

*Канд. техн. наук А.Н. Киреев,
асп. П.В. Колодяжный (ВНУ им. В. Даля)*

*Candidate of techn. sciences A.M. Kireev,
postgraduate P.V. Kolodyazhnyi*

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ЛОКОМОТИВОВ

THE APPLICATION OF ULTRASONIC TREATMENT TO IMPROVE THE OPERATING ABILITIES OF THE LOCOMOTIVE GEARS

Представил д-р техн. наук, профессор В.И. Соколов

Постановка проблемы. Развитие железнодорожного транспорта характеризуется повышением нагрузок и скоростных режимов работы локомотивов. Анализ неисправностей узлов локомотивов показал, что очень часто неисправности возникают в элементах тягового привода вследствие износа зубьев шестерни и колеса по толщине. Поэтому зубчатые шестерни и колеса тягового привода локомотивов подвижного состава железных дорог являются теми элементами, износостойкость которых необходимо повышать.

Известно, что продолжительность приработки зубчатого зацепления зависит от шероховатости поверхности. Значительное улучшение шероховатости и физико-механических свойств зубчатых колес может быть достигнуто ультразвуковой обработкой (УЗО). Поэтому актуальными являются исследования, направленные на разработку рациональных режимов УЗО, при которых обеспечивается высокий класс шероховатости и износостойкость поверхностного слоя металла.

Анализ исследований и публикаций. В работах [1, 2] отмечается, что значения основных параметров шероховатости R_a , R_z , R_{max} в результате

УЗО уменьшаются. Данные об эффективности ударной УЗО шариком предварительно шлифованной поверхности зубьев зубчатых колес из стали 45 приведены в работе [3]. Установлено, что после ультразвуковой обработки среднее арифметическое отклонение профиля поверхности R_a уменьшилось с 0,4 до 0,1 мкм. О влиянии скорости перемещения инструмента на шероховатость поверхности при УЗО отмечается в [4]. В работе [5] исследовалось изменение шероховатости поверхности в зависимости от скорости вращения обрабатываемой детали. Установлено, что для стали 40ХН при скорости вращения заготовки 23 м/мин шероховатость составляет 1 мкм.

Анализ работ показал, что исследования в области УЗО охватывают все стороны проблемы: оборудование, инструмент, влияние параметров процесса на шероховатость и износостойкость.

Целью работы является обоснование необходимости использования УЗО рабочих поверхностей и впадин зубчатых колес и шестерен тягового привода локомотивов подвижного состава железных дорог путем назначения рациональных технологических режимов УЗО, которые обеспечивают уменьшение шероховатости

поверхности и увеличение износостойкости.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести УЗО опытных образцов зубчатых колес локомотивов из стали 45ХН на различных режимах;
- исследовать влияние основных параметров режимов УЗО на параметры шероховатости поверхности.

Изложение результатов исследований. Экспериментальные исследования по влиянию режимов УЗО на шероховатость поверхности проводились на образцах из стали 45ХН. Постоянными параметрами УЗО были: амплитуда и частота УЗ колебаний, а также скорость

продольной подачи инструмента. В качестве переменных были выбраны параметры: статическое усилие прижима $P_{СТ}$ и величина поперечной подачи инструмента S . Статическое усилие прижима составляло 50, 100 и 150 Н. Поперечная подача выбиралась таким образом, чтобы осуществить обработку без перекрытия отпечатков, а также с перекрытием на 50 и 75 % – $S = d_{omn}$, $S = d_{omn}/2$ и $S = d_{omn}/4$ соответственно. Диаметр единичного отпечатка изменялся в зависимости от усилия прижима инструмента и определялся экспериментально. Таким образом, была проведена УЗО на 9 режимах (табл. 1).

