

УДК 622.33.39

В. В. Поветкин, д – р техн. наук, проф., **А. З. Букаева**, **Е. П. Орлова**, **И. Н. Исаева**
Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К. И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан
Тел.: + 8 (727) 2926919; E-mail: vv1940_povetkin@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

В данной статье представлено экспериментальное исследование поверхностно-пластической деформации стальных деталей механическими шаровыми и роликовыми барабанами. В качестве модели сталей, используемых для изготовления зубчатых колес, применялась сталь 40Cr и 35CrMoA, из которой был изготовлен экспериментальный образец. Настроены зависимости силы давления P выдвигного ящика и твердости поверхности HB от скорости вращения деталей.

Ключевые слова: зубчатое колесо, шаровая мельница, стенд, надежность, модель, износ, сверло

EXPERIMENTAL STUDY OF SURFACE-PLASTIC DEFORMATION OF STEEL PARTS MECHANICAL INSTRUMENTS

This article presents an experimental study of the surface-plastic deformation of steel parts by mechanical ball and roller drums. As a model of steels used to make gears, the adopted steel 40Cr and 35CrMoA from which the experimental sample was made. The dependence of the pressure force P of the drawer and the hardness of the surface HB on the rotation speed of the parts are plotted.

Keywords: cogwheel, ball mill, stand, reliability, model, wear, drill

В настоящее время отсутствуют практические рекомендации по повышению ресурса работы тяжело нагруженных зубчатых передач привода шаровых мельниц, основанных на эффективных методах упрочнения зубчатых зацеплений и повышения их износостойкости на стадии проектирования, изготовления и эксплуатации.

В результате анализа видов повреждений зубчатых колес восьми серийных горных машин: очистных комбайнов, проходческих комбайнов и скребковых конвейеров, проведенного Донецким политехническим институтом и ИГД им. А.А.Скочинского на Рутченковском и Горловском рудоремонтных заводах, установлено следующее распределение отбракованных при дефектировке колес: 56% - износ, 17% - питтинг, 17% - излом, 10% - остальные виды повреждений. Шаровые мельницы с периодической загрузкой имеют циклический режим работы, а мельницы с непрерывной загрузкой работают длительное время в установившемся режиме эксплуатации.

Несмотря на большое количество выполненных исследований, сложная проблема динамики механических систем с упругими звеньями содержит еще много вопросов, нуждающихся в дальнейшей разработке. Данных по анализу видов колебаний элементов крупных машин в номинальном и стопорном режимах в литературе недостаточно, ввиду отсутствия достоверных сведений о внешних нагрузках, собственных частот колебаний и демпфирования.

В последние годы в технологии металлообработки широкое распространение получили динамические методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностей пластическим деформированием, среди которых важное место занимает отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом [1,2].

Обработка деталей машин поверхностным пластическим деформированием является одним из наиболее простых и эффективных методов упрочнения. Поверхностное пластическое деформирование повышает усталостную прочность, контактную выносливость и износостойкость деталей и, тем самым, увеличивает долговечность машин и оборудования.

В результате поверхностного деформирования изменяются микроструктура и физико-механические свойства верхнего слоя металла: повышается его твердость и прочность, возникают благоприятные сжимающие остаточные напряжения. Шероховатость поверхности становится ниже. Особенно эффективным, является локальное (местное) упрочнение методами пластического деформирования участков концентраторов напряжений, которое значительно производительней и дешевле, чем повсеместное.

Активное развитие машиностроения свидетельствует об острой необходимости разработки в современном машиностроении принципов и путей осуществления различных видов локальной обработки поверхностей деталей машин, в том числе тяжело нагруженных зубчатых передач приводов.

Нами проведены исследования влияния глубины поверхностного слоя и величины твердости на циклическую прочность деталей. Для исследования влияния глубины слоя могут быть использованы зубчатые колеса или их образцы различного диаметра и модуля, цементуемые на различную глубину в диапазоне 0,4-1,6 мм (этот диапазон рекомендуется в литературных источниках для цементуемых деталей). Величины глубины слоя обеспечиваются изменением продолжительности цементации. Для всех образцов величина твердости поверхности составляет 60-62 HRC.

