



UDC: 620.17

## ВЗАИМОСВЯЗИ СКОРОСТЕЙ ИЗНАШИВАНИЯ ЗУБЬЕВ МЕЖДУ ВЕДУЩЕЙ И ВЕДОМОЙ ШЕСТЕРЕН

**Иргашев Амиркул Иргашевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: irgashevamirkul@mail.ru;  
ORCID: 0000-0002-7826-1687;

**Иргашев Бехзод Амиркулович,**  
доктор философии по техническим наукам (PhD),  
e-mail: irgashev\_begzod@mail.ru,  
ORCID: 0000-0001-9654-5547

Ташкентский государственный технический университет  
им. Ислама Каримова

***Аннотация.** В статье рассмотрена взаимосвязь скоростей изнашивания головки и ножки зубьев шестерен ускоряющей и понижающей передач зубчатого зацепления, учитывающих коэффициенты относительной износостойкости зубьев, зависящих от количества зубьев шестерен, участвующих в зацеплении, и передаточного отношения. Установлена закономерность изменения скоростей изнашивания, происходящих между головкой и ножкой зубьев шестерен, упрочненных объемной закалкой, закалкой током высокой частоты, цементацией и азотированием, при наличии и отсутствии в рабочей среде абразивных частиц, когда передаточное отношение имеет возрастающую (ускоряющую) или снижающую (понижающую) тенденции. Определены закономерности изменения твердостей поверхностей трения зубьев ведомого зубчатого колеса ускоряющей и понижающей передачи.*

***Ключевые слова:** головка и ножка зубьев, ускоряющая и понижающая передача, зубчатое зацепление, коэффициент относительной износостойкости, передаточное отношение, скорость изнашивания, объемная закалка, закалка током высокой частоты, цементация, азотирование, абразивные частицы.*

## ЕТАКЛОВЧИ ВА ЕТАКЛАНУВЧИ ШЕСТЕРНЯЛАРИНИНГ ЕЙИЛИШ ТЕЗЛИКЛАРИ ЎРТАСИДАГИ ЎЗАРО БОҒЛАНИШЛАР

**Иргашев Амиркул Иргашевич,**  
техника фанлари доктори, профессор;

**Иргашев Бехзод Амиркулович,**  
муҳандислик фанлари фалсафа доктори (PhD)

Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети

***Аннотация.** Мақолада тезлаштирувчи ва пасайтирувчи узатма шестернялари тишлари каллак ва пой қисмларининг ейилиш тезликлари ўртасидаги боғланишлар, тишларнинг*



нисбий ейилишига бардошлилик коэффициентини ҳисобга олган ҳолда, шестерня тишларининг сони ва узатишлар нисбати ўртасидаги боғлиқлик кўриб чиқилган. Ишчи муҳит таркибида абразив заррачалар бўлган ва бўлмаган ҳамда узатишлар нисбати ортиб борувчи (тезлаштирувчи) ёки камайтирувчи (пасайтирувчи) хусусиятга эга бўлган шестерня тишларининг каллак ва пой қисмлари орасида содир бўладиган ейилиш тезлигини ҳажмий тоблаш, юқори частотали ток билан тоблаш, цементациялаш ва азотлаш билан мустаҳкамлаш йўли билан ўзгартириш қонуниятлари аниқланган. Тезлаштирувчи ва пасайтирувчи узатмаларнинг такланувчи тишли гилдираги тишлари қаттиқлигининг ўзгариш қонуниятлари аниқланган.

**Калим сўзлар:** тишларнинг каллак ва пой қисмлари, тезлаштирувчи ва пасайтирувчи узатмалар, тишли узатма, нисбий ейилишига бардошлилик коэффициентини, узатишлар нисбати, ейилиш тезлиги, ҳажмий тоблаш, юқори ток билан тоблаш, цементациялаш, азотлаш, абразив заррачалар.

## INTERRELATION OF TOOTH WEAR RATES BETWEEN DRIVING AND DRIVEN GEARS

**Irgashev Amirkul Irgashevich,**  
Doctor of Technical Science, Professor;

**Irgashev Behzod Amirkulovich,**  
Philosophy Doctor in Technical Science (PhD)

Tashkent State Technical University  
named after Islam Karimov

**Abstract.** The article reviews interrelation of wear speeds of the accelerating and decelerating gears' teeth heads and legs, at an account of the ratio of a relative wear of the teeth depending on the number of gear teeth participating in meshing and gear ratio. Regularities of wear rate changes between gear teeth head and foot, hardened by bulk hardening, hardening by high frequency current, cementation and nitriding, in the presence and absence of abrasive particles in the working environment, when the gear ratio has increasing (accelerating) or decreasing (reducing) tendency, have been established. Hardness laws of the friction surfaces of the driven gear wheel teeth friction surfaces of the accelerating and reducing gears have been determined.

**Keywords:** tooth head and foot; accelerating and reducing gear; gear meshing; coefficient of relative wear resistance; gear ratio; wear rate; volume hardening; hardening by high frequency current; cementation; nitriding; abrasive particles.

### Введение

Одними из основных факторов, определяющих износостойкость рабочего профиля зубьев шестерен в процессе работы зубчатой передачи, являются количество зубьев ведущей и ведомой шестерен, участвующих в зацеплении, и передаточное отношение между рассматриваемыми зубчатыми колесами. Объединение влияний вышеуказанных факторов на износостойкость зубьев шестерен

назвали коэффициентом относительной износостойкости. В случае, когда зацепление происходит между головкой зуба ведущей и ножкой зуба ведомой шестерен, коэффициент относительной износостойкости больше, чем когда зацепление зубьев шестерен происходит между головкой зуба ведомой и ножкой зуба ведущей шестерен [1-3].

