

Лубенская Л. М.

Колодяжный П. В.

Восточноукраинский  
национальный  
университет  
имени Владимира Даля

УДК 621.833: 656.223: 621.795.001.76

## РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЕДУЩИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ТЕПЛОВЗОВ 2ТЭ10Л

*Виявлено ефекти від впливу низькочастотної деформації на цементований загартований шар тягових шестірень зубчастих коліс тепловозів 2ТЭ10Л при вібраційній обробці. Встановлено рівномірний розподіл напруг по глибині шару від вібраційного впливу шліфувальних і ударних тіл на частоті 43 Гц і амплітуді 3 мм.*

*The Revealed effects from influence низькочастотної to deformation on cement hardened layer leading шестірень зубчастих travell about diesel locomotive 2ТЭ10Л under vibratory processing. Even sharing the voltages will Installed on depth layer from vibratory influence polishing and striking tel on frequency 43 Hz and amplitude 3 mm.*

### **Введение.**

#### **Актуальность исследований.**

Ведущие шестерни тяговых передач тепловозов 2ТЭ10Л в процессе изготовления подвергаются термическим, химическим и механическим воздействиям, которые создают напряжения в поверхностном слое. При зубошлифовании эти напряжения приводят к возникновению трещин, прижогов [1]. При вибрационном шлифовании значительно снижается температурный режим процесса, так как скорости резания меньше, чем при обычном шлифовании, а зоны микрорезания обильно омываются технологической жидкостью. Это позволяет получать высокое качество обработанной поверхности без прижогов, микротрещин и нежелательных структурных изменений.

#### **Постановка проблемы в общем виде.**

Ресурсосбережение в технологии изготовления ответственных деталей тяговых передач тепловозов можно достичь заменой высокоэнергоёмкой термической обработки для снятия напряжений на менее продолжительную и энергоёмкую обработку.

#### **Анализ исследований и публикаций.**

В работе [2] отмечено повышение микротвердости обработанной поверхности и формирование остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое при отсутствии температурных дефектов. Это приводит, как уже указывалось ранее, к повышению усталостной прочности и других

эксплуатационных свойств детали. Выбор зернистости абразива (рабочей среды) при вибрационной абразивной обработке, режим и время обработки зависит как от материала, так и от исходной шероховатости заготовки, поступающей на операцию ВиО [3].

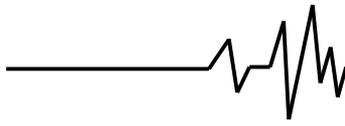
На процесс ВиО оказывает влияние фазовый состав, параметры, характеризующие упрочнение поверхностного слоя (степень и глубина упрочнения поверхностного слоя заготовки), а также его напряженное состояние (знак и распределение остаточных напряжений) [4].

При вибрационной обработке (ВиО) воздействие рабочих тел производится только на поверхностный слой материала [5]. Представляет практический интерес изучить процессы в закаленном поверхностном слое от воздействия вибрации.

**Цель работы** - усовершенствование технологического процесса изготовления зубчатых колес за счет достижения более равномерного распределения напряжений в поверхностном слое при вибрационной обработке, обеспечивающей требуемую твердость и шероховатость поверхности, и ресурсосбережение материалов.

Для реализации поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

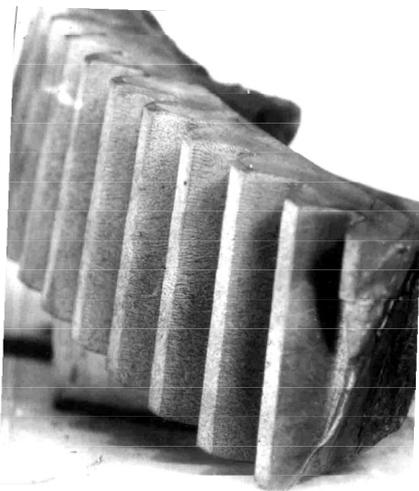
1. Исследовать влияние вибрационной обработки на точность и чистоту поверхности зубчатых колес, на точность зубчатого зацепления.



2. Исследовать влияние состава рабочего раствора, амплитуды и частоты вибрационного воздействия на шероховатость рабочих поверхностей и впадины зубьев колес.

