

ИЗНОС И ЧИСТОТА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Ю. С. СЕМЕНОВ, В. Т. ГОРБЕНКО

(Представлено научным семинаром кафедр прикладной и теоретической механики)

В качестве одного из мероприятий по повышению нагрузочной способности зубчатых передач рекомендуется применение большой разности (перепада) твердостей рабочих поверхностей зубьев шестерни и колеса [1]. Однако при этом, в случае недостаточной чистоты рабочей поверхности зубьев шестерен, как известно, возможен большой износ зубьев колеса.

На кафедре прикладной механики Томского политехнического института проводилась работа по исследованию износа зубчатых колес горных электросверл [2], [3], в том числе и при большом перепаде твердостей зубьев шестерни и колеса. Редукторы горных электросверл принадлежат к обширной группе зубчатых передач общего машиностроения, рабочие поверхности зубьев зубчатых колес этой группы после термообработки обычно не подвергаются отделочным операциям [4]. Встает вопрос, необходимо ли применение отделочных операций после термообработки во избежание большого износа в случае значительного перепада твердостей зубчатой пары, или достаточно лишь некоторое повышение чистоты рабочих поверхностей в процессе нарезания зубьев до термообработки. Кроме того, интересно было выяснить характер изменения чистоты рабочих поверхностей зубьев и коэффициента трения при износе, а также характер разрушения рабочих поверхностей зубьев и изменение геометрической формы профилей изношенных зубьев при разной исходной чистоте их рабочих поверхностей. С этой целью, в дополнение к испытаниям [2], [3], на максимальной из применявшихся нагрузок, инж. В. Т. Горбенко были выполнены опыты, условия проведения которых для тихоходных ступеней испытываемых редукторов отличались от [2], [3] более высокой исходной чистотой рабочих поверхностей зубьев при близких к [2], [3] значениям величин твердостей зубьев шестерни и колеса. Исходная чистота рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес, применявшихся в этих опытах, обеспечивалась, также как и в [2], [3], в процессе нарезания зубьев до термообработки. Никаких отделочных операций после термообработки в обоих случаях не применялось. Характеристики экспериментальных зубчатых колес и режимов испытаний приведены в табл. 1 и 2.

Испытания проводились на замкнутой установке. Для смазки зубчатых колес и подшипников в корпуса редукторов закладывалась кон-

Таблица 1

Характеристики экспериментальных зубчатых колес

Наименование параметров	Шестерня	Колесо
Модуль зацепления m мм		2
Число зубьев z	17	28
Угол зацепления α°		20
Коэффициент высоты головки зуба f_0		1
Число оборотов в минуту	838	508
Материал	Сталь 20 X	Сталь 40 X
Способ изготовления	Нарезание червячной фрезой (Шевингование)	
Термообработка	Цементация на глубину 0,4—0,6 мм, закалка	Закалка
Твердость R_c	55—60	30—35 (35—40)

Примечание: В скобках указана твердость и отделка зубьев колес группы 5. Обозначение групп приведено в табл. 2.

систентная смазка (солидол М), которая заполняла примерно 2/3 объема корпуса. Чистота рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес определялась на двойном микроскопе Линника по слепкам из гуттаперчевой массы [5]. Предварительно была сделана проверка метода слепков. Для этого был вырезан зуб шестерни и проведено сравнение данных замеров чистоты поверхности непосредственно на зубе и на слепке с него. Результаты измерений, с учетом коэффициента, учитывающего округление вершин на слепке $K=1,05$ [5], получились идентичными. Кроме того, после окончания опыта на износ из колеса вырезался зуб и производилось определение чистоты его поверхности на профиллографе-профиллометре. Величина интегрального износа зубьев определялась взвешиванием зубчатых колес на аналитических весах. Распределение износа по профилю зуба, выявление характера изменения профилей зубьев в процессе износа определялись на проекторе при увеличении X50. Изменение состояния рабочих поверхностей зубьев устанавливалось визуально.