Этот коэффициент имеет значения больше единицы, когда зацепление происходит



между головкой зуба ведущей и ножкой зуба ведомой шестерен в полюсе зацепления, значение которого равно единице. Если зацепление происходит между головкой зуба ведомой и ножкой зуба ведущей шестерен, коэффициент относительной износостойкости имеет наименьшее значение, которое не превышает единицы [4-7].

Целью статьи является определение взаимосвязи скоростей изнашивания зубьев между ведущей и ведомой шестерен ускоряющей (с передаточным отношением меньше единицы) и понижающей (с передаточным отношением больше единицы) передач.

### Материалы и методы

Результаты исследований получены на основе теоретических и практических положений технологии машиностроения; теории упругости и пластичности; теории износа с учетом динамики зубчатой передачи, а также теории планирования эксперимента и статистической обработки данных. Экспериментальные исследования проводились в стендовых условиях на действующем оборудовании с использованием оригинальных методик и современной измерительной аппаратуры высокой точности.

### Результаты исследования и их анализ

*Взаимосвязь скоростей изнашивания зубьев ведущей и ведомой шестерен повышающей передачи*

В целях определения коэффициента относительной износостойкости предложена зависимость для ускоряющей передачи, когда зацепление происходит [1; 4] – между головкой зуба ведущей и ножкой зуба ведомой шестерен:

для головки зуба ведущей шестерни:

$$\lambda = \frac{(z_k - 1)}{\operatorname{tg} \delta_2 \cdot (z_{uu} + 1)}; \quad (1)$$

для ножки зуба ведомой шестерни:

$$\lambda = \frac{\operatorname{tg} \delta_2 \cdot (z_{uu} + 1)}{(z_k - 1)}; \quad (2)$$

в полюсе зацепления шестерен:

$$\lambda = 1; \quad (3)$$

между головкой зуба ведомой и ножкой зуба ведущей шестерен:

для головки зуба ведомой шестерни:

$$\lambda = \frac{\operatorname{tg} \delta_2 \cdot (z_{uu} - 1)}{(z_k + 1)}; \quad (4)$$

для ножки зуба ведущей шестерни:

$$\lambda = \frac{(z_k + 1)}{\operatorname{tg} \delta_2 \cdot (z_{uu} - 1)}; \quad (5)$$

Тогда скорость изнашивания, рассчитанная с учетом коэффициента относительной износостойкости зубьев, составляет для головки и ножки зубьев ведущей и ведомой шестерен:

для головки зуба ведущей шестерни:

$$\gamma_z = \frac{\operatorname{tg} \delta_2 \cdot (z_{uu} + 1) \cdot \gamma_n}{(z_k - 1)}; \quad (6)$$

для ножки зуба ведомой шестерни:

$$\gamma_n = \frac{(z_k - 1) \cdot \gamma_z}{\operatorname{tg} \delta_2 \cdot (z_{uu} + 1)}; \quad (7)$$

для ножки зуба ведущей шестерни:

$$\gamma_{en} = \frac{\operatorname{tg} \delta_2 \cdot (z_{uu} - 1) \cdot \gamma_{ez}}{(z_k + 1)}; \quad (8)$$

для головки зуба ведомой шестерни:

$$\gamma_{ez} = \frac{(z_k - 1) \cdot \gamma_{en}}{\operatorname{tg} \delta_2 \cdot (z_{uu} + 1)}; \quad (9)$$

Из отношения скоростей изнашивания (головки и ножки) зубьев ведущей и ведомой шестерен, приведенных в выражениях (6), (7), (8), (9), для расчета получена скорость изнашивания (головки и ножки) зубьев ведущей шестерни:

$$\gamma_{uu} = \frac{1,091 \cdot \Gamma_{uu} \cdot H_k^2 \cdot n_{pk} \cdot \gamma_{ak}}{\Gamma_k \cdot H_{uu}^2 \cdot n_{pu}}; \quad (10)$$

Тогда скорость изнашивания ножки зуба ведомой шестерни с учетом коэффициента относительной износостойкости зубьев [8-11]:

$$\gamma_{akn} = \frac{\operatorname{tg} \delta_2 \cdot (z_{uu} - 1) \cdot \Gamma_k \cdot \psi_2 \cdot H_{uu}^2 \cdot n_{pu} \cdot \gamma_{auz}}{1,091 \cdot (z_k + 1) \cdot \Gamma_{uu} \cdot \psi_1 \cdot H_k^2 \cdot n_{pk}}; \text{ м/ч}, \quad (11)$$