Для исследования влияния распределения микротвердости использованы цементуемые образцы, твердость поверхности которых находится в диапазоне 55-63 HRC. Величины твердости обеспечиваются изменением режима термической обработки. Глубина слоя для этих образцов составляет 1-1,2 мм.

В работе также использованы образцы диаметра 300 мм для изучения влияния масштабного фактора. Образцы цементуются на глубину 1- 2 мм, величина твердости поверхности которых составляет 60-62 HRC. На основе анализа результатов испытаний проведено исследование на опытных зубчатых колесах модуля 6 мм. Зубья колеса цементуются на глубину 1,1-1,3 мм при поверхностной твердости 60-62 HRC. Опытные зубчатые колеса изготовлены из высококачественной стали 45 той же категории, из которой изготавливают натурные зубчатые колеса и сталь 40X, сталь 35ХМЛ.

Химический состав и механические свойства стали 40X приведены в таблицах 1 и 2; в таблицах 3 и 4 представлены другие физико-механические свойства стали при их термической обработке.

Таблица 1. Химический состав стали 40X, в %

Материал	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Ni	Fe
Сталь 40X	0,36 - 0,44	0,17 - 0,37	0,5 - 0,8	до 0,035	до 0,035	0,8 - 1,1	до 0,3	до 0,3	~97

Таблица 2. Механические свойства стали 40X

ГОСТ	Состояние поставки, режим термообработки	Сечение, мм	КП	$\sigma_{0.2}$ (МПа)	σ_b	δ_5 (%)	ψ %	КСУ (кДж / м ²)	НВ, не более
					(МПа)				
4543-71	Пруток. Закалка 860°C, масло. Отпуск 500°C, вода или масло	25		780	980	10	45	59	
8479-70	Поковки, отливки,	500-800	245	245	470	15	30	34	143-179
	нормализация	300-500	275	275	530	15	32	29	156-197
	закалка, отпуск	500-800	275	275	530	13	30	29	156-197
	нормализация	до 100	315	315	570	17	38	39	167-207
	100-300	14				35	34		

Таблица 3. Химический состав стали 35ХМЛ

Материал	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Fe
Сталь 35ХМЛ	0.3 - 0.4	0.2 - 0.4	0.4 - 0.9	до 0.04	до 0.04	0.8 - 1.1	0.2 - 0.3	~97

Таблица 4. Механические свойства стали 35ХМЛ

Сортамент	Размер, мм	Напр	σ_b , МПа	σ_t , МПа	δ_5 , %	ψ , %	КСУ, кДж / м ²	Термообработка
35ХМЛ ГОСТ 977-80 Отливки	до 100	-	600	400	12	20	300	Нормализация 860-880°C, Отпуск 600-650°C.
Твердость материала 35ХМЛ								НВ=163-225

В результате процесса ППД необходимо определить параметры шероховатости R_z от усилия давления P шарика или ролика и режимов обработки (S , n), на поверхности заготовки, выполненный в виде вала из сталей 40Х и 35ХМЛ, а также параметры твердости поверхности НВ заготовки при различных усилиях давления P и различных оборотов n при обкатке шариком или роликом, а также характер изменения твердости НВ по глубине h упрочненного слоя.

На рисунке 1 изображен экспериментальный стенд, выполненный на базе токарно-винторезного станка GH2060ZH в патрон которого устанавливается испытуемая деталь с выполненной на ней ступенями, предварительно обработанные до шероховатости $R_z=20$.