3. Исследовать изменение микротвердости в поверхностном закаленном слое от воздействия вибрации.

**Материалы и образцы.** Для проведения исследований были взяты четыре зубчатых колеса из стали 20X2H4A, прошедшие химико-термическую обработку и низкий отпуск. Для определения величины удельного съема металла использовались круглые образцы-«свидетели», которые были изготовлены из материала шестерен по соответствующей технологии.



**Рис. 1. Образец от шестерни зубчатого колеса тепловоза 2ТЭ10Л**

Образец характеризуется данными: модуль  $m=10$ , число зубьев  $z=17$ , материал – сталь 20X2H4A, твердость рабочих поверхностей зубьев после цементации и объемной закалки HRC 56-63.

**Методика исследований.** Обработка зубчатых колес из стали 20X2H4A производилась в промышленной установке ВМИ 1004. Вибрационное шлифование поверхности осуществлялось в контейнере емкостью 120 л. В качестве абразивного материала был выбран бой шарошлифовальных кругов марки КЧ-ВТ-ЧТ с грануляцией 15-25 мкм. Исследования проводились как на цилиндрических образцах с общей площадью обрабатываемой поверхности- 19 см<sup>2</sup>, а также на деталях «свидетелях» из стали 20X2H4A, которые прошли все технологические операции обработки.

Изучение микроструктуры цементованного слоя закаленного слоя

проводилось на металлографическом микроскопе МИМ-7.

Измерение формы и размеров зубьев осуществлялось по пяти параметрам: отклонение основного шага, погрешность направления зубьев, колебание длины общей нормали, погрешность профиля и радиальное биение зубьев.

Отклонение основного шага измерялось с помощью шагомера, цена деления индикатора которого составляла 1 мкм.

Погрешность профиля измерялась универсальным эвольвентомером со специально рассчитанными упорами. Измерение погрешности направления зубьев и радиальное биение зубчатого колеса производилось с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 1 мкм. Колебания длины общей нормали определялось универсальным нормалеммером.

Измерение формы и размеров зубьев осуществлялось как до, так и после вибрационной обработки.

Измерение шероховатости рабочих поверхностей зубьев и впадин до и после вибрационной обработки проводилось на профилометре-профилографе. Весовым методом определялся удельный съем металла.

Потенциостатические исследования выполнялись на потенциостате П-58-48. Поляризационные кривые снимались со значений потенциала, установившегося в течение 30 мин, со скоростью 0,16 В/мин.

После операции зубошлифования на зубошлифовальном станке возникают тонкие трещины, которые проникают вглубь до 0,2 мм. Общий вид трещин приведен на рис. 2.

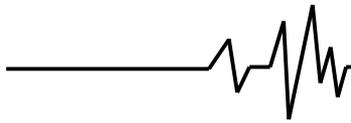


**Рис. 2. Трещины и поджоги металла шестерни**

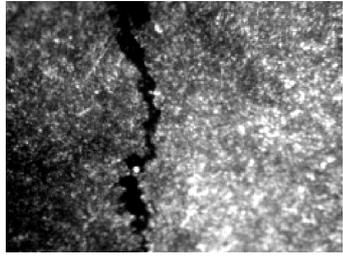
#### **Результаты исследований и их обсуждение.**

Для установления причин возникновения трещин на операции зубошлифования были проведены исследования микроструктуры цементованного слоя в области возникновения трещин. Результаты исследований представлены на рис. 3.

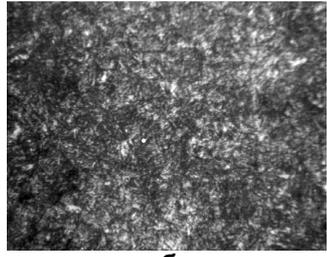
Исследования показали, что в сталях 20X2H4A, используемых для изготовления зубчатых колес может существенно



укрупняются зерно в процессе горячей механической обработки, что неблагоприятно отражается на качестве цементованного слоя.