Скорость изнашивания зубьев шестерен ускоряющей передачи определялась при следующих исходных данных:  $tg\delta_2 = 0,125$ ;  $tg\delta_2 = 0,143$ ;  $tg\delta_2 = 0,167$ ;  $tg\delta_2 = 0,200$ ;  $tg\delta_2 = 0,250$ ;  $tg\delta_2 = 0,333$ ;  $tg\delta_2 = 0,500$ ;  $tg\delta_2 = 1,000$ ;  $z_{ш} = 104$ ;  $z_{ш} = 91$ ;  $z_{ш} = 78$ ;  $z_{ш} = 65$ ;  $z_{ш} = 52$ ;  $z_{ш} = 39$ ;  $z_{ш} = 26$ ;  $z_{ш} = 13$ ;  $z_{к} = 13$ ; в объемной закалке:  $\Gamma_{к} = 3,43$ ;  $\Gamma_{ш} = 3,54$ ;  $H_{ш} = 400$  МПа;  $H_{к} = 370$  МПа;  $n_{ру} = 16,41$ ;  $n_{рк} = 17,40$ ; в закалке током высокой частоты:  $\Gamma_{к} = 3,11$ ;  $\Gamma_{ш} = 3,26$ ;  $H_{ш} = 500$  МПа;  $H_{к} = 450$  МПа;  $n_{ру} = 22,58$  МПа;  $n_{рк} = 25,29$ ; в цементации:  $\Gamma_{к} = 2,98$ ;  $\Gamma_{ш} = 3,11$ ;  $H_{ш} = 550$  МПа;  $H_{к} = 500$  МПа;  $n_{ру} = 25,29$ ;  $n_{рк} = 28,06$ ; в азотировании:  $\Gamma_{к} = 2,76$ ;  $\Gamma_{ш} = 2,87$ ;  $H_{ш} = 650$  МПа;  $H_{к} = 600$  МПа;  $n_{ру} = 28,06$ ;  $n_{рк} = 30,90$ .

Изменение скорости изнашивания ножки зуба ведомой шестерни при наличии абразивных частиц в масле агрегата в зависимости

от количества зубьев шестерен и передаточного отношения показывает, что увеличение передаточного отношения с 0,125 до 1,000 приводит к снижению разницы скоростей изнашивания, происходящий в процессе изнашивания между головкой зуба ведомой и ножки зуба ведущей шестерни (по росту передаточного отношения). Ее значение при объемной закалке, закалке током высокой частоты, цементации, азотировании зависит от скорости изнашивания головки зуба ведомой шестерни на 7,3% (табл. 1). Это связано с тем, что повышение передаточного отношения в ускоряющей передаче приводит к снижению проскальзывания между зубьями зацепляемых шестерен из-за уменьшения суммарного количества зубьев ведущей и ведомой шестерен, участвующих в процессе изнашивания [12; 13].

Таблица 1

Скорость изнашивания ножки зуба ведомой шестерни в зависимости от количества зубьев шестерен и передаточного отношения

$z_{ш}$	$z_{к}$	$tg\delta_2$ передаточное отношение	Скорость изнашивания ножки зуба ведомого зубчатого колеса, м/час			
			объемная закалка	закалка ТВЧ	цементация	азотирование
104	13	0,125	$1,078 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,222 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,289 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,236 \cdot \gamma_{аиз}$
91	13	0,143	$1,078 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,221 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,288 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,235 \cdot \gamma_{аиз}$
78	13	0,167	$1,077 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,220 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,287 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,234 \cdot \gamma_{аиз}$
65	13	0,200	$1,072 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,215 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,281 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,229 \cdot \gamma_{аиз}$
52	13	0,250	$1,088 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,210 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,276 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,224 \cdot \gamma_{аиз}$
39	13	0,333	$1,060 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,201 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,266 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,215 \cdot \gamma_{аиз}$
26	13	0,500	$1,047 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,186 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,251 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,200 \cdot \gamma_{аиз}$
13	13	1,000	$1,005 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,116 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,078 \cdot \gamma_{аиз}$	$1,152 \cdot \gamma_{аиз}$

Если зацепление ускоряющей передачи происходит между головкой зуба ведомой и ножкой зуба ведущей шестерни, при повышении передаточного отношения с 0,125 до 1,000 происходит повышение разницы скоростей изнашивания между головкой зуба ведомой и ножки зуба ведущей шестерни, повышение передаточного отношения (табл. 2) происходит при объемной закалке,

закалке током высокой частоты, цементации, азотировании в зависимости от скорости изнашивания головки зуба ведомой шестерни, которое связано с тем, что в ускоряющей передаче происходит повышение проскальзывания между зубьями шестерен из-за уменьшения суммарного количества зубьев шестерен, участвующих в процессе изнашивания [14; 15].



Таблица 2

Скорость изнашивания головки зуба ведомой шестерни в зависимости от числа зубьев шестерен и передаточного отношения

$z_{ш}$	$z_{к}$	$tg\delta_2$ передаточное отношение	Скорость изнашивания головки зуба ведомого зубчатого колеса, м/час			
			объемная закалка	закалка ТВЧ	цементация	азотирование
104	13	0,125	$1,928 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,818 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,847 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,809 \cdot \gamma_{ашн}$
91	13	0,143	$1,928 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,819 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,847 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,809 \cdot \gamma_{ашн}$
78	13	0,167	$1,929 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,820 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,848 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,810 \cdot \gamma_{ашн}$
65	13	0,200	$1,933 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,823 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,852 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,814 \cdot \gamma_{ашн}$
52	13	0,250	$1,937 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,827 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,855 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,817 \cdot \gamma_{ашн}$
39	13	0,333	$1,944 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,833 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,861 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,823 \cdot \gamma_{ашн}$
26	13	0,500	$1,955 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,843 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,861 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,833 \cdot \gamma_{ашн}$
13	13	1,000	$1,995 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,878 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,908 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,868 \cdot \gamma_{ашн}$

