

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №12 (138). С. 16-20.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №12 (138). P. 16-20.

Научная статья  
УДК 621.923.9.  
doi:10.30987/2223-4608-2022-12-16-20

## Ленточное глубинное шлифование – прогрессивный вид механической обработки

Юрий Михайлович Зубарев<sup>1</sup>, д.т.н.,  
Александр Владимирович Приемышев<sup>2</sup>, к.т.н.,  
Виктор Валентинович Звоновских<sup>3</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2,3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> iuzubarev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>2</sup> priemyshev52@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных работ по ленточному глубинному шлифованию стали 20X13 и сплава VT3-1. Показывается преимущество ленточного глубинного шлифования, которое позволяет значительно повысить эффективность обработки заготовок деталей машин, особенно имеющих криволинейные поверхности, такие как лопатки паровых и газовых турбин, лопасти гребных винтов и др.

**Ключевые слова:** ленточное шлифование, удельная работа, эффективная мощность, период стойкости ленты, точность и качество обработки

**Для цитирования:** Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Звоновских В.В. Ленточное глубинное шлифование – прогрессивный вид механической обработки // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №12 (138). – С. 16-20. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-16-20.

Original article

## Abrasive-belt creep feed grinding as a progressive type of machining operation

Yuri M. Zubarev<sup>1</sup>, Dr.Sc.Tech.,  
Alexander V. Priemyshev<sup>2</sup>, Can.Sc.Tech.,  
Viktor V. Zvonovskikh<sup>3</sup>, Can.Sc.Tech.

<sup>1</sup> St. Petersburg State Maritime Technical University, St. Petersburg, Russia

<sup>2,3</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia  
iuzubarev@mail.ru, prie-myshev52@mail.ru

**Abstract.** The results of experimental work on abrasive-belt creep feed grinding of 20X13 steel and VT3-1 alloy are presented. The advantage of abrasive-belt creep-feed grinding, which allows significant increasing of the efficiency of work on a workpiece of machine parts, particularly having cam surfaces, such as steam and gas turbine blades, propeller blades, etc., is shown.

**Keywords:** abrasive-belt grinding, specific work, effective power, efficient belt life, processing accuracy and performance

**For citation:** Zubarev Yu. M., Priemyshev A. V., Zvonovskikh V. V. Abrasive-belt creep feed grinding as a progressive type of machining operation. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 12 (138), pp. 16-20. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-16-20.

Главными задачами металлообработки в машиностроении являются: значительное повышение производительности труда, сокращение объема механической обработки и уменьшения ее себестоимости. Одним из инновационных методов, позволяющих решить эти задачи, является глубинное ленточное шлифование. Кинематически этот вид шлифования аналогичен глубинному шлифованию «жестким» абразивным кругом и может быть выполнен при глубинах резания до 10 мм и более за один рабочий ход [1, 2]. Этот метод позволяет совместить в одной операции черновую и чистовую обработку, исключив традиционные операции – точение, фрезерование, строгание и др., т.е. лезвийную обработку. При этом оборудование для ленточного шлифования проще, а значит и дешевле, а инструмент (абразивная лента) значительно дешевле, чем лезвийный инструмент, а также чем абразивные круги, особенно круги для скоростного и высокоскоростного шлифования.

Основное направление для применения глубинного шлифования абразивным кругом – это получение глубоких канавок, пазов, лысок. Шлифование с использованием инструмента в виде абразивной ленты открывает широкие возможности для финишной обработки поверхностей заготовок, имеющих разную геометрическую форму. Такие поверхности имеют, например, турбинные лопатки, лопасти гребных винтов, шнеков и др. При этом съём металла в единицу времени больше, чем при лезвийной обработке, качество и точность обработанной поверхности выше, а себестоимость операции значительно ниже [3, 4]. В отечественном машиностроении его внедрение сдерживается отсутствием технологических рекомендаций и соответствующего оборудования.

Условия проведения эксперимента: модернизированный под ленточное шлифование плоскошлифовальный станок 3Е711, заготовка – призматический брусок из стали 20х13 и сплава ВТ3-1. Абразивные ленты 14АР40С1С; 51СР60Б831У8СБ и ленты фирмы «Norton» R884Р40. Схема шлифования встречная. Скорость резания –  $v_d = 15$  м/с.

