

УДК 621.833

Кане М.М., Медведев А.И., Ковальков А.Т.

## РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ НА ОПЕРАЦИЯХ ЗУБОШЕВИНГОВАНИЯ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ (ХТО) ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Нами выполнено исследование изменения величины относительной микродеформации кристаллической решетки  $\Delta a/a$ , размеров блоков мозаики зерен металла  $D$  и остаточных напряжений второго рода  $\sigma_2$  в поверхности зубьев цилиндрических шестерен, изготовленных из сталей 25ХГТ и 20ХНЗА на указанных операциях.

Описание схемы строения блоков и методика расчета указанных параметров приведены в работах [1] и [4].

На рисунке 1 и в таблицах 1 и 2 представлены основные результаты выполненного исследования. В таблицах 1 и 2 приняты следующие обозначения:  $X_1$  и  $Y_1$  – значения  $\Delta a/a$  в мм;  $X_2$  и  $Y_2$  – значения  $D$  в мм;  $X_3$  и  $Y_3$  – значения  $\sigma_2$  в МПа на операциях шевингования и ХТО;  $a$  и  $b$  – коэффициенты уравнения  $y = a + bx$  (1);  $F$  – критерий Фишера адекватности предложенной модели (1);  $R^2$  – коэффициент детерминации, характеризующий адекватность модели, степень влияния  $X$  на дисперсию  $Y$ .

Расчет критериев Фишера и  $R^2$  производился по формулам, приведенным в работе [1].

Критическое значение критериев Фишера  $F_{кр} = 4,26$  при  $N = 12$ ,  $k = 4$  и Стьюдента  $t_{кр} = 5,78$  [3]. Предельное значение  $R^2 \geq 0,9$ , что говорит об адекватной зависимости опытных данных расчетным.

Затем был выполнен расчет параметров нелинейных моделей (зависимости 2 – 7) изменения рассмотренных характеристик поверхностного слоя зубьев цилиндрических шестерен при ХТО.

Результаты данного расчета приводятся в таблице 2.

$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 \quad (2)$$

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X^2 + b_3X^3 \quad (3)$$

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X^2 + b_3X^3 + b_4X^4 \quad (4)$$

$$Y = a \cdot \ln X - b, \quad (5)$$

$$Y = a \cdot X^b \quad (6)$$

$$Y = a \cdot \ell^{bX} \quad (7)$$

Анализ данных, приведенных на рисунке 1 и в таблицах 1 и 2 позволят отметить следующие особенности изменения параметров кристаллической решетки материалов шестерен на операциях шевингования и ХТО:

1. Имеет место увеличение значений  $\Delta a/a$  в равной степени как для стали 25ХГТ, так и для стали 20ХНЗА примерно в 3,3 – 3,5 раза.

2. Между значениями  $\Delta a/a$  на данных операциях имеется тесная корреляционная зависимость ( $r_{xy} = 0,941 - 0,953$ ).

3. Отмечено уменьшение значений  $D$  в 3,3 раза для стали 20ХНЗА и в 4,15 раз для стали 20ХГТ.

Между значениями  $D$  на исследованных операциях существует достаточно тесная взаимосвязь ( $r_{xy} = 0,75 - 0,861$ ).

4. Имеет место увеличение значений  $\sigma_2$  в такой же степени, как и для параметра  $\Delta a/a$ .

5. Установлено, что между значениями  $\sigma_2$  на операциях зубошевингования и ХТО имеется очень тесная корреляционная зависимость ( $r_{xy} = 0,94 - 0,95$ ).

6. Имеет место увеличение значений  $\sigma_2$  в такой же степени, как и для параметра  $\Delta a/a$ .

7. Установлено, что между значениями  $\sigma_2$  на операциях зубошевингования и ХТО имеется очень тесная корреляционная зависимость ( $r_{xy} = 0,94 - 0,95$ ).

8. Все рассчитанные значения критерия Стьюдента  $t$  для исследованных параметров не превышают критического значения, что говорит о достоверности рассчитанных значений  $r_{xy}$ .

9. Значения критерия Фишера  $F$  для параметров  $D$ ,  $\sigma_2$  и  $\Delta a/a$  также не превышает критического значения, что подтверждает адекватность принятого линейного уравнения регрессии

Расчетные значения критерия  $R^2$ , за исключением параметра  $D$ , близки или превышают величину 0,9, что говорит о том, что принятая модель учитывает большинство факторов, влияющих на изменение рассмотренных параметров при ХТО шестерен при условии постоянства режимов ХТО

10. Рассмотренные процессы поддаются математическому моделированию. В наилучшей степени для этого пригодны полиномы 2-ой, 3-ей и 4-ой степени. Однако может быть использована и линейная зависимость (см. табл. 1). Погрешность линейной модели по сравнению с нелинейной не более 12% [2].