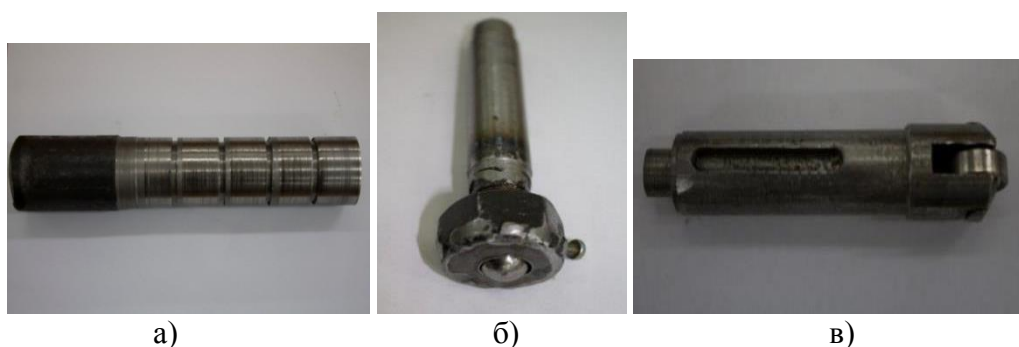


Рисунок 1. Экспериментальный стенд на базе токарно-винторезного станка GH2060ZH

Принятые обозначения: P – давление обкатника, Н; n – скорость вращения детали, об/мин; S – подача обкатника или накатника, мм/об.

На рисунке 2 показаны образцы детали, обкатник шариковый и роликовый накатник.

Измерение шероховатости производилось на профилографе - профилометре модели 201 ПС; измерение твердости поверхности регистрировалось на приборе универсальным твердомером.



а)

б)

в)

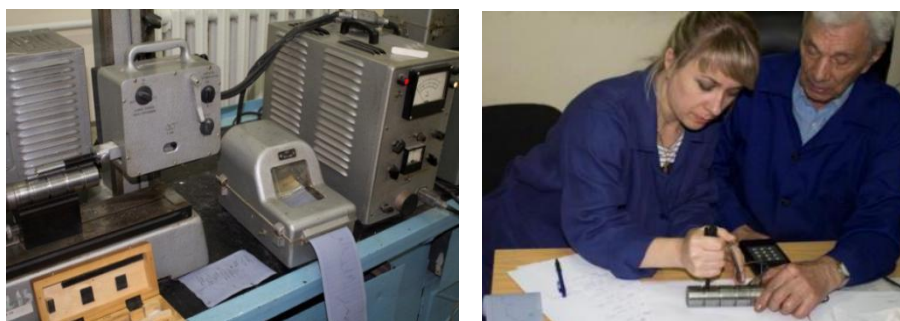
Рисунок 2. Испытываемый образец детали и инструменты для обкатки
а - образец заготовки с сегментами; б - обкатник шариковый; в - накатник роликовый

На рисунке 3 показаны приборы для измерения шероховатости и твердости.

При проведении эксперимента использовалась следующее оборудование:

- токарно-винторезный станок марки GH2060ZH; динамометр 5 тс; твердомер универсальный 54-459 м по НВ 95-470.

- резец токарный проходной отогнутый ($\varphi = 45^\circ$, $r = 0,5$ мм), шарик в державке $d=15$ мм; ролик в державке $d=22 \times 7$ мм; штангенциркуль 250 мм и микрометр.



а) профилограф-профилометр модель 201 ПС; б) твердомер универсальный модель 54-459М

Рисунок 3. Приборы для измерения твердости и шероховатости

Заготовка $d = 41$ мм сталь 40Х и сталь 35ХМЛ с разделенными на четыре равные по длине сегментами, каждый сегмент $l = 25$ мм.

Принятые обозначения: P – давление обкатника, Н; n – скорость вращения деталей, об/мин; S – подача обкатника, мм/об.