а

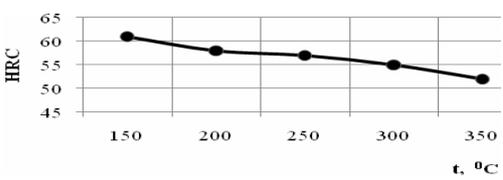


б

**Рис. 3. Исследование микроструктуры в области образования трещин и переходной зоне:  
а - мартенсит + троостит среднеигольчатого строения;  
б - структура переходного слоя мартенсит + троостит мелкоигольчатого строения**

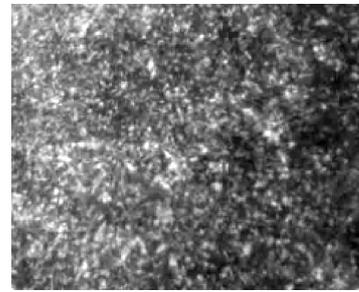
В процессе механической обработки при шлифовании зубьев происходит локальное увеличение температуры, которое приводит к самоотпуску в поверхностном цементованном слое. Поэтому представляет практический интерес сравнить структурные изменения в поверхностном закаленном слое при самоотпуске на операции зубошлифования с отпуском при различных температурах.

На рис. 4 приведены результаты экспериментальных определений твердости закаленного цементованного слоя при различных температурах отпуска.

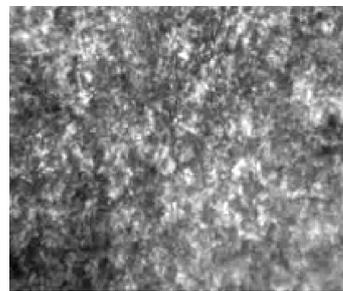


**Рис. 4. Зависимость твердости закаленного цементованного закаленного слоя стали 20X2H4A от температуры отпуска**

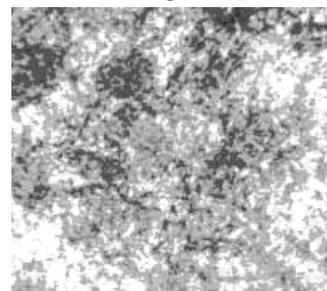
На рис. 5 представлены микроструктуры цементованного закаленного слоя при различных температурах отпуска (рис. а, б), а также микроструктура с нарушением сплошности цементованного слоя после зубошлифования.



а



б



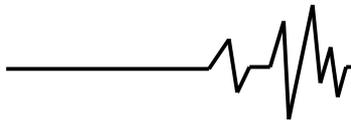
в

**Рис. 5. Микроструктуры цементованного закаленного слоя после низкотемпературного отпуска:  
а – 1500С; б – 3500С;  
в – нарушенная сплошность цементованного закаленного слоя**

Сравнительная характеристика микроструктуры закаленного цементованного слоя позволила установить:

- при увеличении температуры отпуска стали 20X2H4A от 150 до 350°C происходит увеличение размеров зерен мартенсита, что снижает прочностные свойства закаленного цементованного слоя;

- увеличение температуры отпуска от 150 до 350°C приводит к снижению твердости от 61 до 52, что снижает износостойкость поверхностного слоя;



- при значительных локальных температурных напряжениях на операции зубошлифования нарушается сплошность цементованного закаленного слоя;

- механические и термические напряжения, возникающие в поверхностном закаленном слое на границе слоев с различной структурой и пластическими свойствами, приводят к возникновению трещин.

Перед вибрационной обработкой зубья шестерен подвергались зубофрезерованию. В результате этой операции возникают риски глубиной от 0,05 до 0,1 мм, которые необходимо удалить вибрационным абразивным шлифованием.

**Выбор состава рабочего раствора для вибрационного абразивного шлифования.**

С целью изучения электрохимической природы рабочих растворов и их влияния на поверхностный слой стали проведено