Таблица 1

Параметры режимов УЗО

	$A = 30$ мкм			$f = 22$ кГц			$v_{прод} = 0,5$ мм/с		
$P_{СТ}$, Н	50			100			150		
S	d_{omn}	$d_{omn}/2$	$d_{omn}/4$	d_{omn}	$d_{omn}/2$	$d_{omn}/4$	d_{omn}	$d_{omn}/2$	$d_{omn}/4$
Режим	1	2	3	4	5	6	7	8	9

После УЗО проводилось измерение параметров шероховатости образцов с помощью профилометра 107622. Были получены профилограммы со значениями параметров шероховатости поверхности, по которым проводилась оценка микрогеометрии поверхностного слоя образцов. Для этого были выбраны следующие параметры: среднеарифметическое отклонение профиля R_a , максимальная высота неровности R_{max} , максимальная высота выступов R_p и впадин R_v .

Для всех образцов, обработанных УЗО, наблюдалось уменьшение шероховатости R_a по сравнению с исходным значением. В табл. 2 приведены

результаты измерения R_a , R_{max} , R_p и R_v для различных режимов УЗО.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют об улучшении всех исследуемых параметров шероховатости поверхности. Для всех образцов, обработанных УЗО, наблюдалось значительное уменьшение среднего арифметического отклонения профиля поверхности R_a по сравнению с исходным значением (0,210 мкм по сравнению с исходным значением 0,856 мкм). С увеличением статического усилия прижима $P_{СТ}$ значение R_a уменьшается ($R_a = 0,269$, 0,204 и 0,210 мкм при статическом усилии прижима 50, 100 и 150 Н соответственно, рис. 1, а). Аналогично происходит умень-

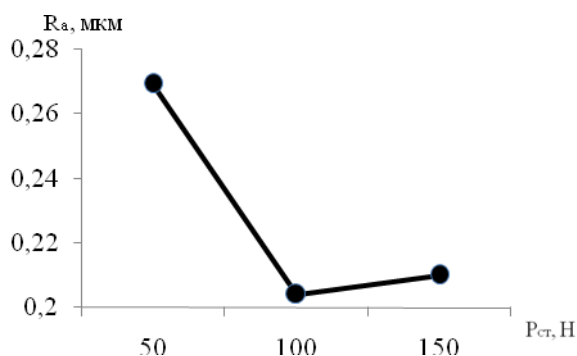
шение максимальной высоты неровностей R_{\max} – с возрастанием P_{CT} максимальная высота неровностей уменьшается

($R_{\max} = 3,54, 3,34$ и $3,14$ мкм при $P_{CT} = 50, 100$ и 150 Н соответственно, рис. 1, б).

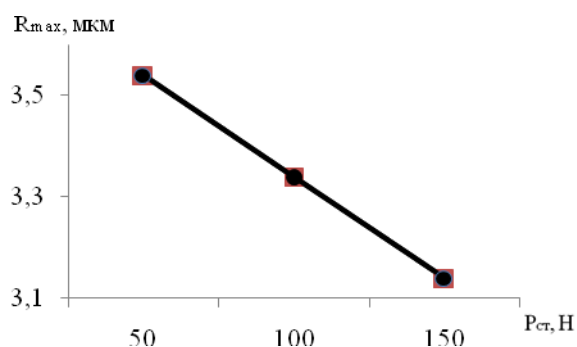
Таблица 2

Влияние параметров режимов УЗО на параметры шероховатости поверхности

	$P_{CT} = 50$ Н $d_1 = 0,8$ мм			$P_{CT} = 100$ Н $d_2 = 1,8$ мм			$P_{CT} = 150$ Н $d_3 = 2,0$ мм		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4	Режим 5	Режим 6	Режим 7	Режим 8	Режим 9
Перекрытие	-	50 %	75 %	-	50 %	75 %	-	50 %	75 %
R_a , мкм	0,269	0,293	0,435	0,204	0,304	0,379	0,210	0,225	0,535
R_{\max} мкм	3,54	2,79	3,75	3,34	3,76	5,13	3,14	6,02	6,55
R_p , мкм	1,36	1,48	1,40	1,43	1,57	1,85	1,40	1,54	2,63
R_v , мкм	2,18	1,31	2,36	1,90	2,19	3,27	1,74	4,48	3,92



а)



б)

Рис. 1. Зависимость параметров шероховатости R_a (а) и R_{\max} (б) от величины статического усилия прижима инструмента к обрабатываемой поверхности

Таким образом, увеличение усилия прижима приводит к более интенсивному пластическому деформированию обрабатываемой поверхности. Как показывают результаты, наилучшее значение параметра R_a достигается при статическом усилии прижима 100 Н. С увеличением усилия прижима до 150 Н наблюдается увеличение параметра R_a , однако при таком режиме достигается

наименьшее значение максимальной высоты неровностей R_{\max} .