Давление обкатника (P) рассчитывается по формуле:

$$P = 12,5 \times \sigma_T (d/100)^2 \quad (1)$$

где, $\sigma_T(40X) = 80$ кг/мм².

$$P = 12,5 \times 80 (41/100)^2 = 1000 \times 0,82 = 820 \text{ Н};$$

Скорость для обработки сегментов заготовки выбирается $v_1=30$ м/мин; $v_2=60$ м/мин; $v_3=90$ м/мин; $v_4=100$ м/мин и рассчитывается по формуле:

$$v = \pi dn / 1000 \quad (2)$$

Частота вращения шпинделя (n) рассчитывается по формуле:

$$n = v \times 1000 / \pi d \quad (3)$$

$$\begin{aligned} n_1 &= v_1 \times 1000 / \pi d; \quad n_1 = 30 \times 1000 / 3,14 \times 41 = 30000 / 129 = 232 \text{ об / мин}; \\ n_2 &= v_2 \times 1000 / \pi d; \quad n_2 = 60 \times 1000 / 3,14 \times 41 = 60000 / 129 = 465 \text{ об / мин}; \\ n_3 &= v_3 \times 1000 / \pi d; \quad n_3 = 90 \times 1000 / 3,14 \times 41 = 90000 / 129 = 697 \text{ об / мин}; \\ n_4 &= v_4 \times 1000 / \pi d; \quad n_4 = 100 \times 1000 / 3,14 \times 41 = 100000 / 129 = 775 \text{ об / мин}; \end{aligned}$$

Согласно технической характеристики станка, для испытаний взято ближайшее число оборотов.

Режимы предварительной обработки сегментов детали наружное обтачивание:

$$\begin{aligned} n_1 &= 260 \text{ об / мин}, S = 0,23 \text{ мм / об}, t = 0,4 \text{ мм}; \\ n_2 &= 500 \text{ об / мин}, S = 0,23 \text{ мм / об}, t = 0,4 \text{ мм}; \\ n_3 &= 630 \text{ об / мин}, S = 0,23 \text{ мм / об}, t = 0,4 \text{ мм}; \\ n_4 &= 800 \text{ об / мин}, S = 0,23 \text{ мм / об}, t = 0,4 \text{ мм}. \end{aligned}$$

В результате экспериментальных исследований необходимо найти функциональные зависимости: твердости HRC поверхности по глубине металла при обкатке шариком и роликом при различных режимах, а также изменения шероховатости поверхности R_z . [1, 2, 3].

Методика проведения работы по ППД состоит в следующем:

1) Установить заготовку в центрах станка, токарный резец – в резцедержатель суппорта (рисунок 3).

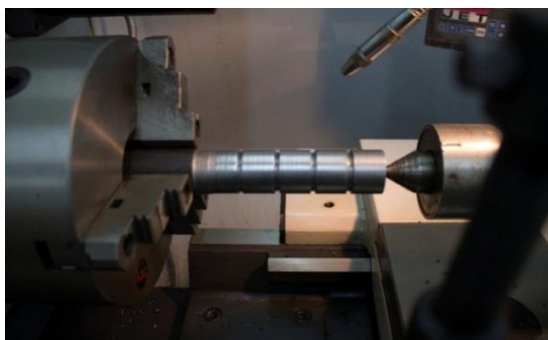


Рисунок 4. Установка заготовки в центрах станка

2) Проточить с одной установки четыре сегмента заготовки, сталь 40X ($R_{z1} = 14,3$ мкм; $R_{z2} = 13,5$ мкм; $R_{z3} = 12,8$ мкм; $R_{z4} = 10$ мкм.) и сталь 35ХМЛ ($R_{z1} = 14,5$ мкм; $R_{z2} = 13,7$ мкм; $R_{z3} = 13$ мкм; $R_{z4} = 12$ мкм.) (рисунок 5).