Для расчета скорости изнашивания головки зуба ведомой шестерни при наличии в масле агрегата абразивных частиц получена зависимость:

$$\gamma_{акз} = \frac{1,091 \cdot (z_{ш} + 1) \cdot \Gamma_{ш} \cdot H_{к}^2 \cdot n_{рк} \cdot \gamma_{ашн}}{tg\delta_2 \cdot (z_{к} - 1) \cdot \Gamma_{к} \cdot H_{ш}^2 \cdot n_{ри}}, \text{ м/ч}, \quad (12)$$

Скорость изнашивания без участия абразивных частиц

Когда зацепление происходит между головкой зуба ведущей и ножкой зуба ведомой шестерни, для расчета скорости изнашивания ножки зуба ведомого зубчатого колеса получена зависимость:

$$\gamma_{дкн} = \frac{1,091 \cdot (z_{к} + 1) \cdot n_{рк} \cdot \gamma_{ашн}}{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} - 1) \cdot n_{ри}}, \quad (13)$$

Таблица 3

Скорость изнашивания ножки зуба ведомой шестерни в зависимости от числа зубьев шестерен и передаточного отношения

$z_{ш}$	$z_{к}$	$tg\delta_2$ передаточное отношение	Скорость изнашивания ножки зуба ведомого зубчатого колеса, м/час			
			объемная закалка	закалка ТВЧ	цементация	азотирование
104	13	0,125	$1,084 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,109 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,005 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,256 \cdot \gamma_{ашн}$
91	13	0,143	$1,085 \cdot \gamma_{ашн}$	$0,850 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,005 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,256 \cdot \gamma_{ашн}$
78	13	0,167	$1,086 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,111 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,006 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,257 \cdot \gamma_{ашн}$
65	13	0,200	$1,090 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,116 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,011 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,263 \cdot \gamma_{ашн}$
52	13	0,250	$1,095 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,120 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,015 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,268 \cdot \gamma_{ашн}$
39	13	0,333	$1,103 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,128 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,022 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,278 \cdot \gamma_{ашн}$
26	13	0,500	$1,117 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,142 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,035 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,294 \cdot \gamma_{ашн}$
13	13	1,000	$1,163 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,190 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,078 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,347 \cdot \gamma_{ашн}$



Данные, приведенные в таблице 3, показывают, что при зацеплении зубчатой передачи между головкой зуба ведущей и ножкой зуба ведомой шестерен, скорость изнашивания ножки зуба ведомой шестерни зависит от повышения передаточного отношения [16-18].

Зависимость скорости изнашивания головки зуба ведомого зубчатого колеса от скорости изнашивания ножки зуба ведущей шестерни определяется по следующему выражению:

$$\gamma_{окз} = \frac{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} - 1) \cdot n_{пу} \cdot \gamma_{дин}}{1,091 \cdot (z_k + 1) \cdot n_{рк}} \quad (14)$$

Зависимость скорости изнашивания головки зуба ведомой шестерни от числа зубьев шестерен и передаточного отношения при отсутствии в масле агрегата абразивных частиц приведена в таблице 4. Согласно данным, скорость изнашивания головки зуба ведомого зубчатого колеса снижается с повышением передаточного отношения. При передаточном отношении, равном единице, снижение скорости изнашивания не зависит от вида упрочняющей термической обработки [16; 17].

Таблица 4

Скорость изнашивания головки зуба ведомой шестерни в зависимости от числа зубьев шестерен и передаточного отношения

$z_{ш}$	$z_k$	$tg\delta_2$ передаточное отношение	Скорость изнашивания головки зуба ведомого зубчатого колеса, м/час			
			объемная закалка	закалка ТВЧ	цементация	азотирование
104	13	0,125	$0,922 \cdot \gamma_{аин}$	$0,990 \cdot \gamma_{аин}$	$0,976 \cdot \gamma_{аин}$	$0,796 \cdot \gamma_{аин}$
91	13	0,143	$0,928 \cdot \gamma_{аин}$	$0,989 \cdot \gamma_{аин}$	$0,975 \cdot \gamma_{аин}$	$0,796 \cdot \gamma_{аин}$
78	13	0,167	$0,921 \cdot \gamma_{аин}$	$0,988 \cdot \gamma_{аин}$	$0,975 \cdot \gamma_{аин}$	$0,795 \cdot \gamma_{аин}$
65	13	0,200	$0,917 \cdot \gamma_{аин}$	$0,984 \cdot \gamma_{аин}$	$0,970 \cdot \gamma_{аин}$	$0,792 \cdot \gamma_{аин}$
52	13	0,250	$0,913 \cdot \gamma_{аин}$	$0,980 \cdot \gamma_{аин}$	$0,966 \cdot \gamma_{аин}$	$0,789 \cdot \gamma_{аин}$
39	13	0,333	$0,907 \cdot \gamma_{аин}$	$0,973 \cdot \gamma_{аин}$	$0,959 \cdot \gamma_{аин}$	$0,783 \cdot \gamma_{аин}$
26	13	0,500	$0,896 \cdot \gamma_{аин}$	$0,961 \cdot \gamma_{аин}$	$0,947 \cdot \gamma_{аин}$	$0,773 \cdot \gamma_{аин}$
13	13	1,000	$0,860 \cdot \gamma_{аин}$	$0,922 \cdot \gamma_{аин}$	$0,909 \cdot \gamma_{аин}$	$0,742 \cdot \gamma_{аин}$

