

УДК 623.4.01

В.П. Кожемякин<sup>1</sup>, Н.И. Бондаренко,<sup>1</sup> В.И. Котельников<sup>2</sup>

## ОБРАБОТКА МЕТАЛЛА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Нижегородский военный институт инженерных войск<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Проведено сравнение качества обработки поверхностей валов круглым шлифованием и термодинамическим методом при ремонте изношенных деталей военно-инженерной техники. Предложена методика проведения экспериментов. Исследовано влияние режимов шлифования и термодинамической обработки на качество поверхностного слоя (параметры шероховатости поверхности) обработанной детали.

*Ключевые слова:* стали, механическая обработка резанием, поверхностно-пластическое деформирование, нагрев детали.

## Введение

Одной из основных задач ремонта военной техники в чрезвычайных условиях является ускорение технологического процесса восстановления изношенных поверхностей деталей. Традиционная механическая обработка металла резанием добивается заданных параметров качества поверхностей преимущественно на финишных операциях технологического процесса шлифованием. В частности, шейки валов под кольца подшипников качения подвергаются операциям круглого шлифования. Данный процесс трудоемок, связан с использованием специального оборудования. Абразивные инструменты для круглого шлифования изготавливаются в виде кругов, дисков, сегментов и брусков различной формы. Типы шлифовальных кругов регламентированы ГОСТ 2424-83. К наиболее широко применяемым типам относятся: прямой профиль (условное обозначение - 1), чашечный цилиндрический (6), чашечный конический (11) и тарельчатые (14).

Абразивный инструмент в процессе работы подвержен износу. Величина и скорость износа влияет на качество обработки поверхностей детали. Износ круга вызывает нарушение правильной геометрической формы его рабочей поверхности: при этом возможно появление огранки, овальности, криволинейности образующей, неплоскостности, волнистости. Эти отклонения снижают точность обработки и ухудшают эксплуатационные показатели качества обработанной поверхности. Изнашивание абразивного инструмента заключается в постепенном отделении частиц рабочего слоя, приводящее к уменьшению его массы и размеров при абразивной обработке. Скорость изнашивания абразивного инструмента определяется отношением потери массы абразива к времени, в течение которого износ произошёл. Снижение качества поверхности шлифуемой детали происходит также в результате затупления либо засаливания инструмента.

**Затупление** абразивного инструмента – образование площадок на поверхности абразивных зерен, приводящее к изменению профиля рабочей поверхности и уменьшению режущей способности абразивного круга при абразивной обработке металла. Абразивные круги в процессе работы могут засаливаться. **Засаливание** – перенос на рабочую поверхность круга частиц шлама при абразивной обработке. Шлам включает частицы обрабатываемого материала, инструмента, СОЖ и др. С целью ликвидации затупления и засаливания круги периодически подвергают правке. В зависимости от требований к точности и шероховатости обрабатываемой поверхности выделяют алмазную и безалмазную правку. На правку расходуется от 40 до 80% рабочего слоя абразивных кругов. Затраты времени на правку могут достигать 40% штучного времени обработки и более.

Данное исследование проводилось на деталях типа вал. При ремонте ВИТ валы могут иметь следующие дефекты:

- износ и задиры посадочных шеек;
- износ и смятие рабочих поверхностей шпоночных канавок, шлицев, резьбы;
- погнутость и скручивание вала;
- трещины и изломы.

Перед началом ремонта вала проверяется состояние центровых отверстий и при необходимости их восстанавливают повторным засверливанием либо шлифованием (допускается вручную шабером). Скрученность вала более  $0,23^\circ$  на 1 м длины считается недопустимой, и вал выбраковывается. Валы и оси с дефектами в виде выкрашиваний и больших задиров могут быть наплавлены электрической либо газовой сваркой. Прогиб вала или оси диаметром до 80 мм устраняют правкой в холодном состоянии, а свыше 80 мм с нагревом.