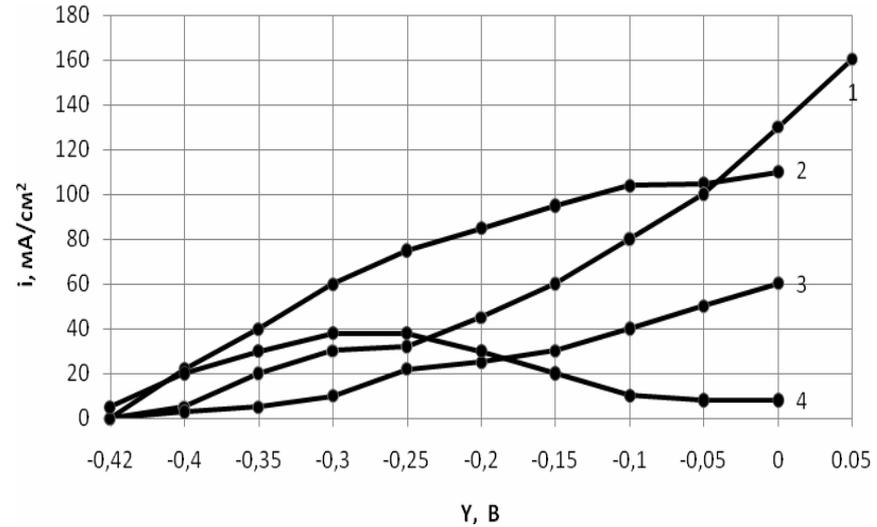
потенциостатирование исследуемого материала в качественно различных кислых электролитах.

В табл.1 приведены значения стационарных потенциалов стали 20X2H4A в 1% растворах минеральных кислот.

**Таблица 1**  
**Значения стационарных потенциалов стали 20X2H4A в 1% растворах минеральных кислот**

Электролит	Стационарный потенциал, В
Хлоридная кислота	-0,44
Нитратная кислота	-0,31
Сульфатная кислота	-0,42
Фосфатная кислота	-0,41

Поляризационные кривые стали 20X2H4A в 1% растворах минеральных кислот приведены на рис. 6.



**Рис. 6. Зависимость плотности тока растворения стали 20X2H4A от потенциала в кислых растворах: 1 – HCl; 2 - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 3- HNO<sub>3</sub>; 4- H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>**

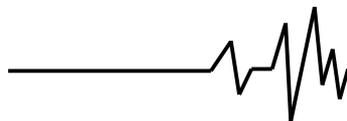
Анализ полученных результатов показывает, что в исследуемых электролитах растворение стали 20X2H4A осуществляется с водородной деполяризацией, так как стационарный потенциал ее значительно отрицательнее нормального водородного электрода. Полученная зависимость (рис. 6) дает основание предположить, что наиболее

активное растворение стали 20X2H4A должно осуществляться в нитратной кислоте.

Результаты определения удельного съема металла после вибрационного абразивного шлифования образцов из стали 20X2H4A в растворах электролитов в течение 60 мин. приведены в табл. 2 и табл. 3.

**Таблица 2**  
**Результаты вибрационного абразивного шлифования стали 20X2H4A в растворах минеральных кислот**

Сталь 20X2H4A	Удельный съем, мг/см <sup>2</sup> ·ч						
	pH	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		HCl	HNO <sub>3</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O
	1	13,14*	серые	4,7***	44,3*	9,47*	темные
3	1,45*	серые	4,28***	17**	1,25*	темные	
5	1,89*	серые	-	1,79**	0,045*	темные	



Таблиця 3

**Результаты вибрационного абразивного шлифования стали 20X2H4A в растворах органических кислот**

Сталь 20X2H4MA	Удельный съём, мг/см <sup>2</sup> ·ч						
	рН	НСООН		СН <sub>3</sub> СООН	СН <sub>3</sub> (СН <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> СООН	СООН-СООН	СООН-(СНОН) <sub>2</sub> СООН
	3	3,35*	серые	5,52**	2,99*	2,28*	3,93**
5	1,7	серые	1,25	0,1	0,08	0,95	

\*- без коррозионных повреждений; \*\*- отдельные коррозионные повреждения; \*\*\*- язвенная коррозия

Анализ результатов вибрационного шлифования образцов из стали 20X2H4A в растворах минеральных кислот, приведенный в табл. 2 показал, что удельный съём стали зависит от рН раствора. Максимальный удельный съём получен в результате вибрационного шлифования образцов в растворе нитратной кислоты, а минимальный - в растворе хлоридной кислоты. Экспериментально полученные результаты хорошо согласуются с данными потенциостатических измерений.