Для того, чтобы решить задачу по определению режимов шлифования, удобно воспользоваться таким понятием, как приведенное или удельное усилие  $P'$  прижима ленты к поверхности заготовки [4].

$$R'_y = \frac{P_y}{h}; \text{Н/мм},$$

где  $P_y$  – сила прижима, Н;  $h$  – ширина контакта ленты с обрабатываемой поверхностью, мм.

Скорость съема металла определяется по формуле [3]:

$$Q_m = Q'_m \cdot h = t \cdot S_k \cdot v_u; \text{мм}^3/\text{мин}$$

где  $Q'_m$  – удельная скорость снятия металла (скорость снятия металла, приведенная к 1 мм ширина  $h$  контакта ленты с обрабатываемой поверхностью), мм;  $t$  – глубина шлифования, мм;  $S_k$  – подача, мм/ход,  $v_u$  – скорость продольного движения заготовки, мм/мин.

Период стойкости абразивной ленты определяется по времени обработки до появления видимых следов прижогов на поверхности или по моменту проскальзывания ленты на ведущем режиме, что соответствует ее «засаливанию» или полному износу.

В процессе шлифования контролировали температуру в зоне резания с помощью искусственной константовой термодпары, оценивали качество шлифованной поверхности (шероховатость, микротвердость, остаточные напряжения) и точность обработки.

Для повышения производительности обработки схема глубинного ленточного шлифования имеет значительные преимущества перед другими методами шлифования. Это происходит за счет большего числа абразивных зерен, которые одновременно участвуют в работе диспергирования. Таких зерен примерно в 10 – 15 раз больше, чем при многоходовом шлифовании. Удельный съём металла увеличивается в 20 – 60 раз.

При  $t = 10$  мм и  $v_u = 80$  мм/мин,  $Q_{уд} = 800$  мм<sup>3</sup>/мин·мм. Толщина среза при глубинном ленточном шлифовании также значительно уменьшается – до 10 раз.

Удельную работу можно определить как [3, 4]:

$$A_{уд} = \frac{P_z \cdot v_d}{Q}, \text{Дж/мм}^3,$$

где  $P_z$  – сила резания, Н;  $v_d$  – линейная скорость перемещения ленты, м/с;  $Q$  – скорость съема металла, мм<sup>3</sup>/мин.

Эффективная мощность ленточного шлифования:

$$N_3 = \frac{P_z \cdot V_{\text{л}}}{1020}, \text{ кВт};$$

Скорость съема металла  $Q = Q_{\text{уд}} \cdot h$ .

Тогда удельную работу при глубинном ленточном шлифовании вычислим по формуле:

$$A_{\text{уд}} = \frac{1020 \cdot N_3}{Q_{\text{уд}} \cdot h} = \frac{1020 \cdot N_{\text{эф.уд}}}{Q_{\text{уд}}};$$

Для исследуемых материалов  $N_{\text{эф.уд}}$  находится в пределах 0,2...0,3 кВт/мм [1].

Были получены эмпирические зависимости  $N_{\text{эф.уд}}$ ;  $T$  (период стойкости абразивной ленты, мин);  $\theta$  (температура в зоне резания, °C);  $Ra$  (высота шероховатости обработанной поверхности, мкм) от режимов резания,

$$Ra = C \cdot v_u^x \cdot t^y.$$

В табл. 1 приведены значения коэффициентов  $C$  и показателей степени  $X$  и  $Y$  при вычислении указанных параметров.

### 1. Значения коэффициента $C$ и показателей степени $X$ и $Y$ в эмпирических зависимостях

	20X13			BT3-1		
	$C$	$X$	$Y$	$C$	$X$	$Y$
$N_{\text{эф.уд}}$ , кВт/мм	0,177	0,03	0,07	0,015	0,04	0,10
$T$ , мин	29310	-1,52	-1,56	4074	-1,33	-1,91
$\theta$ , °C	12,62	0,68	0,59	66,53	0,47	0,90
$Ra$ , мкм	0,164	0,44	0,33	0,335	0,31	0,26

Следует отметить, что при увеличении удельного съема металла до 2,0...2,5 мм<sup>3</sup>·с происходит резкое снижение удельной работы шлифования для данных материалов, при дальнейшем его увеличении, величина  $A_{\text{уд}}$  практически мало изменяется (рис. 1).