*Выбор твердости зубьев ведомой шестерни ускоряющей передачи*

Расчет скорости изнашивания ножки зуба ведомой шестерни ускоряющей передачи с участием абразивных частиц относительно твердости зубьев ведомой шестерни ( $H_k$ ) при помощи выражения (11) показывает, что для зубчатых передач с повышенным передаточным отношением для ведомого зубчатого колеса необходимо использовать материал с повышенной твердостью, а при проектировании зубчатых передач необхо-

димо проводить мероприятия, снижающие проскальзывание между зубьями шестерен. Это достигается путем использования корригированных зубчатых передач. При этом материалы ведущей и ведомой шестерен обладали высокими пределами текучести, высокой износостойкостью в абразивной среде и контактной выносливостью в смазочной среде [12; 13].

$$H_k = \sqrt{\frac{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} - 1) \cdot \Gamma_k \cdot \psi_1 \cdot H_{ш}^2 \cdot n_{пу} \cdot \gamma_{акн}}{1,091 \cdot (z_k + 1) \cdot \Gamma_{ш} \cdot \psi_2 \cdot n_{рк} \cdot \gamma_{аин}}}, МПа \quad (15)$$



Таблица 5

**Изменение твердости зуба ведомой шестерни ускоряющей передачи  
в зависимости от числа зубьев шестерен и передаточного отношения**

$z_{ш}$	$z_{к}$	$tg\delta_2$ - передаточное отношение	Твердость зуба ведомого зубчатого колеса, м/час			
			объемная закалка	закалка ТВЧ	цементация	азотирование
104	13	0,125	384,2	498,0	543,3	667,2
91	13	0,143	384,1	497,2	543,3	667,3
78	13	0,167	384,2	497,1	543,1	667,0
65	13	0,200	383,0	496,1	542,2	665,0
52	13	0,250	382,1	494,0	541,0	664,1
39	13	0,333	381,1	493,2	539,1	661,2
26	13	0,500	379,2	490,1	535,2	657,2
13	13	1,000	371,0	480,2	524,6	644,1

Согласно данным таблицы 5, в ускоряющей зубчатой передаче с повышением передаточного отношения потребная твердость зубьев ведомого зубчатого колеса, когда передаточное отношение равно 1,000, снижение твердости составляет 3,6% по сравнению с твердостью зубчатой передачи при передаточном отношении 0,125, не зависит от метода повышения твердости поверхности зуба [16; 17].

*Взаимосвязь скоростей изнашивания между зубьями ведущей и ведомой шестерен понижающей передачи*

В машинах и механизмах с зубчатыми передачами чаще всего используются понижающие передачи. Для таких зубчатых передач в целях определения коэффициента относительной износостойкости предложена аналитическая зависимость, когда зацепление происходит между головкой зуба ведущей и ножкой зуба ведомой шестерен [1; 4; 19; 20; 21]:

для головки зуба ведущей шестерни:

$$\lambda = \frac{(z_k + 1)}{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} - 1)}; \quad (16)$$

для ножки зуба ведомой шестерни:

$$\lambda = \frac{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} - 1)}{(z_k + 1)}; \quad (17)$$

в полном зацеплении шестерен:

$$\lambda = 1. \quad (18)$$

Если зацепление в зубчатой передаче происходит между головкой зуба ведомой и ножкой зуба ведущей шестерен, коэффициент износа равен:

для головки зуба ведомой шестерни:

$$\lambda = \frac{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} + 1)}{(z_k - 1)}; \quad (19)$$

для ножки зуба ведущей шестерни:

$$\lambda = \frac{(z_k - 1)}{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} + 1)}. \quad (20)$$

Скорость изнашивания зубьев шестерен, рассчитанная по коэффициенту относительной износостойкости зубьев шестерен, равна:

для головки зуба ведущей шестерни:

$$\gamma_z = \frac{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} + 1) \cdot \gamma_n}{(z_k - 1)}; \quad (21)$$

для ножки зуба ведомой шестерни:

$$\gamma_n = \frac{(z_k - 1) \cdot \gamma_z}{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} + 1)}; \quad (22)$$

для ножки зуба ведущей шестерни:

$$\gamma_{вн} = \frac{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} - 1) \cdot \gamma_{гз}}{(z_k + 1)}, \quad (23)$$

для головки зуба ведомой шестерни:



$$\gamma_{вз} = \frac{(z_k - 1) \cdot \gamma_{вн}}{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} + 1)}. \quad (24)$$

Тогда скорость изнашивания ножки зуба ведомой шестерни с учетом факторов, влияющих на износостойкость, в зависимости от скорости изнашивания головки зуба ведущей шестерни равна:

$$\gamma_{акн} = \frac{1,091 \cdot (z_k + 1) \cdot \Gamma_{ш} \cdot H_k^2 \cdot n_{рк} \cdot \gamma_{аиэ}}{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} - 1) \cdot \Gamma_k \cdot H_{ш}^2 \cdot n_{рш}}, м/ч, \quad (25)$$

Скорость изнашивания, зависящая от количества зубьев шестерен и передаточного отношения при участии в процессе изнашивания абразивных частиц, приведена в таблице 6.