Анализ значений максимальной высоты выступов и впадин (R_p и R_v) показывает, что при УЗО происходит так называемое «раскатывание» поверхности – уменьшение высоты выступов (уменьшение параметра R_p), (рис. 2, а) и глубины впадин (уменьшение параметра R_v), (рис. 2, б).

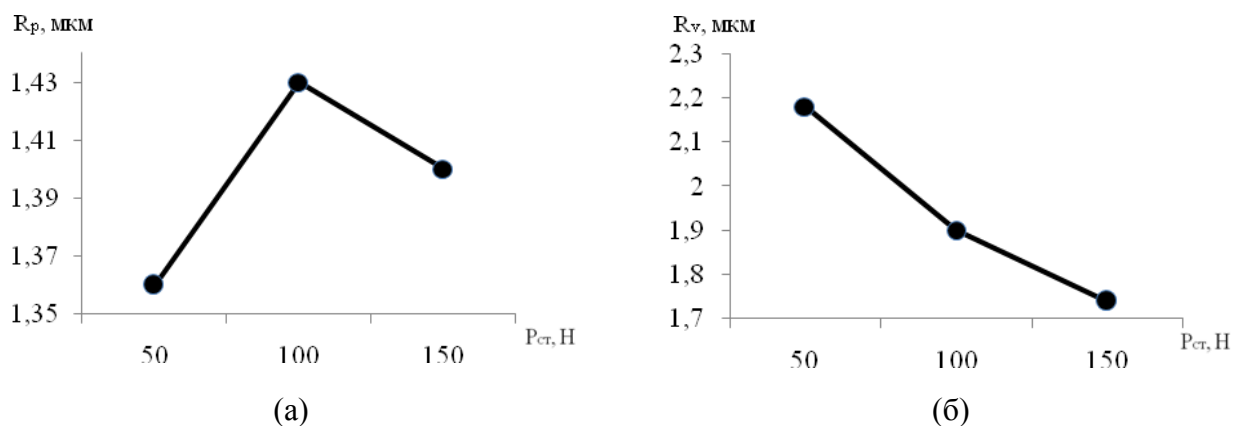


Рис. 2. Зависимость величины высоты максимального выступа R_p (а) и впадины R_v (б) от величины статического усилия прижима инструмента к обрабатываемой поверхности

Как видно из графиков 2 (а, б), при $P_{CT} = 50$ Н происходит более интенсивное пластическое деформирование выступов на поверхности (наименьшее значение R_p), однако глубина деформирования наименьшая, о чем свидетельствует наибольшее значение глубины впадин на поверхности (R_v). С увеличением P_{CT} глубина проникновения пластической деформации возрастает, о чем свидетельствует уменьшение параметра R_v . По совокупности параметров шероховатости оптимальными являются режимы № 4 и № 7 со статическим усилием прижима 100 и 150 Н.

Для исследования влияния поперечной подачи на шероховатость образцов, обработанных УЗО, были выбраны три варианта: обработка образцов без перекрытия отпечатков, а также с перекрытием на 50 и 75 % ($S = d_{omn}$, $S = d_{omn}/2$ и $S = d_{omn}/4$ соответственно).