Испытания показали, что при износе первоначальная чистота рабочих поверхностей зубьев изменяется. При этом изменяются размер и направленность неровностей. Если до износа максимальные неровности располагались вдоль зуба, параллельно оси колеса, то после износа они располагаются поперек зуба в направлении скольжения при трении. Перед испытанием высота неровностей в направлении обработки зуба (т. е. в направлении, параллельном оси колеса) в 3—3,5 раза больше, чем в перпендикулярном направлении. После испытаний высота неровностей, располагаемых вдоль зуба, уменьшается в десятки раз против первоначальной, причем изменяется характер неровностей. Если до испытания на новом зубе расстояния между гребешками составляли 0,1—0,3 мм, то после испытания неровностей приобретают более плавный, пологий характер и расстояния между ними составляют 0,5—0,8 мм.

Неровности на поверхности зубьев в направлении скольжения (перпендикулярно к оси колеса) после износа могут как уменьшаться,

Режимы нагружения и чистота рабочих поверхностей зубьев

			Г р у п п ы з у б ч а т ы х п а р ¹⁾									
			1		2		3		4		5	
			шестер- ня	колесо	шестер- ня	колесо	шестер- ня	колесо	шестер- ня	колесо	шестер- ня	колесо
Момент ²⁾ кгс·м			$\frac{81,5}{84,7}$	$\frac{142,3}{131,7}$	$\frac{140,1}{145,5}$	$\frac{244,2}{226,5}$	$\frac{152,5}{158,5}$	$\frac{266,2}{246,5}$	$\frac{213,5}{222}$	$\frac{373}{344,8}$	$\frac{213,1}{222,1}$	$\frac{373,2}{344,2}$
Высота неровностей $R_{z,мк}$	вдоль зуба	до испытаний	6,4—8		6,4—8		6,4—8		6,4—8		3,4—5,0	
		после испытан.	1— зона		0,3		0,55		0,55		0,85	
			2— зона		0,3		0,75		0,75		1,1	
			3— зона		0,3		0,55		0,55		0,85	
	поперек зуба	до испытаний	1,4—1,7		1,4—1,8		1,4—1,8		1,6—1,8		1,2—1,6	
		после испытан.	1— зона		0,4		0,9		0,9		1,8	
			2— зона		0,4		1,2		1,2		2,1	
			3— зона		0,4		0,9		0,9		1,8	
	Класс частоты до испытания по ГОСТ 2789—59		6		6		6		6		7	

Примечания; 1) Под группой понимаются одинаковые по исходной чистоте и нагрузке зубчатые пары.

2) В числителе — среднее значение момента в конце испытания для ведущих зубчатых колес, в знаменателе — то же для ведомых.

что, например, имело место при малых нагрузках, так и увеличиваться по высоте в сравнении с начальной величиной неровностей в этом направлении. Однако при этом их высота всегда меньше, чем первоначальная высота неровностей в направлении обработки. Характер неровностей, расположенных в направлении скольжения, при износе также изменяется. Они приобретают вид плавной волнистой линии с расстояниями между гребешками примерно 0,05—0,15 мм.

Чистота рабочих поверхностей на различных участках по высоте зуба после износа неодинакова. Как отмечалось в [2], [3], при износе на рабочей поверхности зуба выделяются три характерные различные по виду зоны: на головке зуба, на середине зуба у полюсной линии (по обе стороны от нее) и на ножке зуба. После износа, как правило, первая и третья зоны имеют более чистую поверхность, околополюсная же зона — более грубую поверхность (табл. 2).

Испытания также показали, что и при износе зубчатых колес полностью подтверждаются положения, отмеченные проф. П. Е. Дьяченко [6], о том, что чистота поверхности после износа определяется условиями изнашивания (т. е. режимом работы сопряжения). В наших испытаниях изменялась только величина нагрузки, в остальном же (скорость скольжения, смазка и т. д.) режим работы зубчатых колес сохранялся постоянным. Из табл. 2 видно, что при одинаковой исходной чистоте поверхностей зубьев и разной нагрузке (группы 1, 2, 3 и 4), чистота рабочих поверхностей после износа будет различной, причем, чем ниже нагрузка, тем выше чистота поверхности после износа. И наоборот, при разной исходной чистоте и одинаковой нагрузке (группы 4 и 5), после износа получается примерно одинаковая чистота рабочих поверхностей зубьев.

