

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН ЧЕРВЯЧНОЙ ФРЕЗОЙ НА НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ**

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*В статье рассмотрены методика и основные результаты экспериментального исследования влияния режимов зубофрезерования цилиндрических шестерен на параметр шероховатости  $R_a$  и микротвердость  $H_m$  поверхностей зубьев. Показана возможность моделирования указанных взаимосвязей статистическими методами. Установлены форма и характеристики принятых моделей.*

**Задачи исследования.**

Как показано в [1] при зубофрезеровании цилиндрических шестерен в зоне резания действуют различные силовые и тепловые процессы, влияющие на формирование геометрических и физико-механических характеристик качества поверхностей обработанных зубьев.

Анализ пооперационного изменения характеристик качества поверхностей зубьев при обработке цилиндрических шестерен [2] показывает, что имеет место технологическое наследование этих характеристик на основных операциях обработки зубьев. В результате при зубонарезании формируется до 54% дисперсии этих характеристик для шестерен, прошедших операции зубофрезерования, шевингования, ХТО, зубохонингования, зубообкатки. Знание взаимосвязей указанных характеристик с режимами зубофрезерования открывает возможность управления ими как при зубонарезании, так и в готовых зубчатых колесах.

**Основные результаты.**

В данной статье показаны результаты выполненного нами исследования влияния скорости резания  $V$ , м/мин и подачи  $S$ , мм/мин на такие характеристики качества поверхности зубьев цилиндрических шестерен при зубофрезеровании, как параметр шероховатости поверхностей зубьев  $R_a$  (мкм) и их микротвердость  $H_m$ , МПа. Исследование было выполнено для прямозубых шестерен ( $m = 4$  мм,  $z = 30$ ) из стали 25ХГТ, характерной для автотракторостроения.

Сначала нами было выполнено исследование формы корреляционных зависимостей рассматриваемых параметров качества зубчатых колес от режимов зубофрезерования по схеме полного факторного эксперимента (ПФЭ) с добавлением 5-и опытов в центре плана. Используемая при этом матрица планирования эксперимента приведена в таблице 1.

Анализ полученных линий регрессии (рис. 1 и , а также критериев адекватности модели (критерия Фишера  $F$  и средней относительной ошибки уравнения регрессии  $\epsilon_{ср}$ . [3]) позволил установить, что взаимосвязи  $R_a$  с  $V$  и  $S$  с достаточной точностью можно считать линейными, а  $H_m$  с  $V$  и  $S$  – нелинейными. Поэтому в дальнейшем более углубленные исследования указанных линейных взаимосвязей нами были выполнены по схеме ПФЭ (первые 4 опыта в табл. , а нелинейных зависимостей – по схеме рототабельного центрального композиционного планирования (РЦКП), матрица которого приведена в таблице 2.

Выбор интервалов изменения режимов зубофрезерования цилиндрических шестерен производился нами с учетом рекомендаций технической литературы [4], производственного опыта и возможностей зуборезного оборудования. Принятые интервалы изменения режимов зубофрезерования в выполненных исследованиях показаны в таблице 3.

**Таблица 1 – Матрица эксперимента при предварительном исследовании взаимосвязей параметров качества поверхностей зубьев шестерен с режимами зубофрезерования**

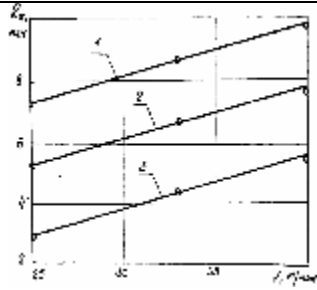
Номер опыта	Факторы		Результаты параллельных опытов		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y <sub>j1</sub>	Y <sub>j2</sub>	Y <sub>j3</sub>
1	-1	-1	Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>13</sub>
2	+1	-1	Y <sub>21</sub>	Y <sub>22</sub>	Y <sub>23</sub>
3	-1	+1	Y <sub>31</sub>	Y <sub>32</sub>	Y <sub>33</sub>
4	+1	+1	Y <sub>41</sub>	Y <sub>42</sub>	Y <sub>43</sub>
Окончание таблицы 1					
5	0	-1	Y <sub>51</sub>	Y <sub>52</sub>	Y <sub>53</sub>
6	-1	0	Y <sub>61</sub>	Y <sub>62</sub>	Y <sub>63</sub>
7	+1	0	Y <sub>71</sub>	Y <sub>72</sub>	Y <sub>73</sub>
8	0	+1	Y <sub>81</sub>	Y <sub>82</sub>	Y <sub>83</sub>
9	0	0	Y <sub>91</sub>	Y <sub>92</sub>	Y <sub>93</sub>
X <sub>1</sub> – скорость резания V, м/мин X <sub>2</sub> – подача S, мм/мин (- – нижний уровень факторов X <sub>1</sub> и X <sub>2</sub> (+ – верхний уровень факторов X <sub>1</sub> и X <sub>2</sub> (0) – средний уровень факторов X <sub>1</sub> и X <sub>2</sub>					