Посадочные шейки валов могут быть также восстановлены до номинальных размеров путем наращивания металлизацией, электрическим покрытием, полимерами, способами пластической деформации, напрессовыванием втулок с последующей механической обработкой резанием. Допускается восстанавливать посадки сопряжений обработкой поверхностей на ремонтные размеры. Наиболее широко используется наплавка изношенной поверхности с последующим точением. Трещины и сколы заваривают с последующим обтачиванием. Наплавка может выполняться наложением продольных либо винтовых сварочных валиков. После наплавки вал при необходимости правят, шейки обтачивают и шлифуют на номинальные размеры. Посадочные шейки под обоймы подшипников качения с износом по диаметры до 0,1–0,2 мм восстанавливают пластическим деформированием поверхностного слоя. При восстановлении шейки вала напрессовкой стальной втулки необходимо предварительно обточить вал, чтобы толщина стенок втулки была не менее 3 мм.

Шлицевые поверхности валов могут иметь износ, смятие и выкрашивание рабочих поверхностей. Шлицевую часть вала диаметром более 80 мм наплавляют ручной или автоматической наплавкой продольными валиками. Шлицевые поверхности с шириной шлицев до 5 мм чаще заваривают сплошь. При незначительном износе по ширине шлиц (0,1 – 0,2 мм) валы восстанавливают раздачей шлиц или электроискровым исправлением боковых поверхностей с последующей их шлифовкой. В отдельных случаях сильно изношенный шлицевой конец отрезается. На место среза приваривается заготовка с большим диаметром. Затем приваренную заготовку на конце вала обтачивают и нарезают новые шлицы на шлицефрезерном станке методом обката. Шлицы шлифуют и закаливают.

Шпоночные пазы могут иметь такие же неисправности, как и шлицы. Шпоночный паз при износе менее 15% его ширины расширяют под ремонтный размер фрезерованием.

Если увеличением ширины паза не восстанавливается его геометрическая форма, то фрезеруют новый паз, смещенный на  $90$  или  $120^\circ$  к поврежденному, а старый заваривают. На валах крупных размеров паз наплавляют с одной стороны, а затем фрезеруют.

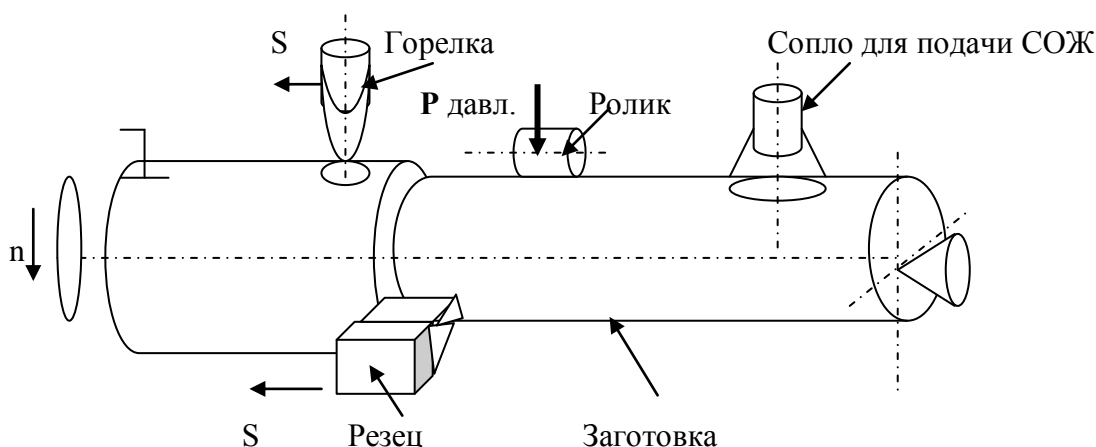
При незначительных смятиях и наличии заусенцев резьбы исправляют прогонкой плашкой на токарном станке или слесарной обработкой вручную. При значительном износе профиля и при срыве ниток резьбовую часть наплавляют с последующей обточкой шейки и нарезанием резьбы требуемого размера. Иногда старую резьбу срезают и на ее месте нарезают новую уменьшенного размера.

Из перечисленного перечня видов восстановления поверхностей была выбрана наплавка изношенной поверхности с последующей механической обработкой резанием и термодинамическим методом.