Вместе с изменением чистоты рабочих поверхностей зубьев изменяется коэффициент трения в зацеплении. На рис. 1 приведено изменение коэффициента трения в зацеплении при износе зубьев для различ-

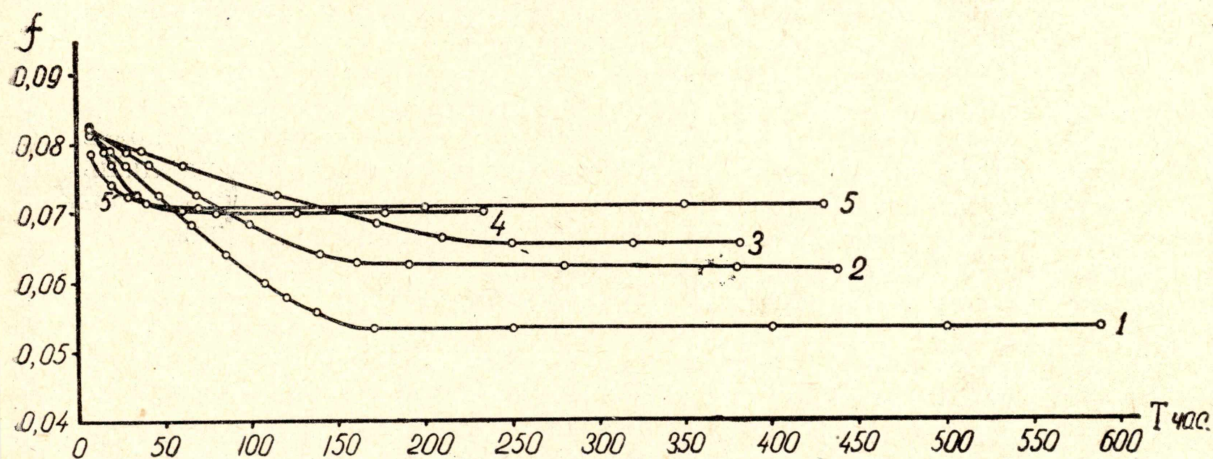


Рис. 1. Изменение коэффициента трения в зацеплении при износе зубьев. Обозначения кривых соответствуют номеру группы пар зубчатых колес согласно табл. 2.

ных нагрузок, применявшихся в наших испытаниях. Как видно из рис. 1, в начальный период работы зубчатой пары (период приработки) коэффициент трения уменьшается. К концу периода приработки при каждой нагрузке устанавливается определенная величина коэффициента трения, которая затем практически не изменяется в течение всего периода испытаний, несмотря на большой износ и выкрашивание рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес. При этом характер изменения коэффициента трения соответствует характеру изменения чистоты рабочих поверхностей зубьев. При одинаковой исходной чистоте и разных нагрузках, графики 1, 2, 3 и 4 (рис. 1), коэффициент трения вначале

примерно одинаков, а затем, в процессе износа, величина его изменяется по-разному: чем ниже нагрузка, тем меньше величина коэффициента трения после износа. При разной исходной чистоте и одинаковой нагрузке (графики 4 и 5, рис. 1) коэффициент трения в зацеплении сначала различен, а затем, после износа, величина его становится почти одинаковой. Таким образом, чистота рабочих поверхностей зубьев оказывает решающее влияние на величину коэффициента трения в зацеплении.

