

## ОБРАБОТКА ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ С НАГРЕВОМ

Котельников В.И.<sup>1</sup>, Гаврилов Г.Н.<sup>1</sup>, Миронов А.Е.<sup>2</sup>, Кошурина А.А.<sup>1</sup>, Чернышов Д.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Россия, Нижний Новгород, Минина, 24, e-mail:gavrilov1109@mail.ru;

<sup>2</sup>ЦНИИ «Буревестник»

---

Обработка поверхностной пластической деформацией (дорнование, выглаживание, развертывание) внутренних цилиндрических поверхностей широко применяется в промышленности при изготовлении большой номенклатуры изделий машиностроения. В работе исследован процесс обработки методом выглаживания внутренних поверхностей отверстий в стальных втулках при их вращении на токарно-винторезном станке с нагревом. Установлено, что шероховатость обработанной выглаживанием поверхности зависит в основном от температуры нагрева и почти не зависит от скорости обработки. Возникающий градиент температур приводит к возникновению напряжений в поверхностных слоях материала, деформированию и смещению зерен микроструктуры, в конечном итоге — к уплотнению материала, что повышает качество и работоспособность изделий. Степень уплотнения при выглаживании с нагревом зависит от величины усилия, приложенного к поверхности со стороны инструмента.

---

Ключевые слова: поверхностное выглаживание, нагрев, трение, деформация металла, микроструктура, конструкционная сталь

## PROCESSING OF INTERNAL CYLINDRICAL SURFACES SMOOTHING WITH HEATING

Kotelnikov V.I.<sup>1</sup>, Gavrilov G.N.<sup>1</sup>, Mironov A.E.<sup>2</sup>, Cashurina A. A.<sup>1</sup>, Chernyshov D.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alexeev, 603950, Russia, Nizhny Novgorod, Minin street, 24, e-mail: gavrilov1109@mail.ru;

<sup>2</sup> CENTRAL RESEARCH INSTITUTE Burevestnik

---

Processing of surface plastic deformation (smoothing, burnishing, deployment) internal cylindrical surfaces is widely used in industry to manufacture a large range of engineering products. In the process of processing method of burnishing of internal surfaces of holes in steel bushings when their rotation on the flow-vintoreznom machine with heating. Found that roughness of machined surface smoothing depends mainly on heating temperature and almost does not depend on the speed of processing. Resulting gradient leads to stresses in the surface layers of a material to deformation and displacement of the grain microstructure, and ultimately to the seal material, which enhances the quality and functionality of the products. Degree of compaction in smoothing with heat depends on the amount of effort applied to the surface of the tool.

---

Keywords: surface smoothing, heat, friction, deformation of metal microstructure, structural steel

Авторами опробован и исследован процесс обработки отверстий методом выглаживания внутренних поверхностей отверстий в стальных втулках при их вращении на токарно-винторезном станке с нагревом. Величина условного натяга (толщина сминаемого нагретого слоя металла детали) определялась с учетом линейного расширения отверстия в зависимости от температуры нагрева металла. Диаметр калибрующего пояска «гладилки»  $D=20$  мм был выбран так, чтобы было обеспечено смятие поверхностного слоя нагретого металла на глубину  $i = 0,02-0,10$  мм по внутренней цилиндрической поверхности.

В ходе экспериментов величина  $i$  менялась от 0,6 до 0,1 мм. Оказалось, что при малых величинах  $i$  снижаются только высотные параметры шероховатости и частично устраняются неточности изготовления формы. При больших величинах  $i$  внутренний и наружный диаметр

втулки увеличиваются [1]. Причем увеличение наружного диаметра втулки меньше, чем внутреннего. Это свидетельствует о повышении плотности нагретого деформированного поверхностного слоя металла.

В работе [1] показано, что при выглаживании холодного металла стальной закаленной «гладилкой» по чистой поверхности без оксидных пленок и без смазки коэффициент трения будет равен  $\alpha = 0,78$ . Если же на поверхности металла имеется оксидная пленка, то коэффициент трения снижается до  $\alpha = 0,27$ .

Условия трения у трущихся поверхностей нагретого отверстия втулки до температуры 400–600°C и холодного деформирующего пояса дорна соответствуют условиям сухого трения по окисным пленкам, следовательно, коэффициент трения в данном случае будет находиться в пределах  $\alpha = 0,22–0,19$ .

Деформационные и сдвиговые процессы в нагретых слоях материала при выглаживании происходят в результате возникновения силового давления по площадке касания деформационного конуса «гладилки» при наличии градиента температур в поверхностном слое и слое, удаленном от поверхности вглубь обрабатываемого материала. Градиент температур вызывает возникновение напряжения в поверхностных слоях материала и приводит к изменениям структуры поверхности, смятию и смещению поверхностных зерен микроструктуры металла внутрь нагретого слоя, в конечном итоге — к уплотнению металла обрабатываемой зоны.

Выделим элементарный объем деформируемого металла втулки в зоне ее контакта с конусом гладилки (рис. 1).