Установлено, что с уменьшением величины поперечной подачи, т.е. с увеличением перекрытия отпечатков, шероховатость поверхности ухудшается. Худшие результаты независимо от усилия прижима дает обработка с 75 %-ным

перекрытием отпечатков – значения R_a и R_{max} наибольшие. После УЗО с перекрытием отпечатков 50 % значения параметров шероховатости поверхности мало отличаются от значений после обработки без перекрытия отпечатков. Это можно объяснить следующим: при обработке без перекрытия отпечатков инструмент совершает некоторое количество ударов $N_{0\%}$ в каждую точку обрабатываемой поверхности; при обработке с 50 %-ным перекрытием инструмент совершает $N_{50\%}$ ударов в каждую точку, причем $N_2 > N_1$, ($N_{50\%} = 2 \cdot N_{0\%}$). При обработке с 75 %-ным перекрытием количество ударов еще больше, чем в двух предыдущих случаях, $N_{75\%} > N_{50\%} > N_{0\%}$, ($N_{75\%} = 4 \cdot N_{0\%}$) (рис. 3, а, б, в).

Еще одним фактором, влияющим на количество ударов инструмента в каждую точку обрабатываемой поверхности, является взаимосвязь скорости продольной подачи с диаметром единичного отпечатка, который, в свою очередь, зависит от статического усилия прижима. Количество ударов в одну точку при единичном проходе (без перекрытия отпечатков) можно определить из выражения

$$N_{0\%} = \frac{d \cdot f}{v_{\text{прод}}},$$

где d – диаметр единичного отпечатка, мм;
 f – частота УЗ колебаний, Гц; $v_{\text{прод}}$ –

скорость продольной подачи инструмента, мм/с.

В табл. 3 приведены результаты расчетов количества ударов в одну точку поверхности для каждого из режимов.

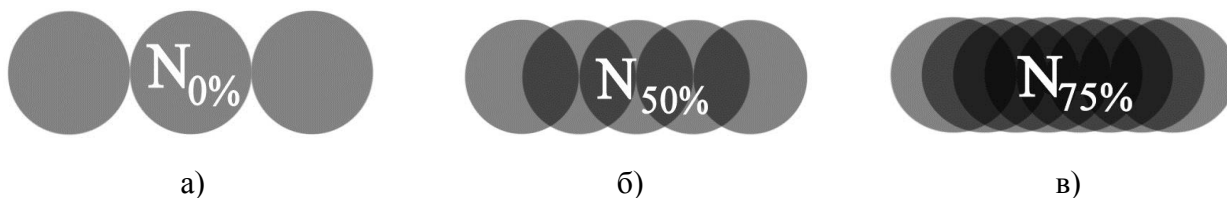


Рис. 3. Графическое отображение влияния поперечной подачи на количество ударов инструмента в одну точку поверхности: а) обработка без перекрытия отпечатков; б) обработка с 50%-ным перекрытием отпечатков; в) обработка с 75%-ным перекрытием отпечатков

Таблица 3

Взаимосвязь количества ударов инструмента в одну точку поверхности с параметрами шероховатости поверхности после УЗО

Режим	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S	$d_{\text{омн}}$	$d_{\text{омн}}/2$	$d_{\text{омн}}/4$	$d_{\text{омн}}$	$d_{\text{омн}}/2$	$d_{\text{омн}}/4$	$d_{\text{омн}}$	$d_{\text{омн}}/2$	$d_{\text{омн}}/4$
N, уд	35200	70400	140800	79200	158400	316800	88000	176000	352000

На рис. 4 представлены зависимости основных параметров шероховатости R_a и R_{max} от перекрытия отпечатков и статического усилия прижима инструмента к обрабатываемой поверхности.

Как видно из сравнительного анализа полученных результатов, прослеживается взаимосвязь параметров шероховатости с величиной перекрытия отпечатков: с увеличением перекрытия при неизменном значении $P_{\text{СТ}}$ все показатели шероховатости ухудшаются. При 75 %-ным перекрытии отпечатков количество ударов в одну точку поверхности наибольшее. При этом класс шероховатости понижается, а параметры R_a и R_{max} повышаются по

сравнению с УЗО с 50 %-ным перекрытием отпечатков и без перекрытия.