При износе, как указывалось, на рабочей поверхности зуба выделяются три характерные зоны, отличающиеся видом поверхности и очертанием профиля. Границы этих трех зон четко выражены и совпадают с границами зоны однопарного зацепления на профиле зуба. Изменение состояния поверхностей указанных зон в процессе износа для групп пар зубчатых колес 1, 2, 3 и 4 (табл. 2) описано в [2], [3]. В процессе приработки первая и третья зоны (на головке и ножке зуба) имеют гладкую блестящую поверхность с небольшими рисками в направлении скольжения, вторая же (околополюсная) зона имеет матовую поверхность. При сравнительно небольшой нагрузке (1-я группа пар, табл. 2) состояние поверхности всех зон оставалось почти неизменным без признаков характерного прогрессивного выкрашивания на протяжении всего времени испытаний. При средних нагрузках (группа пар 2 и 3, табл. 2) поверхности первой и третьей зон имели такой же вид, как и у первой группы, на поверхности же второй зоны колеса близ полюсной линии с течением времени появлялось выкрашивание, которое затем распространялось на всю поверхность второй зоны (как ниже, так и выше полюсной линии) и не прекращалось в течение всего времени испытаний. При наибольшей, из применявшихся в испытаниях, нагрузке (группа 4, табл. 2) после распространения выкрашивания на всю поверхность второй зоны возникало выкрашивание на первой зоне (головка зуба) ведущих колес (ускоряющая передача) и третьей зоне (ножка зуба) ведомых колес (замедляющая передача). Зубья шестерен при всех нагрузках выкрашиванию не подвергались.

При испытаниях зубчатых колес с более высокой исходной чистотой поверхностей зубьев (группа 5, табл. 2) характер изменения состояния рабочих поверхностей получался такой же, как у зубчатых колес группы 4, работавших при нагрузке той же величины, разница лишь в величине износа. На рис. 2 приведены фотоснимки рабочих поверхностей зубьев ведущих и ведомых колес обеих групп, откуда видно, что, несмотря на разную величину интегрального износа, состояние поверхностей зубьев у колес обеих групп одинаково. После испытаний на зубьях ведущих колес обеих групп ямки выкрашивания располагаются на поверхности второй и первой зон, на зубьях ведомых колес — второй и третьей зон. Во времени начало прогрессивного выкрашивания у обеих групп также примерно совпадает. В обеих случаях выкрашивание началось после завершения приработки и наступления периода равномерного (монотонного) износа.

Ввиду различных условий трения на различных участках рабочих поверхностей зубьев профили зубьев изнашиваются неравномерно [2], [3]. После износа первая зона (в области головки зуба) имеет всегда выпуклый профиль; вторая зона (в области полюса зацепления) у колеса (менее твердая поверхность) может иметь как выпуклый, так и вогнутый профиль, у шестерни (более твердая поверхность) — выпуклый профиль, третья зона (на ножке зуба) имеет всегда вогнутый профиль. Объяснение закономерностей изменения профилей зубьев приведено в работе [7]. Сказанное имеет место и при износе зубчатых колес с более высокой исходной чистотой рабочих поверхностей зубьев. На рис. 3 представлены зацепления зубчатых пар замедляющих передач из групп 4 и 5 (табл. 2).

после износа, причем из группы 5 взята зубчатая пара, профили изношенных зубьев которой наиболее сильно отличаются от первоначальных эвольвентных. Группы зубчатых пар 4 и 5 имели перед испытаниями разную чистоту поверхностей зубьев и испытывались при одинаковых нагрузках. Из рис. 3 видно, что изменение профилей зубьев обеих групп при износе носит общий характер, хотя величина износа их зубчатых колес различна. Общий характер носит и изменение линии зацепления. Как видно из рис. 3, в обоих случаях линии зацепления из прямой av превращаются в кривую $KK_1 P K_2 K_3$, а отсюда изменяются и другие параметры зацепления [8].