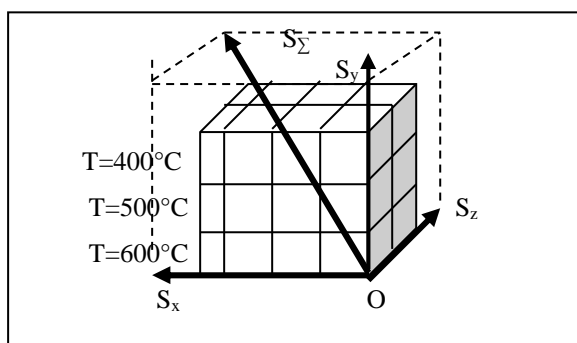


Рис 1. Схема сил деформирующих металл в элементарном объеме

Сила  $P$ , действующая на «гладилку», вызывает в зоне контакта образующей конуса реакцию сопротивления деформации металла вращающейся втулки:

$S_y$  – сила сопротивления сдвигу металла в перпендикулярном направлении вдоль оси  $OY$ , под действием силы давления образующей конуса, равной  $P \operatorname{tg} \beta$ ,

$S_z$  – сила сопротивления деформации металла, направленная по оси OZ, от действия тангенциальной силы трения, возникшей от трения конуса при вращении втулки.

Под действием силы  $S_x$ , возникшей от давления «гладилки» силы  $P$ , зерна металла в точке O, нагретые до температуры 400–600°C, начнут смещаться в направлении оси OX, деформируя и смещая соседние зерна, нагретые до такой же температуры. Одновременно это же зерно из точки O будет смещаться по оси OY под действием силы  $Ptg\beta$ , взаимодействуя с более прочными и менее нагретыми зернами. Это приводит к вытягиванию и сплющиванию зерен вдоль оси OZ под действием тангенциальной силы  $S_z$ .

В результате этих перемещений вытянутое зерно металла будет находиться в смещенном положении перпендикулярно суммирующей силе  $S_\Sigma$ . Такое расположение вытянутых под углом к оси втулки зерен металла создает уплотненный поверхностный слой и снижает возможность образования продольных трещин разгара в обрабатываемом отверстии.

Результаты выглаживания с нагревом внутренней поверхности втулки  $D_{вн}^1 = 51,3$  мм при температуре нагрева  $T_{нагр} = 600–800^\circ\text{C}$  с диаметром калибрующего конуса (материал конуса Р6М5) гладилки 20 мм приведены в таблицах 1, 2.

**Таблица 1**

Результаты выглаживания внутренней цилиндрической поверхности втулки из ст.40Х с толщиной стенки 10 мм

№ п/п	n, об/мин	S, мм/об	$D_{вн}^1$ , мм	$T_{нагр}$ , °C	$P_x$ , Н	$D_{вн}^2$ , мм	Предварительный натяг настроя гладилки
1	30	0,28	51,3	800	249	51,413	$i = 0,6$ мм
2	60	-«-	-«-	-«-	263	51,426	-«-
3	120	-«-	-«-	-«-	285	51,442	-«-
4	30	0,28	51,3	700	431	51,373	$i = 0,5$ мм
5	60	-«-	-«-	-«-	444	51,380	-«-
6	120	-«-	-«-	-«-	465	51,397	-«-
7	30	0,28	51,3	600	856	51,329	$i = 0,4$ мм
8	60	-«-	-«-	-«-	867	51,335	-«-
9	120	-«-	-«-	-«-	872	51,342	-«-

Размер остывшего после выглаживания отверстия втулки  $D_{вн}^2$  замерялся нутромером с индикатором часового типа, настроенным на размер в 52 мм плоскопараллельными мерами.

Из таблицы 2 видно, что процесс выглаживания с большой величиной нагрева и натяга изменяет диаметральный размер внутренней поверхности и уплотняет металл (величина предварительного натяга  $i = 0,6–0,4$  мм).

Важным критерием оценки эффективности выглаживания с нагревом являлось изменение шероховатости обработанной поверхности.

Режимы выглаживания с нагревом приведены в таблице 2.

Таблица 2

Режимы обработки внутренней поверхности втулки из стали 40X с толщиной стенки  
10 мм

№ п/п	Температура нагрева внутренней поверхности °С	Шероховатость внутренней поверхности заготовки, Ra, мкм	Замеренное усилие $P$ , в Н	Число оборотов шпинделя, $n$ , об/мин	Величина подачи, $S$ , мм/об	Шероховатость после обработки, Ra, мкм
1	400	12,5	1120	30	0,28	6,3
2	-«-	-«-	1140	60	0,28	6,3
3	-«-	-«-	1150	120	0,28	6,3
4	450	12,5	1030	30	0,28	6,3
5	-«-	-«-	1050	60	0,28	6,3
6	-«-	-«-	1060	120	0,28	6,3
7	500	12,5	940	30	0,28	3,2
8	-«-	-«-	930	60	0,28	3,2
9	-«-	-«-	930	120	0,28	3,2
10	550	12,5	850	30	0,28	3,2
11	-«-	-«-	840	60	0,28	3,2
12	-«-	-«-	820	120	0,28	3,2
13	600	12,5	730	30	0,28	2,5
14	-«-	-«-	750	60	0,28	2,5
15	-«-	-«-	760	120	0,28	2,5
16	650	12,5	410	30	0,28	2,5
17	-«-	-«-	420	60	0,28	2,5
18	-«-	-«-	420	120	0,28	2,5

По результатам экспериментов установлено, что параметры шероховатости обработанной внутренней поверхности зависят от температуры нагрева поверхностного слоя и величины усилия выглаживания, а также от параметров шероховатости поверхности калибрующего конуса выглаживающего инструмента и от режимов обработки [5].