### Материалы и методика экспериментов

Наплавка производилась сварочными электродами либо сварочной проволокой той же марки стали, что и у ремонтируемой детали. Обработка наплавленных шеек вала холодным резанием проводилась точением на токарном станке 16К20 с последующей шлифовкой на

круглошлифовальном станке. Термодинамическая обработка проводилась на токарном станке с использованием для нагрева пламени ацетиленокислородной горелки. Поверхностно-пластическое деформирование (ППД) проводилось охлаждаемым водой роликом с регулируемой величиной давления на обрабатываемую поверхность. Степень нагрева поверхности перед ППД изменялась в широких пределах изменением времени нагрева и расстояния высокотемпературного ядра пламени горелки над нагреваемой поверхностью. Установка для исследования процесса резания с нагревом и ППД представляла собой токарный станок с навесным оборудованием. Экспериментальная установка схематически показана на рис. 1.



**Рис. 1. Схема термодинамической обработки нагретой поверхности детали**

Заготовка зажималась на станке в трехкулачковом патроне с поджимом центром задней бабки. Стандартная ацетилен-кислородная горелка снабжена редуктором, расход газа в котором автоматически регулируется. Она смонтирована на продольном суппорте токарного станка перед режущим инструментом с противоположной от детали стороны. Роликовый накатник размещался на том же продольном суппорте станка за режущим инструментом. Настройка накатника на нужный режим давления производилась по встроенному динамометру винтовой парой. Сопло для подачи СОЖ на поверхность детали располагалось за накатником с противоположной от резца стороны.

Параметры шероховатости, полученные в результате обработки сравниваемыми методами, исследовались под двойным микроскопом Линника либо сравнивались со стандартными образцами шероховатости. Точность получаемых размеров замерялась микрометром. Величины допустимых отклонений определялись математическими вычислениями разницы замеров диаметров шеек в различных плоскостях сечения.

### Полученные результаты исследования

Шероховатость поверхности формируется в процессе механической обработки резанием и зависит от физико-механических свойств материала заготовки и режущего инструмента, режимов резания, геометрии режущей грани инструмента, величины вибрации (частоты и амплитуды) при холодном резании, образующегося на резце нароста, температуры резания и ряда других факторов.

Затупление режущей кромки инструмента вызывает увеличение радиуса округления при вершине, что повышает степень пластической деформации металла поверхностного слоя и приводит к росту шероховатости поверхности. Резание резцом сопровождается смятием материала, который частично упруго восстанавливается, и увеличением трения по задней поверхности резца. Разница степени упругого восстановления металла выступов и впадин неровностей обычно увеличивает высоту шероховатости.

При холодном резании образуется нарост, который может отрываться с вершины рез-

ца и внедряться в деталь, вызывая резкое его колебание вправо-влево и, как следствие, изменение высотных параметров шероховатости.

В связи с тем, что величина подачи отражаются только на поперечной шероховатости, то её размеры обычно в 2–3 раза превышают продольную шероховатость (ГОСТ 24 773-81). Поэтому оценку обычно производят по величине поперечной шероховатости. Возникновение вибраций при холодном точении металла сопровождается ростом продольной шероховатости, которая может резко возрасти и превысить поперечную шероховатость. Значительно меньшая шероховатость получается при точении нагретого до температуры разупрочнения поверхностного слоя детали.

Как показали многократно повторенные эксперименты, при резании с нагревом отсутствует вибрация системы СПИД. Поэтому процесс резания нагретого до температур разупрочнения металла позволяет получить меньшие параметры шероховатости.

По результатам исследования резания с нагревом и холодного точения металла построены графики зависимости  $R_a = f(V)$  параметров шероховатости от температуры и скорости обработки при  $S = \text{const}$  (рис. 2).