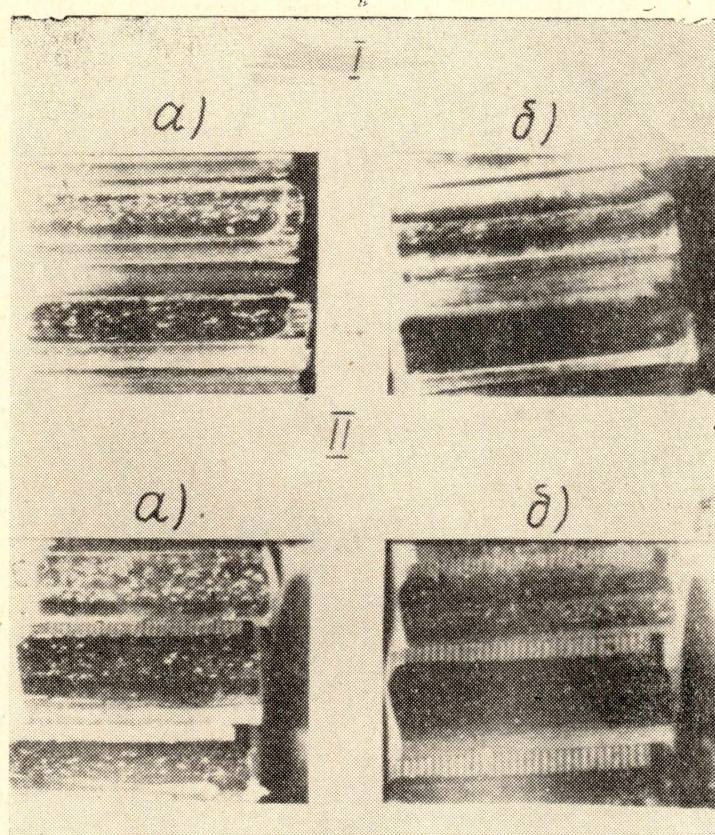


Рис. 2. Состояние рабочих поверхностей изношенных зубьев: I — колеса группы 4; II — колеса группы 5; а) зубья ведущих колес; б) зубья ведомых колес.

Изменение параметров зацепления оказывает влияние на интенсивность износа и контактную прочность зубчатой передачи. Как отмечено в [7], [8], при износе уменьшаются потери на трение в зацеплении, происходит выравнивание по профилю зуба величин удельного скольжения и удельной работы трения и снижение их максимумов, это способствует уменьшению интенсивности износа. С другой стороны, уменьшается коэффициент перекрытия, расширяется зона однопарного зацепления, увеличивается нормальное давление взаимодействующих зубьев (и следовательно, сила трения) на участках профилей зубьев, отдаленных от полюса, что ведет к снижению контактной прочности этих участков. Как видно из рис. 3, у зубчатой пары с более высокой исходной чистотой поверхностей зубьев (группа 5), даже в случае наиболее сильного изменения геометрической формы профилей изношенных зубьев, в связи с меньшей величиной интегрального износа, линия зацепления на

участке $P K_2 K_3$ искривляется меньше, чем у зубчатой пары группы 4. Отсюда у зубчатой пары группы 5 больше длина дуги зацепления $g_2 g'_2$ и, следовательно, выше коэффициент перекрытия. Так, для приведенных на рис. 3 зубчатых зацеплений коэффициент перекрытия после износа