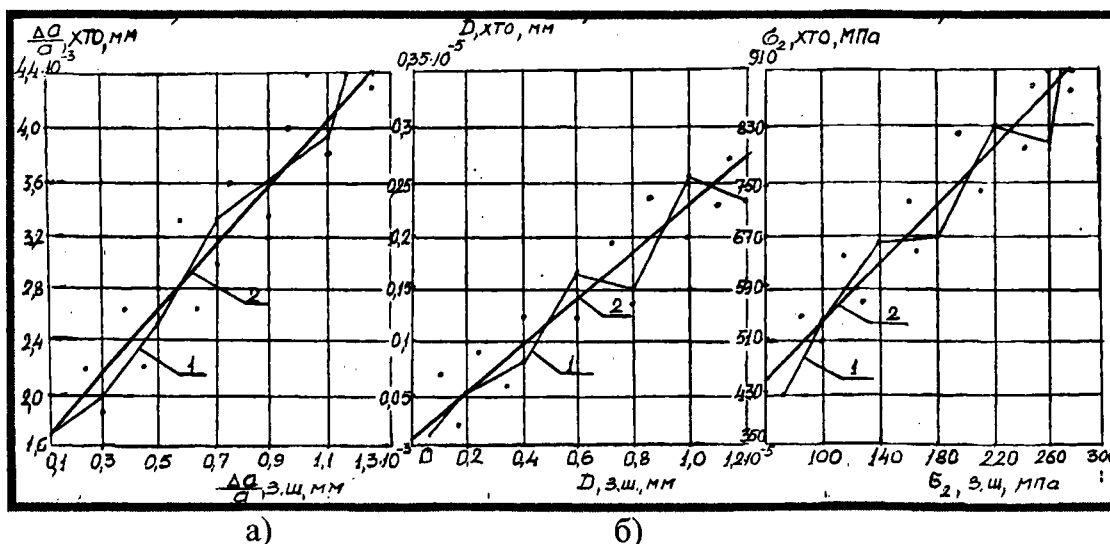


Рисунок 1- Изменение характеристик кристаллической решетки материала цилиндрических шестерен при шевинговании и ХТО (материал детали – сталь 20ХНЗА): а) изменение относительной микродеформации кристаллической решетки  $\Delta a/a$ ; б) изменение размеров блоков мозаики зерен металла  $D$ ; в) изменение величины остаточных напряжений 2-го рода  $\sigma_2$ : 1 – эмпирическая регрессия; 2 – линейная аппроксимация опытных данных.

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. При ХТО происходит заметное увеличение микродеформаций кристаллической решетки, что связано с общим искажением этой решетки, вызванное большими термическими деформациями не только поверхностных, но и глубинных слоев металла.

2. Одновременно увеличиваются и остаточные напряжения 2-го рода прямо пропорционально связанные с изменением микродеформаций и уменьшаются (дробятся) блоки мозаики зерен металла, что сопровождается упрочнением поверхностных слоев при ХТО.

3. Закономерный характер изменения исследованных показателей структуры материала зубьев шестерен и высокое значение коэффициентов корреляции подтверждает наличие явления технологической наследственности применительно к значениям  $\Delta a/a$ ,  $D$  и  $\sigma_2$  на операциях зубошевингования и ХТО, что указывает на возможность их целенаправленного изменения и управления свойствами материала шестерен после указанных операций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. М.М. Кане, А.И. Медведев, А.Т. Ковальков, В.В. Сурков. Рентгенографические исследования микродеформаций кристаллической решетки и размеров блоков мозаики легированных конструкционных сталей на операциях зубофрезерования и шевингования шестерен./ Теория и практика машиностроения. Междунар. научно-технич. журнал. №1. –Мн.: 2003. с.19...22.
2. М.М. Кане. Основы научных исследований в технологии машиностроения. –Мн.: Выш. школа. 1987. –231 с.
3. Е.И. Пустыльник. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. –М.: Наука. 1968. –288с.
4. Рентгенография в физическом металловедении./ Под ред. Ю.Багаряцкого. –М.: НТИЛ по черной и цветной металлургии. 1961. –368 с.

