СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Демченко А.И., Рябцев А.И., Коровин В.А., Беляев С.В., Леушин И.О. Влияние фильтрации на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЭП-648-ВИ 2

НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

Каменева А.Л., Каменева Н.В. Зависимость морфологических особенностей катодов, дефектности и элементного состава $Ti_{1-x}Al_xN$ пленок от теплового состояния катодов в процессе электродугового испарения 6

ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Сидорова Т.Ю. Повышение стойкости теплоизолирующей вставки в воздушной фурме доменной печи 14

Мокрицкий Б.Я., Шакирова О.Г., Соснин А.А., Ситамов Э.С., Еруков А.И. Оценка результатов прогнозного моделирования выбора рационального инструментального материала 20

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК И СБОРКА

Скрябин В.А., Ленин А.Д., Демидов Е.А. Особенности глубинного шлифования деталей турбокомпрессоров 27

Гайдар С.М., Карелина М.Ю., Колокатов А.М., Пыдрин А.В. Исследование противоизносных свойств СОЖ в процессе обработки металлов резанием 32

НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

Коломейченко А.В., Кравченко И.Н., Титов Н.В., Петровский Д.И., Багринцев О.О. Исследование износостойкости композитных покрытий, полученных при карбовибродуговом упрочнении 36

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ И СЕРТИФИКАЦИЯ

Васильев В.А., Вельмакина Ю.В., Майбородин А.Б., Александрова С.В. Использование информационных технологий при интеграции системы менеджмента качества предприятия с требованиями смежных стандартов 41

ИНФОРМАЦИЯ

Третья международная конференция «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии» 48

УДК 621.923.01

Особенности глубинного шлифования деталей турбокомпрессоров

В.А. СКРЯБИН*, д-р техн. наук, проф., А.Д. ЛЕНИН, магистрант,
Е.А. ДЕМИДОВ, магистрант

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза, 440026, Российская Федерация

*E-mail: vs-51@list.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2019-9-0-27-31

Статья поступила в редакцию 27.03.2019
Принята после доработки 14.05.2019
Принята к публикации 29.05.2019

Исследованы особенности глубинного шлифования хвостовой части лопаток турбокомпрессоров. Рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований эффективности процесса глубинного шлифования профиля хвостовой части лопаток. Показано, что при шлифовании хвостовой части лопаток путем непрерывной правки шлифовальных кругов алмазными роликами при встречном вращении кругов и роликов параметры шероховатости и волнистости поверхностей хвостовой части уменьшаются, а производительность труда и стойкость инструмента увеличиваются при сопоставлении с попутной обработкой абразивных инструментов.

Ключевые слова: *технология обработки, теоретические и экспериментальные исследования, непрерывная правка, алмазные ролики, шероховатость, волнистость, мощность процесса шлифования, хвостовая часть лопаток.*

Одним из основных элементов, определяющих эффективную работу турбокомпрессоров дизелей (ТК), является елочная хвостовая часть лопатки турбокомпрессора, служащая для ее соединения с диском колеса компрессора.

В связи с тем, что основным материалом, из которого изготавливаются лопатки, являются труднообрабатываемые литейные сплавы с высокими прочностными характеристиками, жаропрочностью и износостойкостью, значительно возрастает время их изготовления при протягивании и обычном плоском шлифовании, что не позволяет стабильно и быстро достигать качественных параметров поверхностей хвостовой части лопатки.