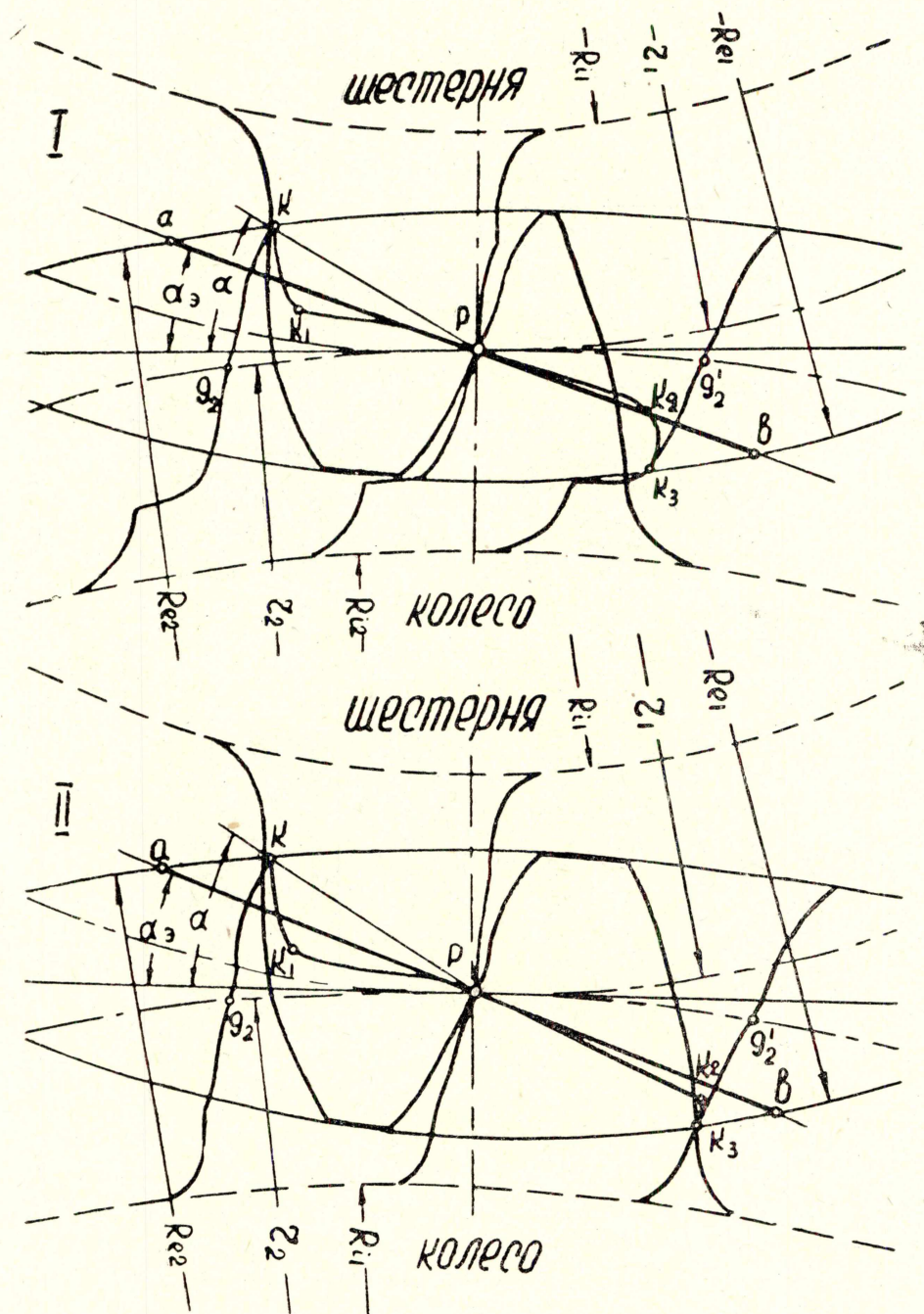


Рис. 3. Зацепление изношенных зубчатых колес: I — зубчатая пара группы 4; II — зубчатая пара группы 5.

составляет: у зубчатой пары 4 группы $\epsilon=1,03$, у зубчатой пары 5 группы $\epsilon=1,14$. Следовательно, в случае более высокой исходной чистоты рабочих поверхностей зубьев, в меньшей степени на работе передачи будет сказываться отрицательное воздействие явления уменьшения коэффициента перекрытия и увеличения зоны однопарного зацепления при износе.

На рис. 4 приведены графики интегрального износа экспериментальных зубчатых колес, откуда видно, что в наших испытаниях, в основном, имели место два периода износа: период приработки, т. е. период постепенного замедления скорости износа вследствие изменения