**Таблица 2 – Матрица РЦКП эксперимента**

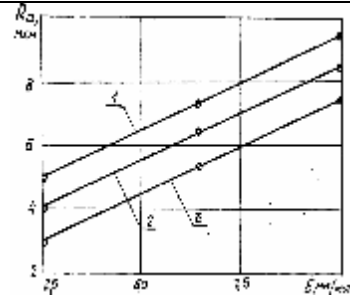
Система опытов	Номер опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	Результаты параллельных опытов		
							Y <sub>j1</sub>	Y <sub>j2</sub>	Y <sub>j3</sub>
Полный факторный эксперимент (N)		-1	-1	+1	+1	+1	Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>13</sub>
		+1	-1	-1	+1	+1	Y <sub>21</sub>	Y <sub>22</sub>	Y <sub>23</sub>
		-1	+1	-1	+1	+1	Y <sub>31</sub>	Y <sub>32</sub>	Y <sub>33</sub>
		+1	+1	+1	+1	+1	Y <sub>41</sub>	Y <sub>42</sub>	Y <sub>43</sub>
Опыты в «звездных точках» (N)		+1,41	0	0	2,0	0	Y <sub>51</sub>	Y <sub>52</sub>	Y <sub>53</sub>
		-1,41	0	0	2,0	0	Y <sub>61</sub>	Y <sub>62</sub>	Y <sub>63</sub>
		0	+1,41	0	0	2,0	Y <sub>71</sub>	Y <sub>72</sub>	Y <sub>73</sub>
		0	-1,41	0	0	2,0	Y <sub>81</sub>	Y <sub>82</sub>	Y <sub>83</sub>
Опыты в центре плана (N <sub>0</sub> )		0	0	0	0	0	Y <sub>91</sub>	Y <sub>92</sub>	Y <sub>93</sub>
		0	0	0	0	0	Y <sub>101</sub>	Y <sub>102</sub>	Y <sub>103</sub>
		0	0	0	0	0	Y <sub>111</sub>	Y <sub>112</sub>	Y <sub>113</sub>
		0	0	0	0	0	Y <sub>121</sub>	Y <sub>122</sub>	Y <sub>123</sub>
		0	0	0	0	0	Y <sub>131</sub>	Y <sub>132</sub>	Y <sub>133</sub>

**Таблица 3 – Основные характеристики планов экспериментов**

Характеристика плана эксперимента	X <sub>1</sub> (V, м/мин)	X <sub>2</sub> (S, мм/мин)
Основной уровень	32,8	6,25
Интервал варьирования	7,6	3,75
Верхний уровень	40,4	10,0
Нижний уровень	25,2	2,5

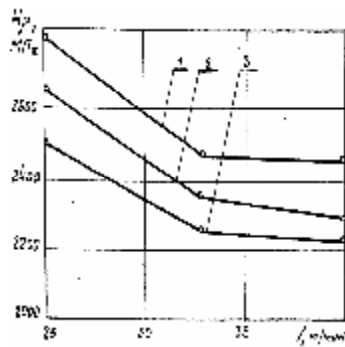


а)

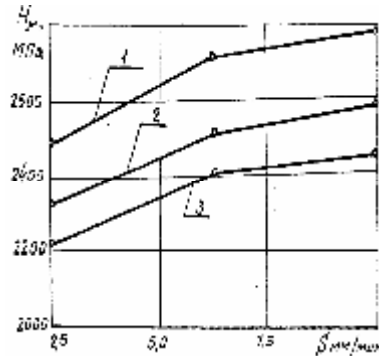


б)

а) – от скорости резания при подачах 1 – 10 мм/мин; 2 – 5 мм/мин; 3 – 2,5 мм/мин;  
 б) – от подачи при скоростях резания: 1 – 40 м/мин; 2 – 31,4 м/мин; 3 – 25,2 м/мин Рисунок 1 –  
 Графики зависимости величины  $R_a$  от режимов зубофрезерования  
 (материал деталей – сталь 25ХГТ)



а)



б)

а) – от скорости резания при подачах 1 – 10 мм/мин; 2 – 5 мм/мин; 3 – 2,5 мм/мин;  
 б) – от подачи при скоростях резания: 1 – 25,2 м/мин; 2 – 31,4 м/мин; 3 – 40 м/мин Рисунок 2 –  
 Графики зависимости величины  $H_{\mu}$  от режимов зубофрезерования  
 (материал деталей – сталь 25ХГТ)