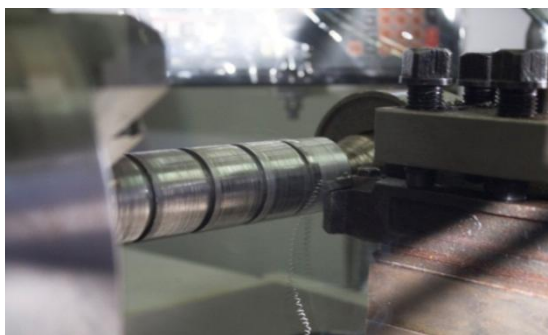


Рисунок 5. Проточка заготовки четырех сегментов

- 3) Измерить штангенциркулем диаметры всех четырех участков.
- 4) Измерить среднее арифметическое отклонение профиля твердости (по HRC) на всех проточенных участках.
- 5) Измерить среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости (по R_z) на всех проточенных четырех сегментах заготовки.
- 6) Закрепить заготовку в центрах станка, а в резцедержателе установить шариковый обкатник (рисунок 6).
- 7) Установить режимы обкатывания для каждого сегмента заготовки отдельно.
- 8) Установить для первого сегмента заготовки усилие обкатывания. Для этого, подвести обкатник до касания шариком поверхности первого пояска и установить давления обкатника. Обкатать поясок за один рабочий ход при давлений обкатника

$P=820\text{Н}$. Повторить указанные приемы для остальных трех сегментов заготовки, последовательно изменяя число оборотов n согласно расчетам.



Рисунок 6. Процесс накатки шариковым накатником

9) Измерить диаметры сегментов, твердость HRC и шероховатость R_z их поверхности на всех участках, результаты занести в журнал.

10) При подаче $S = 0,23$ мм/об и числе оборотов $n_1 = 260$ об / мин; $n_2 = 500$ об / мин; $n_3 = 630$ об / мин; $n_4 = 800$ об / мин, обработать заготовку для дальнейшего проведения экспериментов.

11) При постоянном давлении накатника $P = 820$ Н, постоянной подачи S изменяя число оборотов n , производим обкатку шариком, замеряем твердость HRC.

12) Все полученные результаты при обкатке шариком занести в журнал.

13) Повторить вышеуказанные действия при обкатке роликом поверхности сегментов заготовки при тех же режимах и давлении $P = 820$ Н. Предварительно обработать заново все сегменты заготовки и занести в журнал данные по шероховатости R_z и твердости HRC поверхности. Процесс накатки роликовым накатником представлен на рисунке 7.



Рисунок 7. Процесс накатки роликовым накатником

В результате проведения экспериментальных исследований построены следующие графики: $R_z = f(n)$; $\text{HRC} = f(n)$ при давлении $P=820\text{Н}$.

По представленным данным на рисунке 8 показан график зависимости твердости поверхности $\text{HRC} = f(n)$ для стали 40Х при обработке шариком ($d = 15$ мм) при $P = 820$ Н (рисунок 8).

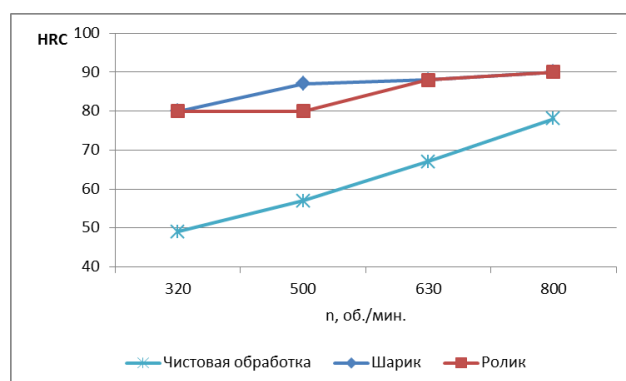


Рисунок 8. График зависимости твердости поверхности $HRC = f(n)$ для стали 40X при $P = 820$ Н

Также на рисунке 9 построен график зависимости твердости поверхности $HRC = f(n)$ для стали 35ХМЛ при обработке шариком ($d = 15$ мм) и роликом ($d = 22$ мм) при $P = 820$ Н (рисунок 9).

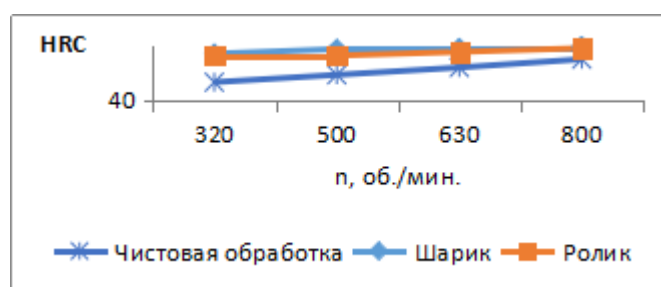


Рисунок 9. График зависимости твердости поверхности $HRC = f(n)$ для стали 35ХМЛ

По представленным данным построен график зависимости шероховатости поверхности $R_z = f(n)$ для стали 40X при $P = 820$ Н обработке шариком ($d = 15$ мм) (рисунок 10).