Таблица 6

**Изменение скорости изнашивания ножки зуба ведомого колеса в зависимости от количества зубьев шестерен и передаточного отношения**

z <sub>ш</sub>	z <sub>к</sub>	tgδ <sub>2</sub> передаточное отношение	Скорость изнашивание ножки зуба ведомого зубчатого колеса, м/час			
			объемная закалка	закалка ТВЧ	цемен- тация	азотиро- вание
13	104	8,000	0,850 · γ <sub>аиэ</sub>	0,824 · γ <sub>аиэ</sub>	0,852 · γ <sub>аиэ</sub>	0,888 · γ <sub>аиэ</sub>
13	91	7,000	0,850 · γ <sub>аиэ</sub>	0,825 · γ <sub>аиэ</sub>	0,853 · γ <sub>аиэ</sub>	0,889 · γ <sub>аиэ</sub>
13	78	6,000	0,936 · γ <sub>аиэ</sub>	0,826 · γ <sub>аиэ</sub>	0,855 · γ <sub>аиэ</sub>	0,891 · γ <sub>аиэ</sub>
13	65	5,000	0,938 · γ <sub>аиэ</sub>	0,828 · γ <sub>аиэ</sub>	0,857 · γ <sub>аиэ</sub>	0,893 · γ <sub>аиэ</sub>
13	52	4,000	0,942 · γ <sub>аиэ</sub>	0,831 · γ <sub>аиэ</sub>	0,860 · γ <sub>аиэ</sub>	0,897 · γ <sub>аиэ</sub>
13	39	3,000	0,948 · γ <sub>аиэ</sub>	0,837 · γ <sub>аиэ</sub>	0,866 · γ <sub>аиэ</sub>	0,902 · γ <sub>аиэ</sub>
13	26	2,000	0,960 · γ <sub>аиэ</sub>	0,847 · γ <sub>аиэ</sub>	0,876 · γ <sub>аиэ</sub>	0,974 · γ <sub>аиэ</sub>
13	13	1,000	0,995 · γ <sub>аиэ</sub>	0,897 · γ <sub>аиэ</sub>	0,909 · γ <sub>аиэ</sub>	0,947 · γ <sub>аиэ</sub>

Согласно этому, с повышением передаточного отношения скорость изнашивания ножки зуба ведомого колеса снижается [9; 10; 12]. С передаточным отношением, равным единице, скорость изнашивания больше на 6,6% по сравнению со скоростью изнашивания зубьев шестерен, когда передаточное отношение составляет 8,000, независимо от вида упрочняющей обработки поверхности зуба ведомого зубчатого колеса.

Скорость изнашивания головки зуба ведомой шестерни в зависимости от числа зубьев шестерен и передаточного отношения определяется:

$$\gamma_{акз} = \frac{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} - 1) \cdot \Gamma_k \cdot H_{ш}^2 \cdot n_{рш} \cdot \gamma_{аиш}}{1,091 \cdot (z_k + 1) \cdot \Gamma_{ш} \cdot H_k^2 \cdot n_{рк}}, м/ч, \quad (26)$$

Изменение скорости изнашивания головки зуба ведомого колеса в зависимости

от числа зубьев шестерен и передаточного отношения с участием абразивных частиц в масле агрегата приведено в таблице 7. Скорость изнашивания головки зуба ведомого зубчатого колеса при передаточном отношении 8,000 повышается независимо от вида упрочняющей обработки поверхностей трения зубьев.

Для расчета скорости изнашивания ножки зуба ведомой шестерни без участия абразивных частиц в зависимости от скорости изнашивания головки зуба получена формула:

$$\gamma_{окн} = \frac{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} - 1) \cdot n_{рш} \cdot \gamma_{оиэ}}{1,091 \cdot (z_k + 1) \cdot n_{рк}}, м/ч, \quad (27)$$

Скорость изнашивания ножки зубьев ведомого зубчатого колеса без участия абразивных частиц в зависимости от количества зубьев шестерен и передаточного отношения приведена в таблице 8.





Таблица 7

Изменение скорости изнашивания головки зуба ведомого колеса в зависимости от числа зубьев шестерен и передаточного отношения

$z_{ш}$	$z_{к}$	$tg\delta_2$ передаточное отношение	Скорость изнашивания головки зуба ведомого зубчатого колеса, м/час			
			объемная закалка	закалка ТВЧ	цементация	азотирование
13	104	8,000	$1,071 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,214 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,175 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,126 \cdot \gamma_{ашн}$
13	91	7,000	$1,071 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,213 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,173 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,125 \cdot \gamma_{ашн}$
13	78	6,000	$1,068 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,211 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,171 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,123 \cdot \gamma_{ашн}$
13	65	5,000	$1,066 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,208 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,168 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,120 \cdot \gamma_{ашн}$
13	52	4,000	$1,061 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,203 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,164 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,116 \cdot \gamma_{ашн}$
13	39	3,000	$1,055 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,196 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,156 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,108 \cdot \gamma_{ашн}$
13	26	2,000	$1,042 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,181 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,142 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,095 \cdot \gamma_{ашн}$
13	13	1,000	$1,005 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,138 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,102 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,056 \cdot \gamma_{ашн}$

Таблица 8

Скорость изнашивания ножки зуба ведомого зубчатого колеса в зависимости от количества зубьев шестерен и передаточного отношения