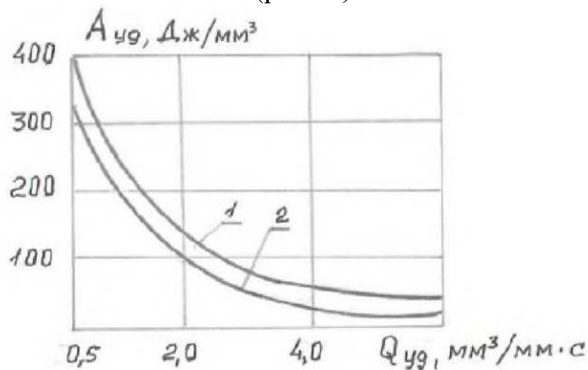


Рис. 1. Зависимость удельной работы  $A_{\text{уд}}$  шлифования от удельного съема металла:

1 – сталь 20X13; 2 – сплав BT3-1

Исходя из приведенных результатов вытекает вывод и о повышении эффективной мощности резания при реализации операции ленточного глубинного шлифования,  $N_{\text{эф.уд}}$  увеличивается прямо пропорционально, если увеличивать ширину среза.

При глубинном шлифовании лентой «Nor-top» удельный съем металла увеличивается в 1,5...2 раза по сравнению с обработкой отечественными лентами, а  $N_{\text{эф.уд}}$  увеличивается лишь на 20...40%. Это подтверждает необходимость уделять должное внимание качеству отечественного абразивного инструмента.

При оценке периода стойкости лент  $T$  наиболее значимым элементом режима резания является глубина резания. Увеличение глубины в 4 раза при  $v_u = \text{const}$  приводит к снижению  $T$  в 5 раз. Увеличение  $t$  приводит к тому, что площадь контакта ленты с обрабатываемой заготовкой значительно меняется в сторону увеличения. Возрастает тепловая и силовая нагрузки на режущие зерна ленты.

В результате анализа экспериментальных данных установлено, что период стойкости при глубинном ленточном шлифовании с постоянным удельным съемом металла снижается, если увеличиваем глубину резания ( $t = 2...10$  мм;  $v_u = 40...320$  мм/мин) для всех исследованных диапазонов режимов резания. Объясняется это значительным увеличением площади контакта ленты с обрабатываемой поверхностью.

Что касается температур в зоне резания и теплового баланса между контактирующими телами, то все эти параметры значительно изменяются. Это происходит за счет увеличения длины контакта ленты с заготовкой. При этом максимальная контактная температура наблюдается на передней кромке источника тепла (ленты). При этом снижается теплонапряженность шлифованной поверхности. Это подтверждается как аналитическими расчетами, так и данными экспериментов. Объясняется это тем, что при ленточном глубинном шлифовании с малыми скоростями подачи изделия, длительность воздействия теплового источника на

обрабатываемую поверхность возрастает. С увеличением площади контакта ленты с изделием выделяющееся тепло распределяется на большой объем металла и, следовательно, увеличивается время на его отвод до выхода на обработанную поверхность заготовки.

Анализ экспериментальных данных показывает, что наибольшая контактная температура возникает при обработке титанового сплава. При этом увеличение глубины шлифования оказывает наиболее существенное влияние на рост температуры также при обработке заготовок из сплава ВТ3-1.

Максимальные значения контактных температур соответствуют следующим режимам резания:

Сталь 20Х13:

$\theta = 950^\circ\text{C}$ ; при  $t = 8$  мм;  $V_u = 40$  мм/мин;

$Q_{уд} = 5,3$  мм<sup>3</sup>/мм·С

Сплав ВТ3-1:

$\theta = 1050^\circ\text{C}$ ; при  $t = 4$  мм;  $V_u = 40$  мм/мин;

$Q_{уд} = 2,7$  мм<sup>3</sup>/мм·С

В результате выполненных исследований установлено, что при ленточном глубинном шлифовании поверхностные слои заготовок из стали 20Х13 и сплава ВТ3-1 упрочняются по сравнению с исходной структурой в среднем в 2 – 3 раза. Степень упрочнения и толщина упрочненного слоя уменьшаются с уменьшением скорости подачи изделия  $v_u$  и глубины резания  $t$ . При шлифовании с постоянным съемом металла увеличение скорости перемещения заготовки и пропорциональное уменьшение глубины резания также приводит к снижению степени упрочнения. Это объясняется уменьшением числа абразивных зерен ленты, одновременно участвующих в работе шлифования, что приводит к снижению силы резания, а следовательно, и к снижению степени пластической деформации.