В этом плане для интенсификации процесса обработки наиболее эффективным является глубинное шлифование поверхностей хвостовой части, которое может быть реализовано путем применения специальных станков с ЧПУ для плоского шлифования, характеризующихся высокой жесткостью в статическом и динамическом состоянии, вибростойкостью и достаточно большой мощностью привода главного движения. Всеми этими показателями обладают плоскошлифовальные двухшпиндельные станки Липецкого станкостроительного завода ЛШ-233М с системой ЧПУ *Sinumeric* 840*D*. Использование вышеуказанного оборудования позволяет достигать необходимой производительности обработки

и шероховатости поверхности хвостовой части лопаток в диапазоне Ra = 0,8—1,25 мкм. В этом случае, согласно проведенным экспериментам, сводятся к минимуму фазово-структурные изменения в поверхностном слое материала лопаток [1] и повышается геометрическая точность размеров, достигающая шестого квалитета. Наиболее нагруженной деталью, работающей в тяжелых условиях, является лопатка турбокомпрессора дизеля. Она определяет ресурс работы турбокомпрессора. Хвостовая часть лопатки испытывает растяжение и изгиб, вызываемые центробежными силами, а также изгиб и кручения от потока газа, термические напряжения во время быстрого нагрева и быстрого охлаждения во время запуска и при остановке двигателя. Статические напряжения при работе лопатки имеют величину 50—200 МПа. Хвостовая часть работает в диапазоне температур 450—600 °С. Разница температур от хвостовика к концу пера лопатки составляет 150—200 °С. Напряжения от вибраций изменяются в пределах 40—60 МПа.

Качание хвостовой части лопатки (елочное замковое соединение — ЕЗС) допускается в пределах 0,5—0,8 мм после ее соединения с пазом диска. Закрепление лопаток в специальных пазах рабочего колеса компрессора осуществляется с помощью клинового замка, удерживающего их от осевого смещения. Надежность лопатки турбокомпрессора при его эксплуатации зависит как от конструктивной прочности (сопротивление циклическим и длительным статическим разрушающим нагрузкам), так и от технологии ее изготовления, оказывающей большое влияние на качественные показатели поверхности ЕЗС. Если в поверхностном слое хвостовой части лопаток присутствуют остаточные напряжения, наклеп, искажение и фрагментация зерен, то это активирует окисление, выгорание легирующих элементов и рекристаллизацию и приводит, как следствие, к преждевременному ее разрушению.

Предприятия тяжелого и транспортного машиностроения, на которых выпускаются турбокомпрессоры для дизелей различного назначения (ОАО «Пензадизельмаш», ОАО «СКБТ», АО «Коломенский машиностроительный завод», АО «Брянский машиностроительный завод» и т.д.) применяют различные методы изготовления хвостовой части лопаток турбокомпрессоров: фрезерование, протягивание, глубинное шлифование.

Наиболее эффективным является метод глубинного шлифования с непрерывной правкой шлифовального круга за два рабочих хода на специальных шлифовальных станках с ЧПУ — одношпиндельном ЛШ183М и двухшпиндельном ЛШ233М.

Режущим инструментом являются специальные высокопористые шлифовальные круги марки 3П 500х25х203 25А10П ВМ212К5 ПГ класса точности А, 1кл. 35 м/с. Технологические параметры кругов и детали следующие: $\upsilon_к$ = 30 м/с; $\upsilon_д$ = 200 мм/мин; смазочно-охлаждающим технологическим средством (СОТС) является АКВОЛ-14М.

Правящий инструмент — это алмазные правящие ролики (АР) АС65Т, АС82Т, АС-132 зернистостью 10. Материал лопаток турбокомпрессоров — труднообрабатываемый жаропрочный литейный сплав АНВ300 и жаропрочная сталь 31Х19Н9, а также сплав на никелевой основе ХН70ВМТЮ (ЭИ-617).

При обработке ЕЗС лопаток турбокомпрессора методом глубинного шлифования основными недостатками являются износ и засаливание абразивных кругов, что приводит к теплонапряженности процесса обработки и, как следствие, к низкой производительности. Одним из методов устранения этих недостатков является непрерывная правка абразивных кругов алмазными роликами, а также свойства и количество подводимой смазочно-охлаждающей жидкости. Использование непрерывной правки АР как на черновом, так и на чистовом переходах сопряжено с возникновением дополнительных вибраций в технологической системе.