Таблица 1. Характеристики взаимосвязей параметров кристаллической решетки материала цилиндрических шестерен на операциях шевингования и ХТО

Материал зубчатого колеса	Сталь 25ХГТ						Сталь 20ХНЗА					
	$\Delta a/a$ , мм		D, мм		$\sigma_2$ , мм		$\Delta a/a$ , мм		D, мм		$\sigma_2$ , мм	
Параметры металлической решетки	X <sub>1</sub> шев.	Y <sub>1</sub> ХТО	X <sub>2</sub> шев.	Y <sub>2</sub> ХТО	X <sub>3</sub> шев.	Y <sub>3</sub> ХТО	X <sub>1</sub> шев.	Y <sub>1</sub> ХТО	X <sub>2</sub> шев.	Y <sub>2</sub> ХТО	X <sub>3</sub> шев.	Y <sub>3</sub> ХТО
Среднеарифметическое значение	6,37E-4	2,56E-3	6,84E-6	1,65E-6	133,8	543,8	7,75E-4	2,73E-3	5,63E6	1,7E-6	162,8	573,02
Среднеквадрати-ческое отклонение	1,09E-6	3,75E-5	1,33E-10	9,46E-12	48,2E-3	171E-4	1,98E-6	1,95E-5	1,06E-10	6,85E-12	87460	895790
Кэффицент пар-ной корреляции $r_{xy}$	0,941		-0,0254		0,945		0,953		0,861		0,954	
Крит. Стьюдента t достоверности значения $r_{xy}$	5,36		4,65		5,41		5,64		4,8		5,66	
Кэффицент "а" уравнения (1)	-9,5E-4		1,57E-6		-209,6		4,1·10 <sup>-4</sup>		1,34E-6		86,22	
Кэффицент "b" уравнения (1)	5,52		0,01		5,63		2,994		0,06		2,99	
Крит. Фишера F адекватности уравнения (1)	3,73		2,34		1,82		4,0		2,72		2,19	
Критерий R <sup>2</sup>	0,885		0,562		0,894		0,909		0,741		0,910	

Таблица 2. Характеристики взаимосвязей параметров кристаллической решетки материала цилиндрических шестерен на операциях шевингования и ХТО

Материал зубчатого колеса	Изучаемая функция	Значения R <sup>2</sup> для следующих зависимостей							Уравнения
		Линей-ная	полином 2-й степ.	полином 3-ей степ.	полином 4-ой степ.	логариф-мическая	Степен-ная	экспонен-циальная	
Сталь 25ХГТ	$\Delta a/a$ Y <sub>1</sub> =f(X <sub>1</sub> )	0,885	0,896	<u>0,918</u>	0,910	0,816	0,860	0,900	Y=-2E7X <sup>2</sup> +42766X <sup>2</sup> -22,621X+0,0046
	D Y <sub>2</sub> =f(X <sub>2</sub> )	0,562	0,735	0,728	0,730	<u>0,745</u>	0,640	0,635	Y=5,8E+11,6X <sup>3</sup> -3,2E+6,1X <sup>2</sup> +8,12X-3,2E-6,3
	$\sigma_2$ Y <sub>3</sub> =f(X <sub>3</sub> )	0,894	0,904	<u>0,930</u>	0,930	0,824	0,875	0,911	Y=-0,0005X <sup>3</sup> +0,2247X <sup>2</sup> -25,216X+1128,1
Сталь 20ХНЗА	$\Delta a/a$ Y <sub>1</sub> =f(X <sub>1</sub> )	0,909	0,932	0,932	<u>0,935</u>	0,814	0,873	0,928	Y=-7E+9X <sup>4</sup> +2E+7X <sup>3</sup> -9512X <sup>2</sup> +9,3462X+0,0001
	D Y <sub>2</sub> =f(X <sub>2</sub> )	0,741	0,741	<u>0,742</u>	0,742	0,725	0,631	0,625	Y=6E+11X <sup>3</sup> -3E+6X <sup>2</sup> +8,0647X-3E-6
	$\sigma_2$ Y <sub>3</sub> =f(X <sub>3</sub> )	0,909	0,932	0,932	<u>0,934</u>	0,817	0,875	0,928	Y=-8E-7X <sup>4</sup> +0,0005X <sup>3</sup> -0,0971X <sup>2</sup> +9,7892X+5,0755

**Примечание:** для каждой функции подчеркнуты максимальные значения R<sup>2</sup>