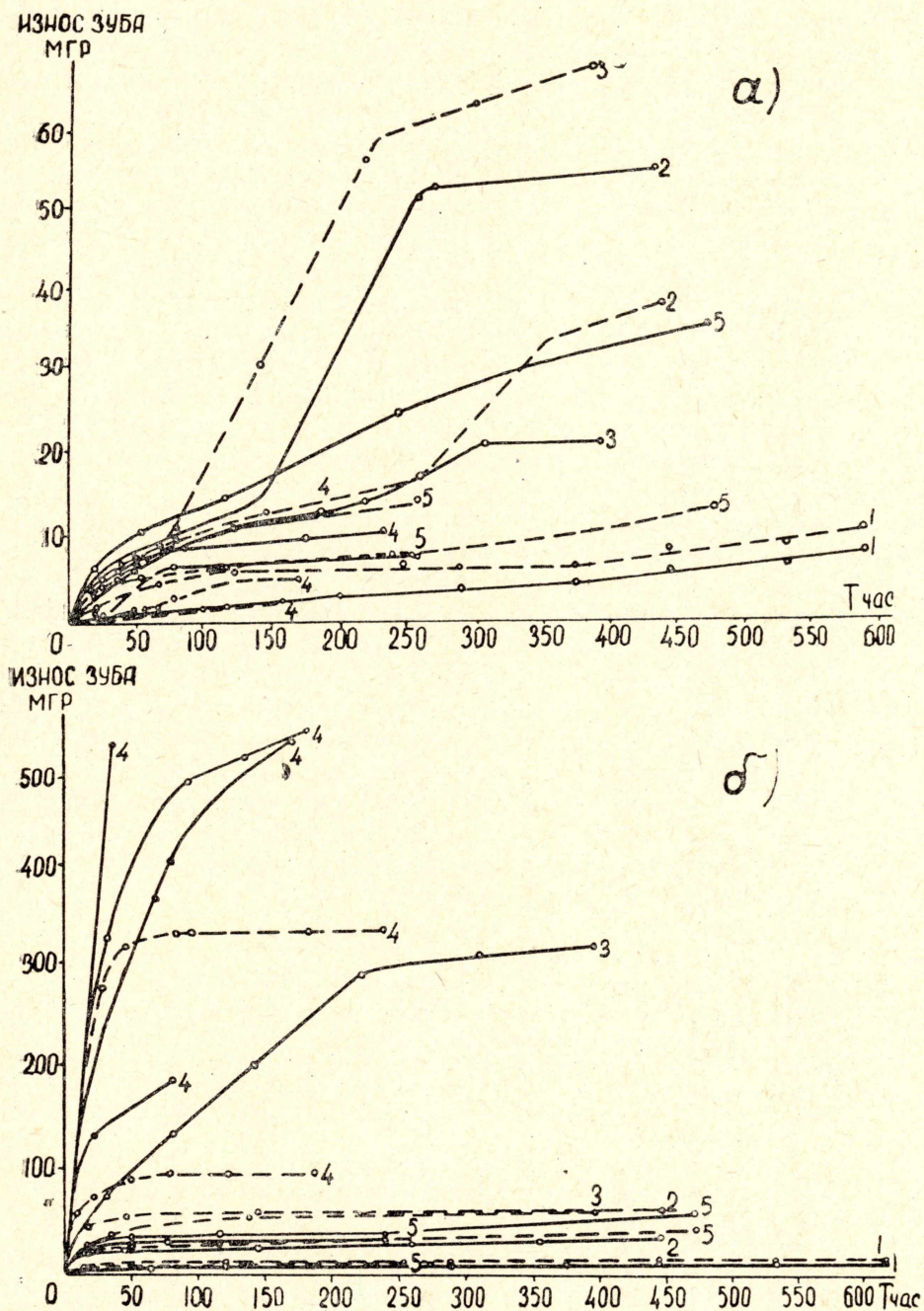


Рис. 4. Графики износа: а) шестерён, б) колёс. Обозначения кривых соответствуют номеру группы пар зубчатых колёс согласно табл. 2. Сплошные линии — ведущие шестерни и колёса, пунктирные линии — ведомые шестерни и колёса.