Результаты исследований показывают, что при шлифовании ЕЗС с непрерывной правкой кругов алмазными роликами при встречном направлении вращения кругов и роликов шероховатость обработанной поверхности и волнистость снижаются, а произ-

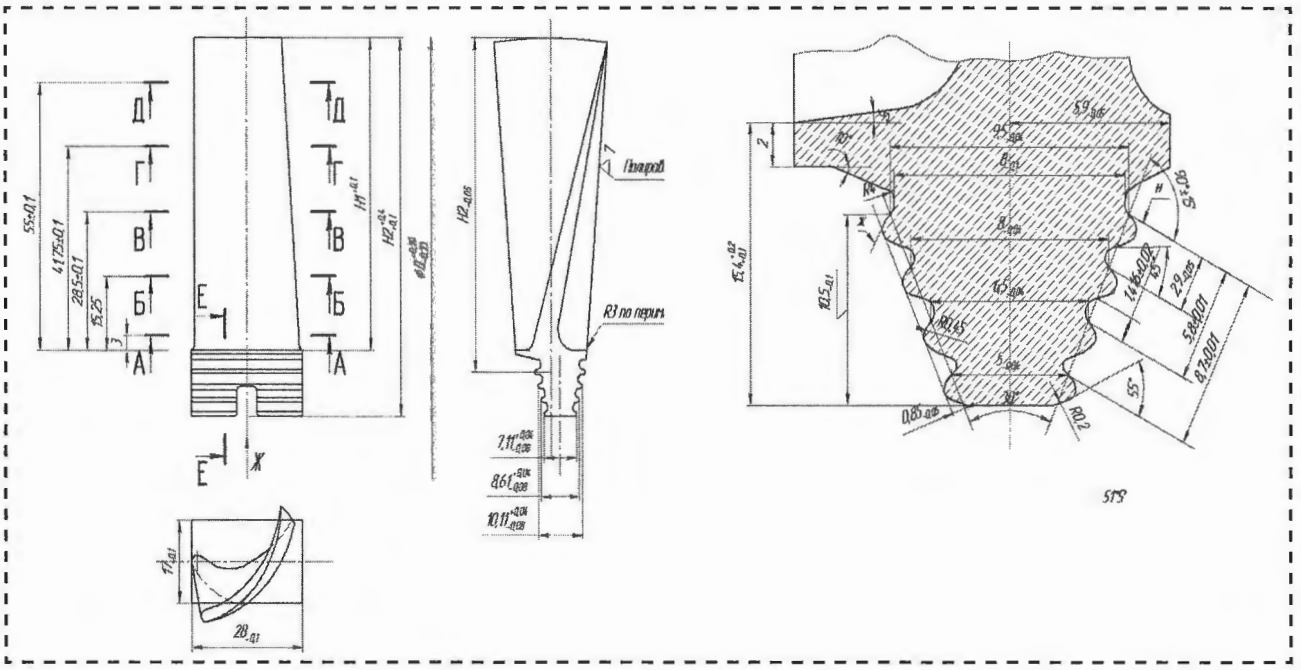

Рис. 1. Профиль хвостовой части лопатки

водительность труда и стойкость инструмента возрастают по сравнению с попутным направлением вращения кругов и роликов. При этом составляющие сил резания P_z и P_Y и их рассеивание увеличиваются.

Обработка профиля ЕЗС лопатки (рис. 1) производилась на специальном плоскошлифовальном станке модели ЛШ 233М (рис. 2) при встречном и попутном направлениях вращения абразивного круга и алмазных роликов (рис. 3). Скорости вращения абразивного круга $\upsilon_{кр}$ и алмазных роликов $\upsilon_{рол}$ при шлифовании