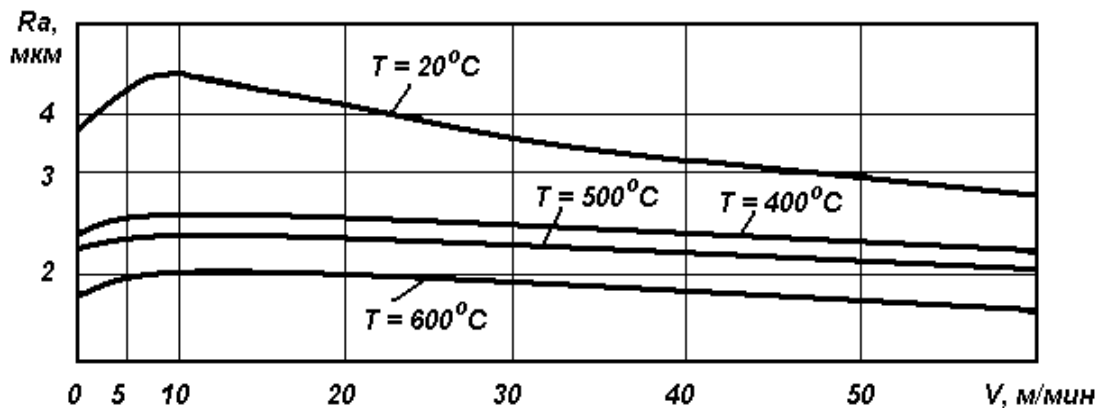


Рис. 2. Зависимость параметров шероховатости стали от скорости обработки при  $S = \text{const}$  при холодном резании и обработки с нагревом

Процесс накатывания нагретой до температуры разупрочнения поверхности детали широким охлаждаемым водой роликовым накатником показан на рис. 3.



Рис. 3. Обработки нагретой поверхности детали охлаждаемым водой роликовым накатником с шириной кольца роликового подшипника 11 мм

Смазочно-охлаждающая частично касается нагретой поверхности за накатником, но она не оказывает существенного влияния на охлаждение обрабатываемой поверхности во время ППД. Процесс круглого шлифования шеек наплавленного металла показан на рис. 4.



**Рис. 4. Шлифование наплавленного металла на шейку вала абразивом при  $V=25$  м/с**

Накатывание осуществляли на длине 50 мм, затем менялась величина давления на ролик. Накатывание проводили с продольной подачей. В экспериментах использовали ролик, жестко связанный с закрепленным в резцедержателе режущим инструментом. В этом случае процесс резания с нагревом совмещался с процессом ППД нагретой поверхности детали. С целью изменения величины давления был сконструирован прижимный механизм «винт – гайка». Создаваемое давление замерялось силовым динамометром с пружиной сжатия, градуированным на разбег давлений от 100 до 500 Н.

Круглое шлифование проводили абразивным кругом диаметром 350 мм шириной 45 мм с электрокорундовым зерном. Скорость круга изменяли от 35 до 25 м/с. Шлифование проводили методом врезания с поперечной подачей камня. Перед шлифованием центровые отверстия вала подшлифовывали. Результаты обработки нагретой поверхности детали из ст. 45 резанием с нагревом при различных режимах обработки показаны в табл. 1.

**Таблица 1**

№ п/п	Режимы резания с нагревом					Режимы накатывания нагретой до 450°C поверхности			Шероховатость
	$S$ , мм/об	$t$ , мм	$n$ , об/мин	$T$ , °C	$R_a$ , мкм	$S$ , мм/об	$n$ , об/мин	$P$ , Н	$R_a$ , мкм
1	0,15	2,0	350	500	1,22	0,15	350	200	0,7
			500		1,8				0,7
			800		1,25				0,6
			1200		1,20				0,6
			1600		1,15				0,5
2	0,28	4,0	350	600	1,30	0,28	350	400	0,5
			500		1,31				0,5
			800		1,29				0,4
			1200		1,28				0,4
			1600		1,26				0,3

Результаты обработки нагретых поверхностей детали из ст. 40Х, обработанных резанием с нагревом при тех же режимах резания и накатывания, приведены в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Режимы резания с нагревом					Режимы накатывания нагретой до 450°C поверхности			Шероховатость
	S, мм/об	t, мм	n, об/мин	T, °C	Ra, мкм	S, мм/об	n, об/мин	P, Н	Ra, мкм
1	0,15	2,0	500	500	1,20	0,15	500	200	0,60
			800		1,20				0,50
			1200		1,15				0,50
			1600		1,15				0,40
2	0,28	4,0	500	600	1,20	0,28	500	400	0,40
			800		1,15				0,35
			1200		1,15				0,30
			1600		1,10				0,25

Как видно из результатов ППД с нагревом, на двух марках металла ст.45 и ст.40Х прослеживаются близкие параметры шероховатости. Причем изменение давления ролика на нагретую поверхность приводит к снижению параметров шероховатости. Как показали эксперименты, увеличение давления выше 1,5 кН приводит к росту шероховатости накатываемой нагретой поверхности. Данное явление можно объяснить налипанием металла на ролик и вырывом частиц металла с поверхности детали при накатывании.