$z_{ш}$	$z_{к}$	$tg\delta_2$ - передаточное отношение	Скорость изнашивания ножки зуба ведомого зубчатого колеса, м/час			
			объемная закалка	закалка ТВЧ	цементация	азотирование
13	104	8,000	$0,887 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,939 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,930 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,922 \cdot \gamma_{ашг}$
13	91	7,000	$0,887 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,938 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,929 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,921 \cdot \gamma_{ашг}$
13	78	6,000	$0,886 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,936 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,927 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,920 \cdot \gamma_{ашг}$
13	65	5,000	$0,884 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,934 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,925 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,917 \cdot \gamma_{ашг}$
13	52	4,000	$0,880 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,930 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,921 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,914 \cdot \gamma_{ашг}$
13	39	3,000	$0,875 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,924 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,915 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,908 \cdot \gamma_{ашг}$
13	26	2,000	$0,864 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,913 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,904 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,896 \cdot \gamma_{ашг}$
13	13	1,000	$0,995 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,995 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,995 \cdot \gamma_{ашг}$	$0,995 \cdot \gamma_{ашг}$

С повышением передаточного отношения до 8,000 скорость изнашивания зубьев увеличивается независимо от вида упрочняющей термической обработки поверхности зуба. Скорость изнашивания зубьев ведомой шестерни в зависимости от скорости из-

нашивания ведущей шестерни без участия в процессе изнашивания абразивных частиц определялась так:

$$\gamma_{окз} = \frac{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} - 1) \cdot n_{пу} \cdot \gamma_{ашн}}{1,091 \cdot (z_k + 1) \cdot n_{рк}} \quad (28)$$

Таблица 9

Скорость изнашивания головки зуба ведомого колеса в зависимости от количества зубьев шестерен и передаточного отношения

$z_{ш}$	$z_{к}$	$tg\delta_2$ передаточное отношение	Скорость изнашивания головки зуба ведомого зубчатого колеса, м/час			
			объемная закалка	закалка ТВЧ	цементация	азотирование
13	104	8,000	$1,116 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,065 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,075 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,083 \cdot \gamma_{ашн}$
13	91	7,000	$1,117 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,067 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,077 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,084 \cdot \gamma_{ашн}$
13	78	6,000	$1,119 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,069 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,079 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,086 \cdot \gamma_{ашн}$
13	65	5,000	$1,122 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,071 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,082 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,089 \cdot \gamma_{ашн}$
13	52	4,000	$1,126 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,075 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,086 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,093 \cdot \gamma_{ашн}$
13	39	3,000	$1,133 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,082 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,093 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,208 \cdot \gamma_{ашн}$
13	26	2,000	$1,147 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,096 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,106 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,100 \cdot \gamma_{ашн}$
13	13	1,000	$1,190 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,136 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,147 \cdot \gamma_{ашн}$	$1,155 \cdot \gamma_{ашн}$

Согласно результатам расчета, скорость изнашивания головки зуба ведомого колеса, приведенная в таблице 9, имеет наибольшее значение, когда передаточное отношение зубчатой передачи равно 1,000. При этом повышается скорость изнашивания зубьев шестерен передаточным отношением, равным 8,000, независимо от вида упрочняющей обработки зубьев шестерен [4; 8; 14].

*Выбор твердости зубьев ведомой шестерни понижающей передачи*

Сравнение результатов расчета твердости зубьев ведомого зубчатого колеса проводилось на ускоряющей и понижающей передачах. Для этого зубчатые передачи имели одинаковое суммарное количество зубьев – 117. Результаты расчета твердости пони-

жающей зубчатой передачи с передаточным отношением 8,000 и ускоряющей передачи с передаточным отношением 0,125 показали, что твердость зубьев ведомого колеса ускоряющей передачи оказалась на 13,8% больше по сравнению с твердостью зубьев ведомого колеса с понижающей передачей (табл. 5, 10). Это связано с тем, что на понижающей передаче с каждым зубом ведущего колеса одновременно имеют контакт несколько зубьев ведомого зубчатого колеса, так как в ведомом колесе понижающей передачи количество контактируемых зубьев больше, чем у ведомого зубчатого колеса ускоряющей передачи [13; 14]:

$$H_k = \sqrt{\frac{1,091 \cdot (z_k - 1) \cdot \Gamma_k \cdot \psi_2 \cdot H_w^2 \cdot n_{пу} \cdot \gamma_{ашн}}{tg\delta_2 \cdot (z_{ш} + 1) \cdot \Gamma_{ш} \cdot \psi_1 \cdot n_{рк} \cdot \gamma_{акс}}}, МПа \quad (29)$$

Таблица 10

Изменение твердости зуба ведомой шестерни понижающей передачи в зависимости от числа зубьев шестерен и передаточного отношения

$z_{ш}$	$z_{к}$	$tg\delta_2$ - передаточное отношение	Твердость зуба ведомого зубчатого колеса, м/час			
			объемная закалка	закалка ТВЧ	цементация	азотирование
13	104	8,000	283,6	367,9	401,1	492,7
13	91	7,000	283,4	366,9	400,8	492,4
13	78	6,000	283,2	366,6	400,4	491,9
13	65	5,000	281,9	365,1	399,0	489,5
13	52	4,000	281,8	363,1	397,6	488,2
13	39	3,000	279,2	361,3	395,0	484,4
13	26	2,000	275,8	356,6	389,3	478,2
13	13	1,000	264,7	342,4	381,7	459,5



## Выводы

Таким образом, по результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. В ускоряющей передаче:

- повышение передаточного отношения с 0,125 до 1,000 приводит к снижению разницы скоростей изнашивания между головкой зуба ведомой и ножкой зуба ведущей шестерни, значение которой составляет 7,3% при объемной закалке, закалке током высокой частоты, цементации и азотировании;

- при повышении передаточного отношения твердости зубьев ведомого зубчатого колеса, когда передаточное отношение равно 1,000, снижение твердости составляет 3,6% по сравнению с твердостью зубчатого

зацепления при передаточном отношении 0,125.