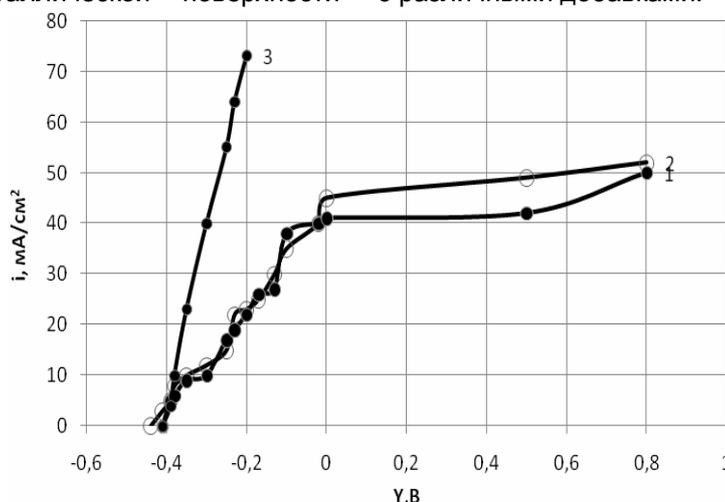
Сравнительная характеристика результатов обработки образцов из стали 20X2H4A в растворах минеральных и органических кислот (табл. 2 и табл. 3) позволяет заключить, что интенсифицировать процесс вибрационного абразивного шлифования исследуемого материала можно на основе использования рабочих растворов минеральных кислот.

Анализ качества поверхности, получаемой в результате вибрационной обработки в различных кислых растворах показал, что скорость электрохимических процессов на металлической поверхности

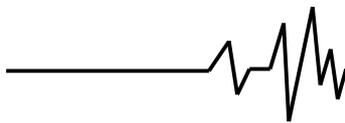
недостаточна, так как после часовой обработки на поверхности остаются следы рисок от предшествующей механической обработки стали.

Для интенсификации процесса обработки проведены исследования влияния смеси анионов кислот на электрохимическое поведение стали 20X2H4A.

На рис. 7 приведены поляризационные кривые стали 20X2H4A в смесях минеральных кислот, составленных в различных сочетаниях. Сравнение полученных поляризационных кривых с кривыми, полученными в чистых кислотах (рис. 6), позволило установить различное влияние анионов. Так добавка хлорид-анионов в каждую из исследуемых кислот значительно повышает поляризацию электрода, несколько сдвигая стационарный потенциал стали в отрицательную область, что приводит к торможению анодного растворения стали, а, следовательно, и к уменьшению съема металла при вибрационном шлифовании. На рис. 7 приведены значения плотности тока растворения стали от величины потенциала в 1% растворе фосфатной кислоты с различными добавками.



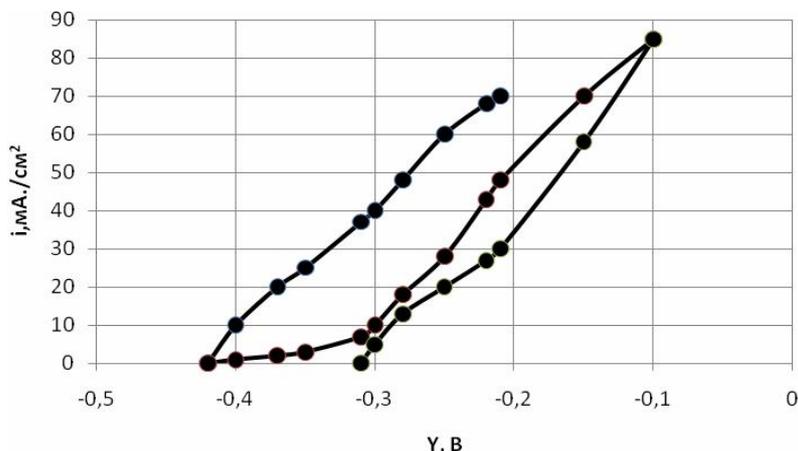
**Рис. 7. Зависимость плотности тока растворения стали 20X2H4A от величины потенциала в 1% растворе фосфатной кислоты в присутствии добавок (0,5 вес. %): 1- HNO<sub>3</sub>; 2- HCl; 3- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**



Анализ хода поляризационных кривых позволил установить, что сульфат анионы в растворе фосфатной кислоты приводят к сильной поляризации электрода, что затрудняет растворение металла. Добавка хлорид-анионов в раствор фосфатной кислоты приводит к смещению стационарного

потенциала стали в отрицательную область, что также приводит к уменьшению растворения стали.