Результаты замеров шероховатости у поверхностей, обработанных резанием с нагревом (исходная шероховатость), накатыванием роликовым накатником по нагретой поверхности пламенем горелки до 450°C, спаренным с режущим инструментом широким охлаждаемым водой роликом, и результатами накатывания холодной поверхности приведены в табл. 3. Как показали эксперименты, в результате накатывания холодной поверхности шероховатость оказалась выше шероховатости накатанной тем же роликом нагретой поверхности.

Таблица 3

Исходная шероховатость поверхности детали Ra, мкм			Шероховатость после обкатки нагретой до 450°C поверхности Ra, мкм			Шероховатость после обкатки холодной поверхности Ra, мкм			
Замеры			Замеры			Замеры			
1	1	2	3	1	2	3	1	2	3
2,8	2,8	2,8	2,8	0,6	0,6	0,5	0,7	0,8	0,8
2,8	3,0	3,0	3,0	0,5	0,5	0,6	0,8	0,9	0,8
2,8	2,8	2,7	2,7	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
2,6	2,5	2,4	2,4	0,4	0,3	0,3	0,7	0,7	0,8

Таблица 4

Режимы резания с нагревом проходным упорным резцом					Режимы накатывания поверхности				Шероховатость
S, мм/об	t, мм	n, об/мин	T, °C	Ra, мкм	S, мм/об	n, об/мин	T, °C	Rпр, мм	Ra, мкм
0,15	2,0	800	450	1,25	0,15	800	600	12,5	0,4
		1200	450	1,25		1200	600		0,3
		1600	450	1,25		1600	600		0,2
0,28	4,0	800	500	1,3	0,1	800	700	12,5	0,3
		1200	500	1,28		1200	700		0,2
		1600	500	1,28		1600	700		0,1

Шероховатость поверхности детали из ст. 40Х после ППД охлаждаемым роликом по нагретой до высокой температуры поверхности детали при давлении ролика 500 Н приведена в табл. 4.

Результаты обработки поверхностей холодным резанием (чистовым этапом токарной обработки) и предварительным шлифованием приведены в табл. 5.

Таблица 5

№ п/п	Режимы холодного резания					Режимы холодного шлифования поверхности			Шероховатость, Ra, мкм
	S, мм/об	t, мм	n, об/мин	T, °C	Ra, мкм	S, мм/об	n, об/мин	t, мкм	
1	0,15	0,4	800	20	3,20	0,15	1000	20	0,85
			1200		3,40		1600		0,80
			1600		3,20		2000		0,75
2	0,28	0,2	800	20	3,30	0,08	1000	10	0,60
			1200		3,25		1500		0,55
			1600		3,10		2000		0,55

Из сравнения табл. 4 и 5 видно, что увеличение температуры нагрева поверхности при накатывании приводит к снижению параметров шероховатости. При нагреве поверхности газовой горелкой в интервале 600–700°С величины параметров шероховатости при обработке нагретого металла снижаются почти в два раза по сравнению с холодным накатыванием и ППД нагретой до 450–550 °С поверхности и достигают параметров, получаемых при суперфинишной обработке металла резанием.

*Дата поступления  
в редакцию 14.07.2011*

**V.P. Kozhemyakin, N.I. Bondarenko, V.I. Kotelnikov**

### **METAL PROCESSING THERMODYNAMIC METHOD**

Made comparison of quality surface finishing roll grinding and thermodynamic method for repairing parts of the military-engineering technics. The technology of experiment o is given . The effect of grinding regimes and thermodynamic treatment on the quality of the surface layer (surface roughness) of treated parts is explore.

*Key words:* steel, mechanical machining, surface-plate mechanical deformation, heating parts.