При исследовании линейной зависимости  $R_a = f(V, S)$  ее аппроксимация производилась с помощью полинома первой степени вида

$$R_a = b_0 + b_1 V + b_2 S \quad (1)$$

При исследовании нелинейной зависимости  $H_{\mu} = f(V, S)$  ее аппроксимация производилась с помощью полинома второй степени вида

$$H_{\mu} = b_0 + b_1 V + b_2 S + b_{12} VS + b_{11} V^2 + b_{22} S^2 \quad (2)$$

Анализ полученных экспериментальных данных помимо расчетов коэффициентов уравнений (1) и (2), включал также оценку адекватности полученных зависимостей, значимости коэффициентов этих уравнений, степени влияния того или иного параметра режима резания на рассмотренные параметры качества поверхностей зубьев шестерен. Последняя оценка выполнялась с помощью коэффициентов влияния, рассчитанных по данным табл.3 и значениям коэффициентов уравнений (1) и (2)

$$A_V = \frac{2|b_1|}{\Delta V} \quad (3)$$

$$A_S = \frac{2|b_2|}{\Delta S} \quad (4)$$

где  $b_1, b_2$  – коэффициенты уравнений (3) и (4);  $\Delta V, \Delta S$  – шаги варьирования  $V$  и  $S$  согласно табл. 3.

Чем больше значение коэффициента влияния, тем в большей степени соответствующий параметр режимов резания влияет на данную характеристику качества поверхностей зубьев.

Основные результаты выполненного исследования приведены в табл. 4.

**Таблица 4 – Экспериментальные зависимости характеристик качества поверхностей зубьев  $R_a$  и  $H_{\mu}$  от режимов зубофрезерования  $V$  и  $S$**

Характеристика качества поверхностей зубьев	Вид зависимости $y = f(V, S)$	Коэффициенты влияния
Параметр шероховатости $R_a$ , мкм	$R_a = 2,55 + 0,065V + 0,27S$	$A_V = 0,017$ $A_S = 0,144$
Микротвердость $H_{\mu}$ , МПа	$H_{\mu} = 2085 - 12V + 26S + 0,13VS + 0,03V^2 + 1,2S^2$	$A_V = 3,2$ $A_S = 13,9$

Выполненные расчеты подтвердили адекватность найденных зависимостей опытным данным, достоверность коэффициентов этих уравнений. В то же время установлено, что зависимость  $H_{\mu} = f(V, S)$  с несколько меньшей, но достаточной точностью ( $\epsilon_{cp} = 8,7 - 26,5\%$ ) может быть описана и полиномом первой степени.

#### **Выводы.**

1. Между параметрами качества поверхностей зубьев цилиндрических шестерен (параметром шероховатости  $R_a$ , мкм и микротвердостью  $H_{\mu}$ , МПа) и режимами зубофрезерования червячными фрезами (скоростью резания  $V$ , м/мин и подачей  $S$ , мм/мин) существуют устойчивые взаимосвязи, которые могут быть описаны полиномиальными моделями с использованием методов планирования экспериментов.

2. Зависимость  $R_a = f(V, S)$  в наилучшей степени может быть описана полиномом первой степени, зависимость  $H_{\mu} = f(V, S)$  – полиномом второй степени. Хотя для описания второй зависимости может быть использован и полиномом первой степени.

3. Рост  $V$  вызывает увеличение  $R_a$  и уменьшение  $H_{\mu}$ . Рост  $S$  вызывает увеличение  $R_a$  и  $H_{\mu}$ .

4. Подача  $S$  оказывает от 4,3 до 8,5 раз большее влияние на  $R_a$  и  $H_{\mu}$ , чем скорость резания  $V$ .

5. Предложенные методы исследования и найденные зависимости могут быть использованы для выбора режимов зубофрезерования цилиндрических шестерен червячными фрезами, обеспечивающих требуемые значения характеристик качества поверхностей зубьев  $R_a$  и  $H_{\mu}$ .

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Кане М.М., Медведев А.И. Анализ факторов, влияющих на параметры качества поверхностей зубьев цилиндрических шестерен при их нарезании червячной фрезой. // Республ. межведомств. сб. научн. трудов «Машиностроение». - Минск, БНТУ. -2014. -№28, с. 48 – 50.

2. Кане М.М., Медведев А.И. Изменение параметров качества поверхности зубьев цилиндрических зубчатых колес на различных операциях их изготовления // Вестник машиностроения, 1997, №7, с. 3 – 7.

3. Кане М.М. Основы научных исследований в технологии машиностроения / М.М. Кане: Учебн. пособие для вузов. –Минск: Вышэйшая школа, 1987. -231 с.

4. Фингер М.Л. Цилиндрические зубчатые колеса. Теория и практика изготовления / М.Л. Фингер. –М.: Научная книга, 2005. -368 с.