
<input type="checkbox"/> Сортировать по возрастанию координат				<input type="checkbox"/> Ведомое		<input type="button" value="Добавить"/> <input type="button" value="Удалить"/>			
№узла	Координат	Диаметр	Ширина	Сила	Момент	Осевая	Жесткость		
эл-та	узлов [мм]	эл-та[мм]	эл-та[мм]	hwal	[hwal/мм]	сила Fx	опоры,N/mm		
1	-100 X	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	25	100	20000	0	0	0	0	0
3	100 X	25	100	0	0	0	0	0	0

Рисунок 2 – Ввод исходных данных

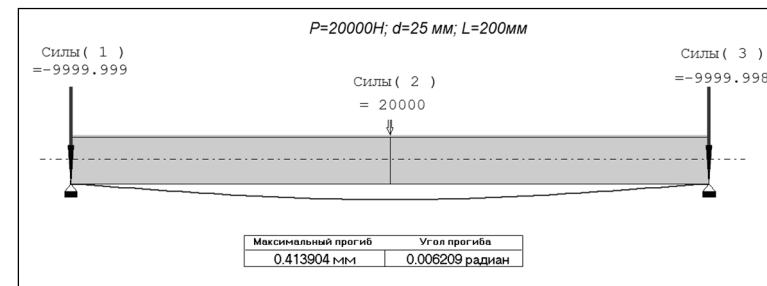


Рисунок 3 – Результат расчета

Теперь рассмотрим, как изменятся опорные реакции и прогиб вала, если к имеющимся двум опорам добавить третью, расположив её по середине между левой опорой и серединой вала. Ввод исходных данных с использованием базы данных в ASGEARS показан на рисунке 4, а результат расчета показан на рисунке 5.

Как видно из результатов расчета прогиб и силы, действующие на опоры, существенно изменились, как по величине, так и по направлению действию сил. Прогиб уменьшился шесть раз, при этом нагрузки на крайние опоры уменьшились, а добавленная опора воспринимает даже большую нагрузку, чем действующая сила.

Дальнейшие исследования показали, что расстояние между опорами связано с силами, действующими на опоры, гиперболической зависимостью: чем ближе расстояние между опорами, тем большая нагрузка на них действует.

Копир.Рис		Сохранить изменения в базу данных		Сдвиг шестерни		Сдвиг колеса		Доп. Парам.	
Сортировать по возрастанию координат									
Ведомое									
Добавить Удалить									
№ узла эл-та	Координаты узлов [мм]	Диаметр эл-та [мм]	Ширина эл-та [мм]	Сила hwal	Момент [hwal/мм]	Осевая сила Fx	Жесткость опоры, N/mm		
1	-100 X	0	0	0	0	0	0		
2	-50 X	25	100	0	0	0	0		
3	0	25	100	20000	0	0	0		
4	100 X	25	100	0	0	0	0		

Рисунок 4 – Ввод исходных данных

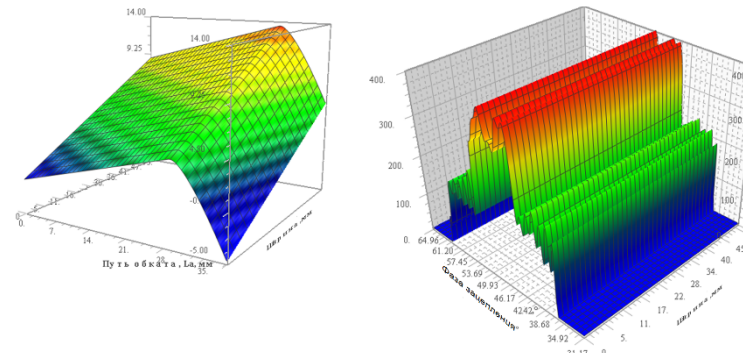


Рисунок 7 – Изображение: а – модифицированной поверхности зубьев колес; б – распределения удельных нагрузок по ширине зубьев с коррекцией направления зубьев

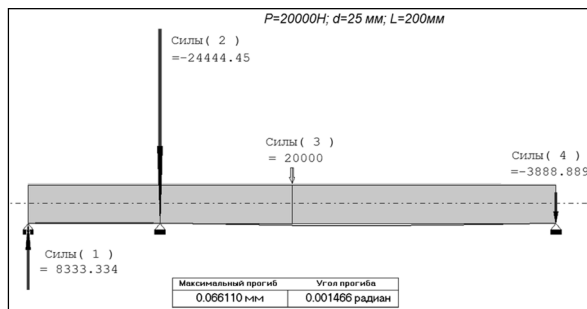


Рисунок 5 – Результат расчета

ляется суммарное угловое отклонение γ (рисунок 6,а) контактных линий.