В целом, наилучшие результаты дает УЗО на режимах №№ 4, 7 и 8, при которых достигается наименьшее значение параметра R_a . Однако, по такому параметру, как максимальная высота неровностей R_{max} режим № 8 ($P_{\text{СТ}} = 150$ Н, $S = d_{\text{омн}}/2$) показывает наихудшие результаты. Поэтому можно сделать вывод, что оптимальными режимами, обеспечивающими достижение наилучших показателей шероховатости, являются режимы №№ 4 и 7 ($P_{\text{СТ}} = 100$ Н, $S = d_{\text{омн}}$ и $P_{\text{СТ}} = 150$ Н, $S = d_{\text{омн}}$ соответственно).

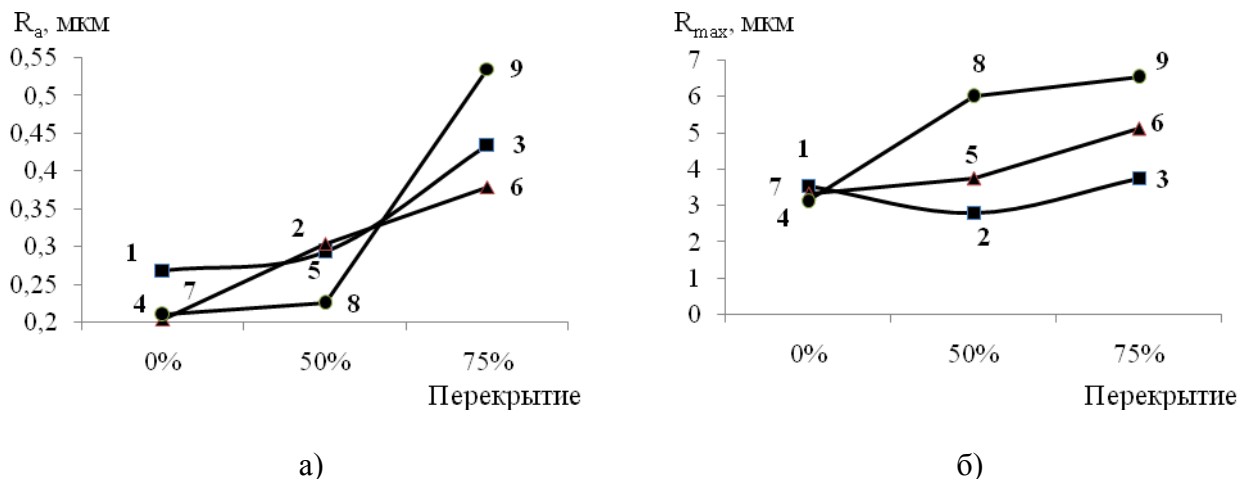


Рис. 4. Влияние перекрытия отпечатков на параметры шероховатости:

а) среднеарифметическое отклонение профиля R_a ;б) максимальная высота неровности R_{max} (■ – $P_{CT} = 50$ Н; ▲ – $P_{CT} = 100$ Н; ● – $P_{CT} = 150$ Н, цифрами обозначены режимы УЗО)

Количество ударов инструмента в одну точку поверхности при УЗО на указанных режимах лежит в пределах 79200–88000 ударов. Как показывают результаты исследования, дальнейшее увеличение количества ударов отрицательно влияет на показатели шероховатости (режимы №№ 3, 6, 9). Одним из возможных объяснений такого эффекта (понижение класса шероховатости с ростом количества ударов) может являться начало «шелушения» поверхности, которое сопровождается снижением чистоты поверхности.

Несколько худшие результаты, если судить по параметрам R_a и R_{max} , дают режимы №1 ($P_{CT} = 50$ Н, $S = d_{omn}$), №2 ($P_{CT} = 50$ Н, $S = d_{omn}/2$) и №5 ($P_{CT} = 100$ Н, $S = d_{omn}/2$).