Для исследования возможностей повышения качества шлифуемых поверхностей были выполнены исследования, при которых обработку осуществляли за два рабочих хода: черновое ленточное шлифование при  $t = 5 \dots 12$  мм и чистовое, при  $t = 0,1$  мм. Глубина резания на чистовом рабочем ходе обусловлена величиной дефектного поверхностного слоя, полученного при черновом глубинном шлифовании.

Результаты исследований показали, что дефектный поверхностный слой после черного рабочего хода, полностью удаляется, если применить чистовой рабочий ход с режимами резания  $v_u = 640$  мм/мин и  $t = 0,1$  мм.

На рис. 2 показано влияние режимов резания на величину и знак остаточных технологических напряжений в поверхностном слое заготовок.

Необходимо отметить, что в большинстве случаев на поверхности заготовок формируются напряжения сжатия. Дополнительный чистовой ход, практически не меняя характера распределения напряжений, снижает напряженность поверхностного слоя в 1,5 – 2 раза.

Высота шероховатости поверхности заготовок после черного рабочего хода находится в пределах  $Ra = 0,9 \dots 0,7$  мкм. Введение чистового рабочего хода улучшает эти показатели  $Ra = 0,3 \dots 0,5$  мкм.

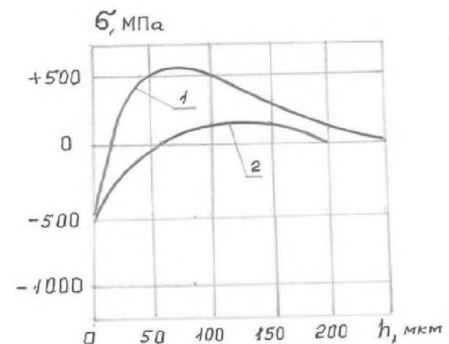


Рис. 2. Распределение технологических остаточных напряжений при ленточном глубинном шлифовании стали 20Х13:

1 – шлифование за один рабочий ход; 2 – шлифование с чистовым рабочим ходом

Таким образом, для операций ленточного шлифования можно назначать сочетание черного и чистового рабочих ходов, создающих благоприятные технологические остаточные напряжения, повышающих точность обработки и качество обработанных поверхностей.

### Заключение

Результаты исследований показывают, что в ряде случаев применение операций глубинного ленточного шлифования целесообразно и внедрение этого процесса в промышленность дает экономический эффект. Особенно эффективен метод при использовании рабочих циклов, которые дают возможность рационально назначать режимы резания и обеспечивать требуемую точность и качество поверхности обрабатываемых заготовок.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кремень, З.И., Юрьев, В.Г., Бабошкин, А.Ф. Технология шлифования в машиностроении / под общ. ред. З.И. Кременя. – СПб.: Политехника, 2007. – 424 с.
2. Макаров, В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов. – СПб.: Лань, 2013. – 320 с.
3. Зубарев, Ю.М., Юрьев, В.Г. Абразивные инструменты. Разработка операций шлифования. – СПб.: Лань, 2018. – 360 с.
4. Стратиевский, И.Х., Юрьев, В.Г., Зубарев, Ю.М. Абразивная обработка. Справочник. – М.: Машиностроение, 2010. – 352 с.

## REFERENCES

1. Kremen Z.I., Yuryev V.G., Baboshkin A.F. Grinding technology in mechanical engineering / under the general ed. Z.I. Kremen. about Z.I. Flint. – St. Petersburg: Polytechnic, 2007. – 424 p.
2. Makarov V.F. Modern methods of high-efficiency abrasive treatment of heat-resistant steels and alloys. – St. Petersburg: Lan, 2013. – 320 p.
3. Zubarev Yu.M., Yuryev V.G. Abrasive tool. Development of grinding operations. – St. Petersburg: Lan, 2018. – 360p.
4. Stratievsky I.H., Yuryev V.G., Zubarev Yu.M. Abrasive treatment. Handbook. – M.: Mechanical Engineering, 2010. – 352 p.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 31.08.2022; одобрена после рецензирования 08.09.2022; принята к публикации 14.09.2022.

The article was submitted 31.08.2022; approved after reviewing 08.09.2022; assepted for publication 14.09.2022.