Вследствие упругих деформаций валов, образуются отклонения в положении контактных линий зубьев зубчатых колес.

Учет прогиба валов при расчете распределения нагрузок по ширине зубьев зубчатых колес. В ASGEARS одновременно рассчитывается два вала и определяется

После устранения концентрации напряжений и обеспечения заданных характеристик передачи, проектирование завершается выводом протокола расчета.

На рисунке 7,б видно, что максимальные удельные нагрузки приходятся на однопарную зону зацепления зубьев. В двухпарном зацепления нагрузки примерно в два раза меньше. В работе [1] с программы ASGEARS описано, как выровнять эти нагрузки и повысить несущую способность передачи.

От входа зубьев в зацепление до выхода из него есть колебания нагрузок (рисунок 6,б, рисунок 7,б) – это следствие динамических процессов, возбуждаемых переменной жесткостью зубьев и погрешностями профиля зубьев колес. Эти колебания (рисунок 8), возбуждаясь зацеплением зубьев колес, имеют

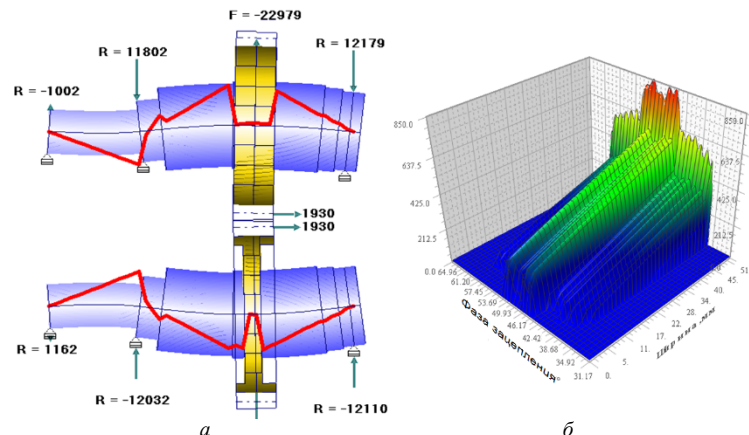


Рисунок 6 – Изображение: а – формы прогиба валов; б – распределения удельных нагрузок по ширине зубьев без коррекции направления зубьев

Результаты расчета отклонений в положении контактных линий принимаются подсистемой расчета погрешностей и далее с учетом параметров динамики рассчитываются и выводятся в виде графических изображений (рисунок 6,б), для анализа с целью последующего расчета коррекции направления зубьев (рисунок 7,а) и повторного расчета распределения нагрузок по ширине зубьев (рисунок 7,б).