На рис. 8 приведены значения плотности тока растворения стали от величины потенциала в 1% растворе сульфатной кислоты с различными добавками.



**Рис. 8. Зависимость плотности тока растворения стали 20X2H4A от величины потенциала в 1% растворе сульфатной кислоты в присутствии добавок (0,5 вес. %): HNO<sub>3</sub>; 2 - HCl; 3- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**

На основе анализа кривых растворения (рис.8) стали можно заключить, что добавка нитрат - ионов значительно повышает скорость анодного растворения стали.

Результаты экспериментальных исследований по определению удельного съема металла в различных смесях минеральных кислот приведены в табл. 4.

**Таблица 4  
Результаты вибрационного абразивного шлифования стали 20X2H4A в смесях минеральных кислот**

N/N	Электролит, мл/л	Удельный съем металла, мг/см <sup>2</sup> -ч
1	Нитратная кислота, 10 Хлоридная кислота, 5	34
2	Сульфатная кислота, 10 Хлоридная кислота, 5	6,8
3	Фосфатная кислота, 10 Хлоридная кислота, 5	6,8
4	Нитратная кислота, 10 Сульфатная кислота, 5	40,5
5	Нитратная кислота, 10 Фосфатная кислота, 5	22,6
6	Фосфатная кислота, 10 Сульфатная кислота, 5	7,9

Результаты экспериментальных исследований (данные табл. 4) подтверждают потенциостатические исследования. На основе данных удельного съема можно заключить, что анионы хлора проявляют ингибирующие свойства, а сульфат и фосфат анионы проявляют пассивирующие свойства. Нитрат ионы в растворах фосфатной и сульфатной кислот являются активаторами растворения стали.

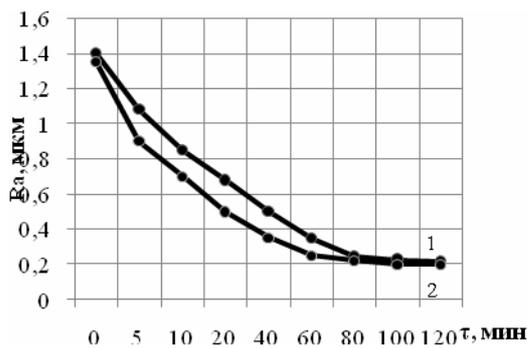
На основе проведенных исследований можно заключить следующее:

Оптимальной кислотой средой, позволяющей удовлетворительно интенсифицировать процесс вибрационного абразивного шлифования стали 20X2H4A, следует считать нитратный электролит.

Нитрат-ионы являются активирующей добавкой в растворах сульфатной и фосфатной кислот, а хлорид- анионы являются ингибирующей добавкой.

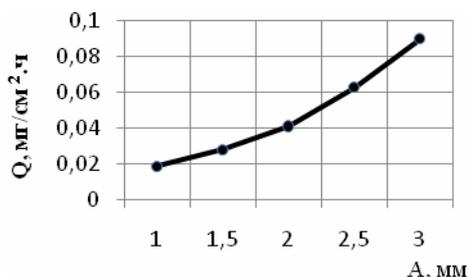
**Выбор частоты и амплитуды вибрационного абразивного шлифования.**

На рис. 9 приведены результаты экспериментальных исследований изменения шероховатости поверхности шестерен от продолжительности вибрационного шлифования при различной частоте колебаний контейнера. Выявлен эффективный режим вибрационного шлифования - частота 43 Гц, продолжительность - 60 мин.



**Рис. 9. Изменение шероховатости поверхности рабочих поверхностей шестерен стали 20X2H4A в зависимости от продолжительности вибрационного шлифования: 1- частота колебаний контейнера 34 Гц; 2 – частота колебаний 43 Гц**

На рис. 10 приведена зависимость удельного съема металла на боковой поверхности шестерни из стали 20 X2H4A от амплитуды колебаний контейнера.