Таким образом, оптимальными режимами, обеспечивающими достижение наилучших показателей шероховатости, являются режимы №№ 4 и 7, соответствующие УЗО без перекрытия отпечатков. Недостатком УЗО без перекрытия

отпечатков является сложность обеспечения равномерной обработки поверхности, обусловленная необходимостью перемещения инструмента в поперечном направлении на строго определенную величину. При УЗО с 50%-ным перекрытием отпечатков (режимы №№ 2, 5 и 8) также достигаются хорошие показатели шероховатости, однако с увеличением количества ударов возрастает величина параметра R_{max} . Дальнейшее увеличение перекрытия отпечатков до 75% приводит к значительному ухудшению основных параметров шероховатости поверхности.

Выводы: 1. Проведена УЗО опытных образцов зубчатых колес локомотивов из стали 45ХН на девяти различных режимах, отличающихся величиной статического усилия прижима и поперечной подачи инструмента.

2. Получены экспериментальные зависимости параметров шероховатости поверхности R_a , R_{max} , R_p и R_v от режимов УЗО. Установлено, что УЗО на всех указанных режимах приводит к

улучшению основных параметров шероховатости.

2. Установлено, что оптимальными режимами УЗО по совокупности параметров шероховатости являются режимы со следующими параметрами: $P_{CT} = 100$ и

150 Н, $v_{прод} = 0,5$ мм/с, без перекрытия отпечатков, $f = 22$ кГц, $A = 30$ мкм.

3. Установлено, что оптимальное количество ударов инструмента в одну точку поверхности лежит в пределах 79200-88000 ударов, дальнейшее увеличение приводит к ухудшению параметров шероховатости.

Список литературы

1. Рахимьянов, Х.М. Формирование морфологии поверхности в процессе ультразвукового пластического деформирования деталей машин [Текст] / Х.М. Рахимьянов, Ю.С. Семенова // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение, – 2010. – № 10. – С. 20-23.

2. Папаев, А.Г. Контроль шероховатости и управление поверхностью металлических изделий, обработанных ультразвуком [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» / А.Г. Папаев; [Северо-Западный государственный заочный технический университет]. – Санкт-Петербург, 2011. – 19 с.

3. Попов, Е.П. Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем [Текст] / Е.П. Попов, И.П. Пальтов. – М.: Физматгиз, 1960. – 337 с.

4. Спосіб зміцнення деталей з конструкційних матеріалів: пат. 78733 UA МПК В24В 39/00 / Колодяжний П.В.; власник Східноукраїнський національний університет імені В. Даля; заявл. 25.10.2012, опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6. – 6 с.

5. Зайцев, К.В. Совершенствование технологии процесса ультразвуковой обработки поверхностей стальных деталей перед нанесением газотермических покрытий [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» / К.В. Зайцев; [Юргинский техн. ин-т НИТПУ]. – Тюмень, 2011. – 280 с.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, зубчатые колеса локомотивов, параметры шероховатости поверхности, статическое усилие прижима, скорость подачи инструмента.

Аннотации

Проведено дослідження щодо впливу ультразвукової обробки на параметри шорсткості поверхні зубчастих коліс локомотивів. Встановлено залежності основних параметрів шорсткості від величини статичного зусилля притискання, швидкості подачі інструменту. Визначено оптимальну кількість ударів інструмента в одну точку поверхні, необхідну для поліпшення основних параметрів шорсткості. Дані рекомендації щодо вибору режимів ультразвукової обробки зубчастих коліс локомотивів.

Проведены исследования по влиянию ультразвуковой обработки на параметры шероховатости поверхности зубчатых колес локомотивов. Установлены зависимости основных параметров шероховатости от величины статического усилия прижима, скорости подачи инструмента. Определено оптимальное количество ударов инструмента в одну точку поверхности, необходимое для улучшения основных параметров шероховатости. Даны

рекомендации относительно выбора режимов ультразвуковой обработки зубчатых колес локомотивов

In the article was made the research of the influence of ultrasonic treatment on the surface roughness of locomotive gears. Was determined the dependence of the main roughness parameters on the static pressing force and feed rate of the tool. Also was determined the optimal number of impacts of the tool in one point of the surface that needs to improve basic roughness parameters. Was given the recommendations regarding to the choice of the conditions of ultrasonic treatment of locomotive gears.