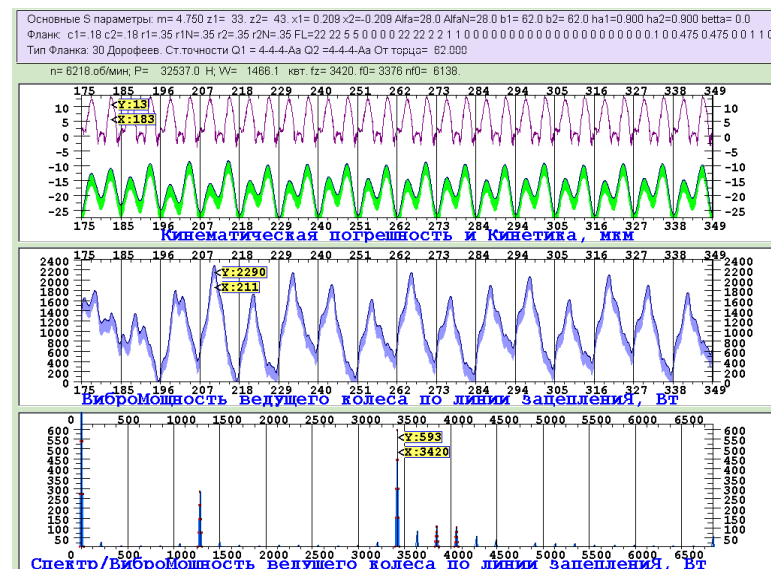


Рисунок 8 – Расчетные нелинейные колебания зубчатых колес самого мощного в мире редуктора 8-го двигателя самолета АН-70 и спектр колебаний зубчатых колес

большую энергию, от двух до пятидесяти киловатт, поэтому, если не принять специальных мер, могут стать причиной разрушения дисков, лопаток турбин, трубопроводов и других элементов конструкций.

В системе ASGEARS имеются средства, для расчета энергии колебаний, средства для их уменьшения и использования результатов расчета для целей диагностики зубчатых передач.

Характеристики нелинейных колебаний во временной области и спектр в частотной области являются признаками для диагностики зубчатых передач.

Выводы:

1. С помощью программного комплекса ASGEARS рассчитываются силы, действующие на опоры и прогибы валов.
2. Для устранения концентрации напряжений на зубьях колес применяется модификация боковой поверхности зубьев.
3. Дополнительные опоры валов существенно уменьшают прогиб валов, но могут стать причиной многократного увеличения нагрузок на опоры валов.
4. Прогиб валов – это фактор, существенно влияющий на концентрацию напряжений в зубчатых передачах.
5. Сигналы вибраций зубчатых передач в первом приближении адекватны физическим процессам пересопряжения зубьев колес редуктора, поэтому могут быть использованы для диагностики зубчатых передач.
6. Программный комплекс ASGEARS успешно применялся при проектировании зубчатых передач в ГП "Ивченко-Прогресс", изготавливаемых предприятием "Мотор Сич", г. Запорожье и АО "Салют", г. Москва.

Список литературы: 1. Кравченко И.Ф., Единолич А.Б., Яковлев В.А., Дорофеев В.Л. Экспериментальные и теоретические результаты исследования авиационных зубчатых передач для двигателей пятого и шестого поколений // Авиационно-космическая техника и технологии. – 2008. – №8(55). – С.129-134. 2. Дорофеев В. Л., Дорофеев Д.В., Единолич А.Б., Корнейчук А. В. Особенности проектирования редукторов для самых мощных в мире украинско-российских авиационных двигателей // Вісник Національного Технічного університету "ХП". Збірник наукових праць. Тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – Харків: НТУ "ХП", 2010. – №27. – С.54-61. 3. Дорофеев В.Л., Голованов В.В., Дорофеев Д.В. Система моделирования "AEROFLANK" & прямой синтез износостойких и малошумных зубчатых передач // Вісник НТУ "ХП". – 2013. – №40(1013). – С.40-49. 4. Голованов В.В., Дорофеев В.Л., Дорофеев Д.В., Новиков В.С., Павленко Ю.М. Исследование зависимости контактных напряжений в конических зубчатых передачах с круговыми зубьями от степени локализации контакта // Вісник НТУ "ХП". – 2014. – №31(1074). – С.20-23. 5. Дорофеев В.Л. Основы применения метода конечных элементов в системах автоматического проектирования. – Бишкек: Изд-во БПИ, 1991. – 21с. 6. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 304с.