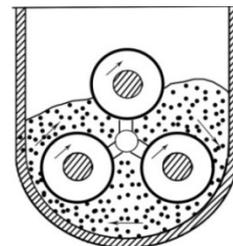
**Рис. 10. Зависимость удельного съема металла зубчатых колес из стали 20X2H4A в зависимости от амплитуды колебаний контейнера на частоте 43 Гц**

Вибрационное шлифование зубчатых колес осуществлялось в химически активном растворе следующего состава: калий перманганат -16 г/л, нитратная кислота – 10 мл/л, пероксид водорода - 60 мл/л. Объем рабочего раствора - 7 л. Вибрационное воздействие на рабочие поверхности зубьев и впадин шестерней выполнялось в вибрационной установке ВМИ -1004А в специальном поворотном приспособлении, изображенном на рис. 11.

Использование такого способа позволяет закреплять и ориентировать деталь навстречу потоку рабочих тел. Максимальную силу удара получают зубья шестерен, которые находятся у стенок колеблющегося контейнера. Эффект воздействия при этом увеличивается в 3-4 раза

по сравнению с обработкой изделия в верхнем положении. Для обеспечения постоянной глубины наклепа по всей поверхности зубьев при закреплении сохранена одна степень свободы, которая создается закреплением детали на оправку свободно вращающуюся на подшипниках. В процессе обработки детали вместе со средой совершают круговое вращение. Каждая деталь попеременно находится в активной зоне у дна контейнера. Разработанный способ крепления позволяет легко извлекать обрабатываемые шестерни из химически активных растворов при их переходе в верхнее расположение.

Вибрационное воздействие осуществлялось стальными шариками из стали ШХ-15 диаметром 3-5 мм в течение 120 мин. при различной амплитуде и частоте колебаний контейнера. Состав рабочего раствора для вибрационного воздействия: натрий гидроксид -20 г/л; сода кальцинированная 30 г /л; олеиновая кислота 10 мл/л; триэтаноламин - 35 г/л. После вибрационного воздействия зубчатые колеса извлекались и подвергались контролю по пяти параметрам. Результаты исследований приведены в табл. 5.



**Рис. 11. Схема поворотного приспособления для закрепления шестерни в колеблющемся контейнере**

На рис. 12 приведена зависимость изменения напряжений цементованного закаленного слоя, рассчитанная по данным работы:

$$\sigma_i = K \cdot H_m,$$

где K - коэффициент пропорциональности, равный 0,34 при 20°C для сталей; H<sub>m</sub> - микротвердость, МПа.

В цементованном закаленном и отпущенном слое толщиной 1 мм микротвердость изменяется от 233 до 77 МПа. Напряжения в закаленном слое без вибрационной обработки неравномерно распределены по толщине слоя, а напряжения после вибрационной обработки распределяются равномерно.

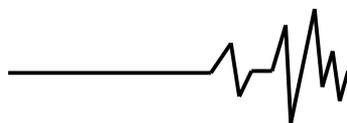
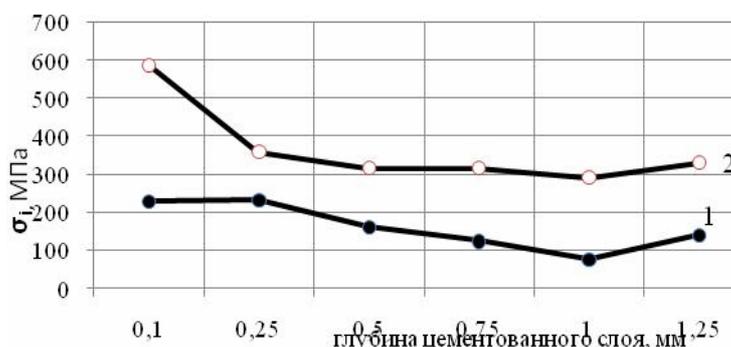