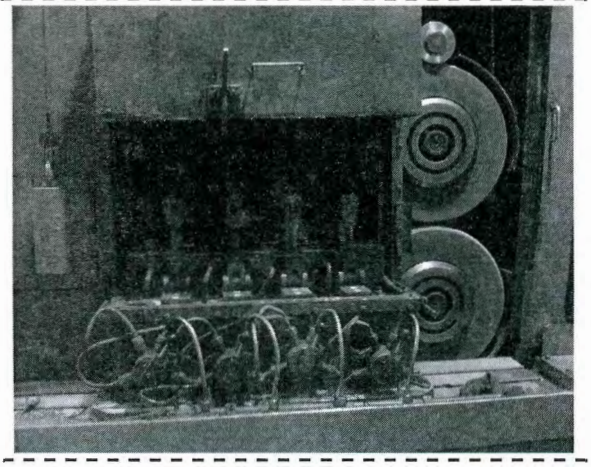

Рис. 2. Рабочая область станка с ЧПУ модели ЛШ233М

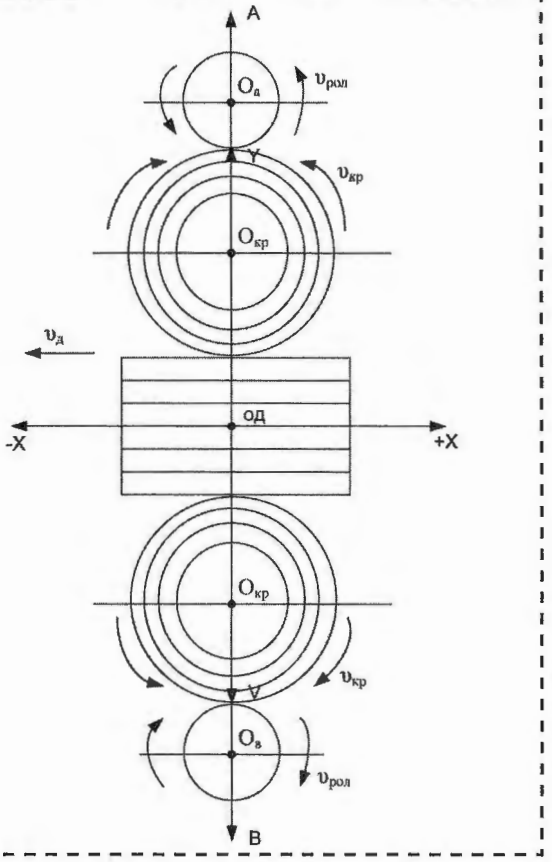

Рис. 3. Встречное и попутное шлифование поверхностей хвостовой части лопаток абразивными инструментами с их автоматической правкой алмазными роликами

принимались постоянными для обеспечения равномерного износа шлифовального круга.

Режимы шлифования и правки при попутном вращении правящего алмазного ролика принимались следующими:

1. Предварительный технологический переход:

снимаемый слой металла, мм.....$Z = 1{,}4—1{,}8$;
скорость резания, м/с .....$\upsilon_{кр} = 25$;
подача стола с деталью, мм/мин.....$\upsilon_д = 80$;
подача правящего ролика на круг, мм на 10 оборотов шлифовального круга.....0,006

2. Окончательный технологический переход:

снимаемый слой металла, мм.....$Z = 0{,}1—0{,}16$;
скорость резания, м/с .....$\upsilon_{кр} = 26—28$;
подача стола станка с деталью, мм/мин .....$\upsilon_д = 200—400$;
подача ролика на круг, мм на 10 оборотов шлифовального круга.....0,004

При встречном вращении ролика и круга:

1. Предварительный технологический переход:

удаляемый слой металла, мм.....$Z = 1{,}5—2$;
скорость резания, м/с .....$\upsilon_{кр} = 27$;
подачи стола станка с деталью, мм/мин .....$\upsilon_д = 100$;
подача ролика на круг, мм на 10 оборотов шлифовального круга.....0,004

2. Окончательный технологический переход:

снимаемый слой материала, мм.....$Z = 0{,}05—0{,}1$;
скорость вращения круга, м/с....$\upsilon_{кр} = 27—30$;
подача стола станка с деталью, мм/мин .....$\upsilon_д = 300—500$;
подача ролика на круг, мм на 10 оборотов шлифовального круга.... 0,002

Амплитуда и частота колебаний, влияющие на виброустойчивость технологической системы, определялись с помощью фотоэлектрической линейки станка на верхней и нижней шпиндельных бабках, шпинделях механизма непрерывной правки станка, усилителя колебаний М-60Т, регулятора ПИ-19 и осциллографа Н-117/1,5.