Bibliography (transliterated): 1. Kravchenko I.F., Edinovich A.B., Yakovlev V.A., Dorofeev V.L. Eksperimental'nye i teoreticheskie rezultaty issledovaniya aviacionnyh zubchatyh peredach dlya dvigatelej pyatogo i shestogo pokolenij // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologii, 2008, No8 (55) – P.129-134. 2. Dorofeev V.L., Dorofeev D.V., Edinovich A.B., Kornejchuk A.V. Osobennosti proektirovaniya reduktorov dlya samyh moshhnyh v mire ukrainko-rossijskih aviacionnyh dvigatelej. // Visnik NTU "KhPI". Zb. nauk. prac', Ser. "Problemi mehanichnogo privodu". Kharkiv: NTU "KhPI", 2010. – №27. – P.54-61. 3. Dorofeev V.L., Golovanov V.V., Dorofeev D.V. Sistema modelirovaniya "AEROFLANK" & pryamoj sintez iznosostojkih i maloshumnyh zubchatyh peredach // Visnik NTU "KhPI". – 2013. – No40 (1013). – P.40-49. 4. Golovanov V.V., Dorofeev V.L., Dorofeev D.V., Novikov V.S., Pavlenko Yu.M. Issledovanie zavisimosti kontaktnyh napryazhenij v konicheskix zubchatyh peredachah s krugovymi zub'jami ot stepeni lokalizacii kontakta // Visnik NTU "KhPI". – 2014. – No31(1074). – P.20-23. 5. Dorofeev V.L. Osnovy primeneniya metoda konechnyh elementov v sistemah avtomaticheskogo proektirovaniya. Izd-vo BPI, Bishkek, 1991. – 21p. 6. Norri D., de Friz Zh. Vvedenie v metod konechnyh elementov. – Moscow.: Mir, 1981. – 304p.

Поступила (received) 22.04.2015

А.В. ЗАХАРЧЕНКО, старший преподаватель каф. автомобильного транспорта Университета "Украина", Киев

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ, ОБРАЗУЕМЫХ ПРИСАДКАМИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТРЕНИЯ, НА ХАРАКТЕР ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛОВ СОПРЯЖЕНИЙ

На основании современных трибологических источников предлагается аналитический обзор путей решения проблемы выбора по состоянию и характеру деформации поверхностных слоёв трибосопряжений определённого смазочного материала, который соответствует конкретным условиям эксплуатации. Систематизированы требования для нахождения пороговых значений результата совместного действия тепловых и механических нагрузок, когда поверхностные слои трущихся тел становятся химически и каталитически активными, что есть необходимым для интенсификации процессов образования эффективного химически модифицированного слоя.

Ключевые слова: пакет присадок, химически активные вещества, поверхность трения, поверхностный слой, хемосорбция, химически модифицированный слой, вторичная структура.

Актуальность задачи. Субшероховатость, характеризующая тонкую структуру реальной поверхности нанометрического масштаба, выявлена на поверхности микронеровностей. Механические свойства и структура поверхностных слоёв (ПС) трибосопряжений, образуемых присадками на поверхностях трения (ПвТ), рассмотрены в [1]. По мнению Б.И. Костецкого характеристики субмикроскопического рельефа являются теми факторами, без которых невозможно достаточно объективное понимание процессов трения, износа и смазки [2].

Постановка проблемы. По мнению авторов [3] при трении скольжения основную роль в диссипации внешней (подведённой) энергии в изнашиваемых объектах материалов играют эффекты на мезо- и фрагментарном структурных уровнях, т.е. в пределах от $l_m=0,1...3,0\text{мкм}$ (мезомасштаб) до $l_{\Phi}=(3...10)l_m$ (масштаб фрагментарных структур). Под макромасштабным уровнем нагружения подразумевают соответствующую глубину структурных изменений в пределах от $10\text{--}10^4\text{мкм}$. При изнашивании значительная часть потока внешней энергии подвергается диссипации за счёт многомасштабности структур в слое материала толщиной до $20...30\text{мкм}$. При этом структура и морфология ПвТ является результатом самоорганизации материала в соответствии с принципом минимума производства энтропии [3].

Качество поверхности деталей машин определяется её геометрией, строением, физическими, химическими и механическими свойствами ПС и напряжениями в них. В процессе нагружения трением (приработка и затем эксплуатация) происходит коренное изменение состояния поверхности.

Переход от исходного состояния поверхности к эксплуатационному осуществляется под воздействием факторов внешнего трения: нагрузки, скорости движения, температуры в зоне контакта и среды. Изменения качества поверхности и, особенно, состояния тонких ПС во время работы пар трения могут быть обратимыми, исчезающими после снятия нагрузки, и необратимыми, остаточными. Поэтому эксплуатационное качество поверхности определяется не только остаточными характеристиками после снятия нагрузки, но и текущими изменениями в процессе трения [4].