Таблица 5

**Результаты экспериментальных определений основных показателей шестерен зубчатых колес**

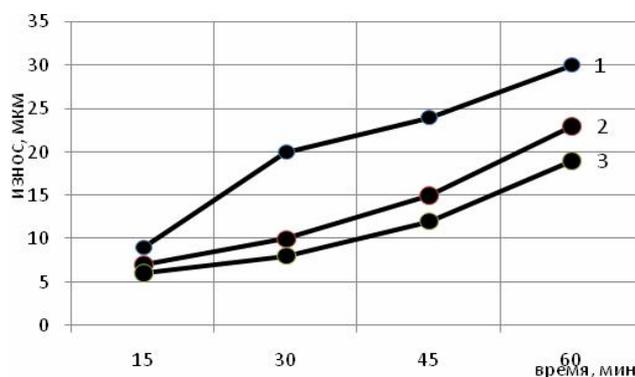
Параметр	После шлифования		После вибрационной обработки	
	Правый профиль, мкм	Левый профиль, мкм	Правый профиль, мкм	Левый профиль, мкм
Центр рассеяния отклонения размеров основного шага по профилю	-1,66	- 0,46	- 1,12	+0,4
Рассеяние размеров	22	11	25	11
Средняя величина погрешности направления	+35	- 33	+32,5	-32
Среднее отклонение длины общей нормали в каждой из шестерен	11,7		16,7	
Средняя погрешность профиля	19,1		16,4	
Среднее радиальное биение зубчатого венца	28,9		23,7	



**Рис. 12. Изменение напряжений по глубине цементованного закаленного слоя на боковой поверхности зуба шестерни:**

**1 - после цементации, закалки и отпуска при 200С; 2 – после вибрационной деформации**

На рис. 13 приведены результаты рабочей поверхности, обработанной по испытаний зубчатых колес на величину износа различной технологи.

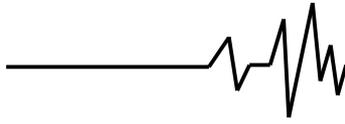


**Рис. 13. Зависимость износа рабочих поверхностей зубчатых колес от продолжительности испытаний:**

**1- по традиционной технологии обработки;**

**2- после термического отжига;**

**3- после вибрационной обработки**



### Выводы

1. Установлено, что вибрационная обработка не оказывает существенного влияния на основные показатели размеров шестерен, а так же на радиальное биение зубчатого венца.

2. Оптимальной кислой средой, позволяющей удовлетворительно интенсифицировать процесс вибрационного абразивного шлифования стали 20Х2Н4А, следует считать нитратный электролит.

3. Нитрат ионы являются активирующей добавкой в растворах сульфатной и фосфатной кислот, а хлорид- анионы являются ингибирующей добавкой.

4. Выявлено равномерное распределение напряжений по глубине закаленного слоя от вибрационного воздействия шлифовальных и ударных тел на частоте 43 Гц и амплитуде 3 мм.

5. Предложено ресурсосбережение при изготовлении зубчатых колес за счет замены длительного энергоемкого отжига вибрационной обработкой, обеспечивающей требуемую твердость и шероховатость поверхности при сохранении размеров обрабатываемых деталей.

6. Установлено, что за счет создания остаточных сжимающих напряжений по всей толщине поверхностного закаленного слоя при виброударном воздействии рабочими телами,

обеспечивается устойчивость поверхностного слоя при эксплуатации как статическим, так и циклическим нагрузкам, а также снижается износ зубьев.

### Литература

1. Богомолов Н.И. Основные процессы при взаимодействии абразива и металла. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук. Киев, 1967.- 46 с.

2. Бабичев А.П., Устинов В.П. Повышение износостойкости стали отделочно-упрочняющей вибрационной обработкой.- Физико-химическая механика материалов.- Львов, 1970.- С.13-15.

3. Бабичев А.П. Упрочнение деталей машин вибрационным наклепом.- В кн.: Повышение прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием.- М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970, С.64-70.

4. Брондз Л.Д. Повышение эксплуатационных свойств деталей поверхностно-пластическим деформированием / Л. Д. Брондз, В.Ф. Варенов. – М., 1971. – С. 20-26.

5. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многократным виброударным инструментом / [ А. П. Бабичев, П. Д. Мотренко, И.А. Бабичев и др.]. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2003. – 192 с.