Торцы образцов шлифовались, и на них были подготовлены шлифы для анализа микроструктуры поверхностного слоя.

Микроструктура образцов металла после выглаживания внутренней поверхности отверстия втулки показана на рисунке 5 (а и б). Видно, что после выглаживания с нагревом в поверхностном слое микротрещины отсутствуют. При этом зерна структурных составляющих – перлита и феррита — сплющены и развернуты в сторону приложения сил при выглаживании.

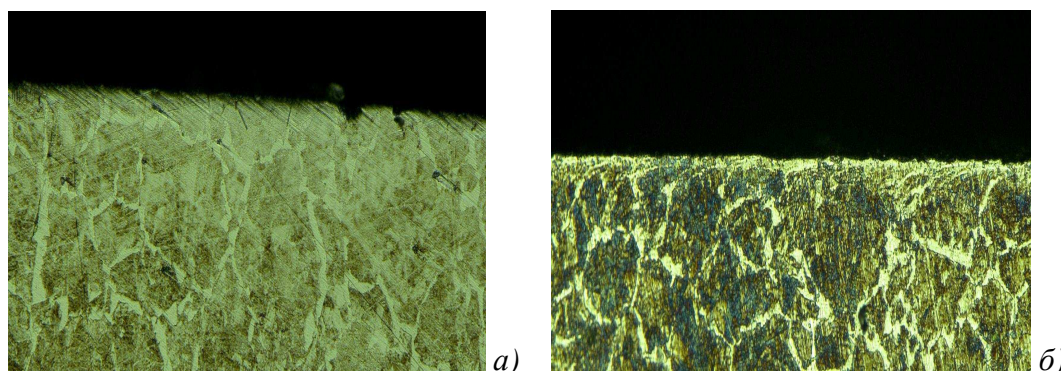


Рис. 5. Микроструктура металла после выглаживания холодного металла (x500):

*а) холодное выглаживание; б) выглаживание с нагревом*

Таким образом, при назначении режимов выглаживания с нагревом обрабатываемых внутренних отверстий на изделиях из стали 40Х необходимо выбирать небольшую скорость обработки и температурный интервал нагрева внутренней поверхности 500–650°С. При этом одновременно увеличивается производительность, снижаются затраты и повышается точность обработки.

При рекомендуемом режиме обработки металла с нагревом обеспечивается оптимальная стойкость инструмента, в основном зависящая от фрикционного трения калибрующего конуса о внутреннюю разогретую поверхность.

Обработка внутренних цилиндрических поверхностей выглаживанием с нагревом приводит к изменению шероховатости обрабатываемых поверхностей, что обеспечивает отсутствие в поверхностном слое микротрещин. При данном виде обработки происходит уплотнение поверхностных слоев металла, что повышает износостойкость. Поэтому данную технологию целесообразно применять для обработки отверстий высоконагруженных конструкций, работающих в сложных климатических условиях.

### **Выводы**

1. В результате выглаживания нагретого металла в поверхностном слое отверстия полой цилиндрической детали образования микротрещин не происходит. В зависимости от температуры нагрева поверхностного слоя величина сопротивления деформации уменьшается, в результате металл уплотняется на глубину до 0,025 мм.

2. При анализе микроструктуры установлено, что уплотнение поверхностного слоя после выглаживания с нагревом поверхности полых цилиндрических отверстий обусловлено деформированием и частичным разворотом зерен микроструктуры обрабатываемого материала.

### **Список литературы**

1. Проскуряков Ю.Г. Объемное дорнование отверстий / Ю.Г. Проскуряков. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
2. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машгиз, 1962. – 284 с.
3. Котельников В.И. Обработка поверхности стальных деталей методом пластического деформирования / В.И. Котельников // Защитные и специальные покрытия, обработка поверхности в машиностроении и приборостроении: сб. IV Всерос. науч.-практич. конф. – Пенза, 2007. – С. 46–49.

4. Котельников В.И. Основы резания металлов с нагревом. Нижний Новгород.: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2012. – 199 с.
5. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд.5-е доп. М.: Атомиздат, 1979. — 415 с.

**Рецензенты:**

Пачурин Г.В., д.т.н., профессор кафедры «ПБЭиХ» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород;

Михаленко М.Г., д.т.н., профессор, директор института физико-химических технологий и материаловедения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е.Алексеева, г. Нижний Новгород.