2. В понижающей зубчатой передаче повышение передаточного отношения с 1,0 до 8,0 приводит к повышению скорости изнашивания головки по сравнению с ножкой зуба шестерен на 6,6%, независимо от вида упрочняющей обработки поверхности.

3. В понижающей зубчатой передаче с передаточным отношением 8,000 и ускоряющей передаче с передаточным отношением 0,125, имеющих одинаковое суммарное количество зубьев, твердость зубьев ведомого колеса ускоряющей передачи на 13,8% больше, чем твердость зуба ведомого колеса понижающей передачи.

## REFERENCES

1. Ikramov U.A., Irgashev A. Term of oil replacement in gear transmissions. *Friction and Wear*, 1989, vol. 10, no. 3, pp. 545-554.
2. Dudas I. *The theory and practice of worm gear drives*. London, Penton press, 2000, 314 p.
3. Wojnarowski J., Onishchenko V. Tooth wear effects on spur gear dynamics. *Mechanism and Machine Theory*, Elsevier Science Ltd, Oxford, UK, February 2003, vol. 38, issue 2, pp. 161-178.
4. Ikramov U.A., Irgashev A., Makhkamov K.H. Calculation model to assess the wear resistance of gears by concentrations of wear products in oil. *Friction and Wear*, 2003, vol. 24, no. 6, pp. 620-625.
5. Pat. 20120000305 USA. Hybrid enveloping spiroid and worm gear. G. Kazkaz, M. Puppala, D. Richard; Illinois Tool Works. Published on 05-Jan-2012.
6. Wang Q.J. *Encyclopedia of Tribology*. Q.J. Wang, Y-W. Chung. Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2013, 413 p.
7. Gorlenko O.A., Makarov G.N., Shnyrikov I.O. Increasing the contact endurance of the teeth of spur gear drives. *Friction and lubrication in machines and mechanisms*, 2014, no. 6, pp. 25-27.
8. Irgashev A. *Assessment of wear resistance of rolling friction units working in abrasive environment*. Tashkent, Tashkent State Technical University, 1996, 131 p.
9. Ikramov U., Makhkamov K., Irgashev A. Method of choosing a material for friction knots, working in the presence of abrasive particles in the gap. *Proceedings of the II International Conference "Wear of machines by particles"*, Prague, 1987, pp. 6-45.
10. Ikramov U.A., Irgashev A. About a condition of the theory of abrasive wear and some aspects of calculation of gear-wear. *Technical sciences*. Tashkent, 1995, no. 1-4, pp. 111-121.
11. Irgashev A. The choice of gearing module of gears by strength and wear resistance conditions. *Materials of the International Conference "Resource- and energy-saving, environmentally friendly composite materials"*. Tashkent, 2013, September 19-21, pp. 386-388.



12. Development of methodology of theoretical estimation of parameters and duration of wear testing of gear. Materials Report on research work. Development of scientific bases of increasing wear resistance of gear drives of units of mobile machines and industrial equipment (intermediate). Tashkent, Tashkent State Technical University, 2014, 86 p.
13. Development of methods to improve the wear resistance of gears. Report on research work. Development of scientific foundations to improve the wear resistance of gears of units of mobile machines and industrial equipment. Tashkent, Tashkent State Technical University, 2015, 94 p.
14. Irgashev A. Methodological bases of increasing wear resistance of gears of heavily loaded gear transmissions of machine units. D. Technical Sciences, Tashkent, 2005, 244 p.
15. Irgashev A., Irgashev B.A. Wear resistance of gears. Tashkent, Tashkent State Technical University, 2013, 165 p.
16. Shaabidov Sh.A., Irgashev A., Mirzaev K.K. Increasing the operational properties of the surface layers of machine parts. Monograph. Tashkent, Tashkent State Technical University, 2012, 176 p.
17. Irgashev A., Mirzaev N.N., Irgashev D.A. Assessment of wear of machine parts by concentrations of wear products in oil. Tashkent, Tashkent State Technical University, 2012, 160 p.
18. Ikramov U.A., Irgashev A. Analytical method of predicting the durability of gears by concentrations of wear products. Bulletin of the Tashkent State Technical University, Tashkent, 1994, no. 1-2, pp. 126-130.
19. Dubovik E.A. Features of wear of gear transmissions. Friction and lubrication in machines and mechanisms, 2015, no. 3, pp. 31-35.
20. Zamyatin A.Y., Zamyatin V.Y. Friction-fatigue properties of gears. Friction and Wear, 1999, vol. 1, no. 3, pp. 394-397.
21. Malikov A.A., Likhosherst V.V., Shalobaev E.V. Analysis and classification of the wear process of the gears. Reference book. Engineering Journal, 2011, no. 9, pp. 2-11.

**Рецензент:** Т.Р. Пулатов, PhD, доцент, заведующий кафедрой “Машиностроение и авиакосмический инжиниринг”, Туринский политехнический университет в Ташкенте.