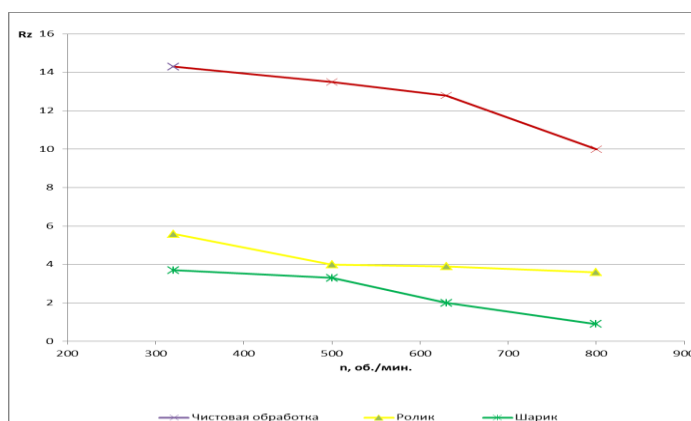


Рисунок 10. График зависимости шероховатости $R_z = f(n)$ для стали 40X при $P = 820$ Н

По экспериментальным данным построен график зависимости шероховатости поверхности $R_z = f(n)$ для стали 35ХМЛ при $P = 820$ Н обработке шариком ($d = 15$ мм) (рисунок 11).

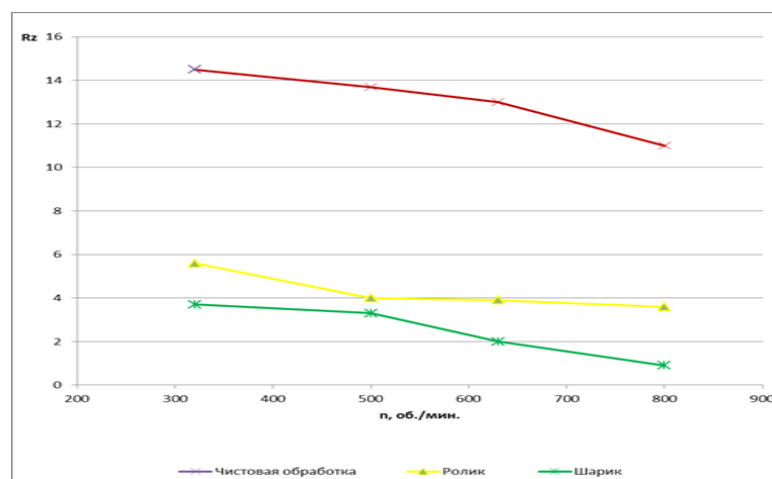


Рисунок 11. График зависимости шероховатости $R_z = f(n)$ для стали 35ХМЛ при $P = 820$ Н обработке шариком ($d = 15$ мм) и роликом ($d = 22$ мм)

Представленные зависимости на рисунках 8-11 позволяют сделать следующие выводы:

- существует устойчивая тенденция роста упрочнения поверхностного слоя под действием шариковых и роликовых накатников при увеличении числа оборотов вращения детали и давления накатника, достигающих 30 %;

- снижение шероховатости поверхности после накатки шариком и роликом зависит от числа оборотов детали и давления накатника, что значительно отвечает принятой нами модели упрочнения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бабичев, А. П. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / А. П. Бабичев, П. Д. Мотренко и др. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2003. – 192 с.
2. Бутенко, В. И. Локальная отделочно - упрочняющая обработка поверхностей деталей машин / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 126 с.
3. Физико-технологические основы методов обработки / Под ред. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 409 с.

Поступила в редколлегию 18.05.2017 г.