условий изнашивания (увеличение чистоты поверхности зубьев, приработка профилей и т. д.) и период равномерного (монотонного) износа, характеризуемый постоянством условий изнашивания [9], хотя при этом имело место выкрашивание зубьев колес (поверхность с меньшей твердостью). Причем, как отмечалось выше, при наибольшей из приме-

нявшихся в наших испытаниях нагрузок, выкрашивание не только покрывало поверхность второй зоны, но имело место на первой зоне зубьев ведущих колес и третьей зоне зубьев ведомых колес. При одинаковой исходной чистоте поверхностей зубьев скорость изнашивания, характеризуемая углом наклона кривых износа, возрастает с увеличением нагрузки, причем скорость изнашивания ведущих зубчатых колес обычно выше, чем у аналогичных ведомых. Необходимо однако заметить, что, как видно из рис. 4 а, шестерни при средних нагрузках (группы 2 и 3) изнашивались сильнее, чем при наибольшей нагрузке (группа 4), это явление имело место в испытаниях [2], [3] только при большом перепаде твердостей зубьев шестерни и колеса. Из графиков рис. 4 также видно, что в случае более низкой исходной чистоты поверхностей зубьев (группы 1, 2, 3 и 4) величина износа зубьев колес больше величины износа зубьев шестерни. При большой нагрузке разница в величинах износа зубьев колес и шестерен очень велика. В случае более высокой исходной чистоты поверхностей зубьев (группа 5), хотя величина износа зубьев колеса несколько больше величины износа зубьев шестерни, но разница между этими величинами невелика. Величина износа зубьев шестерен группы 5 примерно такая же, как у шестерен группы 4, работавших при одинаковой нагрузке. Износ же зубьев колес группы 5 много меньше износа соответствующих колес группы 4.

Итак, можно заключить, что, в случае применения зубчатых передач с большим перепадом твердостей поверхностей зубьев шестерни и колеса, некоторое повышение чистоты рабочих поверхностей в процессе нарезания зубьев до термообработки мало влияет на степень образующейся в процессе износа чистоты рабочих поверхностей зубьев, величину коэффициента трения в зацеплении после приработки зубьев, состояние поверхностей после износа и контактную прочность, а также геометрическую форму изношенного профиля, но значительно снижает величину интегрального износа зубьев колеса, главным образом в период приработки. Следовательно, в тех случаях, когда при изготовлении зубчатых колес невыгодно применение отделочных операций после термообработки, желательно получение возможно более высокой чистоты поверхностей зубьев до термообработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Килимов И. М. Расчет зубчатых передач с перепадом твердостей рабочих поверхностей зубьев. Сб. трудов ЛМИ, № 15, Ленинград, 1960.
2. Семенов Ю. С. Исследование износа зубчатых колес редукторов горных электросверл. Труды конференции по вопросам расчета, конструирования и исследований зубчатых передач и передач гибкой связью 1957 г., т. III, Изд. Одесского политехнического института, 1959.
3. Семенов Ю. С. Результаты экспериментального исследования износа зубчатых колес редукторов горных электросверл. Известия ТПИ, т. 108. Исследование бурильных машин. Металлургиздат, Свердловск, 1959.
4. Часовников Л. Д. Передачи зацеплением. Машгиз, 1961.
5. Абаджи К. И., Бойцов А. Н., Волосевич Ф. П., Гоберман П. Н., Кутай А. К., Наринский Ф. И., Одинг Г. А., Рубинов А. Д., Штюрманер Г. А. Справочник по производственному контролю в машиностроении. Машгиз, Москва — Ленинград, 1956.
6. Дьяченко П. Е. Влияние технологических факторов на износ металлов. Повышение износостойкости и срока службы машин. Машгиз, Киев — Москва, 1953.
7. Семенов Ю. С. Некоторые закономерности износа зубчатых колес. Известия ТПИ, т. 96, ч. 2, Изд. Томского университета, Томск, 1961.
8. Семенов Ю. С. Изменение параметров зубчатого зацепления при износе. Известия ТПИ, т. 96, ч. 2, Изд. Томского университета, Томск, 1961.
9. Проников А. С. Износ и долговечность станков. Машгиз, Москва, 1957.