Измерение составляющих силы резания P_z и P_Y производилось динамометром УДМ-100, усилителем 8А-Н4 и осциллографом модели Н-117/1,5. Шероховатость и волнистость поверхностного слоя определялись с помощью профилометра модели АБРИС-ПМ7.

Тангенциальная составляющая силы резания P_z определяется следующим образом:

$$P_z = C_{P_z} \cdot t^{X_{P_z}} \cdot S_{пр}^{Y_{P_z}} \cdot \nu^{Z_{P_z}} (\cos\gamma)^{X_{P_z}} \cdot L, \qquad (1)$$

где C_{P_z} — коэффициент, зависящий от физико-механических свойств и структуры обрабатываемого материала и материала режущей части инструмента; t — глубина резания, мм; $S_{пр}$ — продольная подача детали относительно шлифовальных инструментов, мм/об; ν — скорость резания шлифовального круга, м/с; L — длина обрабатываемой поверхности детали, м; γ — угол, определяющий форму профиля поверхности детали.

При этом (рис. 4) выделим бесконечно малый элемент обрабатываемой детали высотой dx, координата которого $X_{крит}$. Элементарная сила шлифования определяется как

$$dP_z = C_{P_z} \cdot t^{X_{P_z}} \cdot S_{пр}^{Y_{P_z}} \cdot \nu^{Z_{P_z}} (\cos\gamma)^{X_{P_z}} \cdot dL. \qquad (2)$$

Исходя из рис. 4 скорость резания обрабатываемой элементарной части поверхности определяется следующим образом:

$$\nu = \omega_{шл.\,кр} \cdot R_x = \omega_{шл.\,кр} \cdot X \cdot \operatorname{tg}\gamma,$$

где $\omega_{шл.\,кр}$ — угловая скорость шлифовального круга, рад/с.

Так как $dL = dX/\cos\gamma$, то зависимость (1) можно преобразовать как

$$dP_z = C_{P_z} \cdot t^{X_{P_z}} \cdot S_{пр}^{Y_{P_z}} \cdot (\omega_{шл.\,кр} \cdot \operatorname{tg}\gamma)^{Z_{P_z}} \times \times (\cos\gamma)^{X_{P_z}} \cdot \frac{dX}{\cos\gamma} = A \cdot X^{Z_{P_z}} dX, \qquad (3)$$

где $A = C_{P_z} \cdot t^{X_{P_z}} \cdot S_{пр}^{Y_{P_z}} \cdot (\omega_{шл.\,кр} \cdot \operatorname{tg}\gamma)^{Z_{P_z}} \cdot (\cos\gamma)^{X_{P_z}} \times \times \frac{1}{\cos\gamma}$.

После интегрирования (3) имеем:

$$P_z = A \int_{R_1}^{R_2} X^{Z_{P_z}} dx = A \cdot [X^{Z_{P_z}}]_{R_1}^{R_2}. \qquad (4)$$

По данным [1, 2]: $C_{P_z} = 98 \cdot 10^1$; $X_{P_z} = 0{,}6$; $Y_{P_z} = 0{,}65$; $Z_{P_z} = 0{,}5$.

$$P_z = 2 \cdot A \cdot [\sqrt{X}]_{R_1}^{R_2} = 2 \cdot A \cdot (\sqrt{R_2} - \sqrt{R_1}).$$

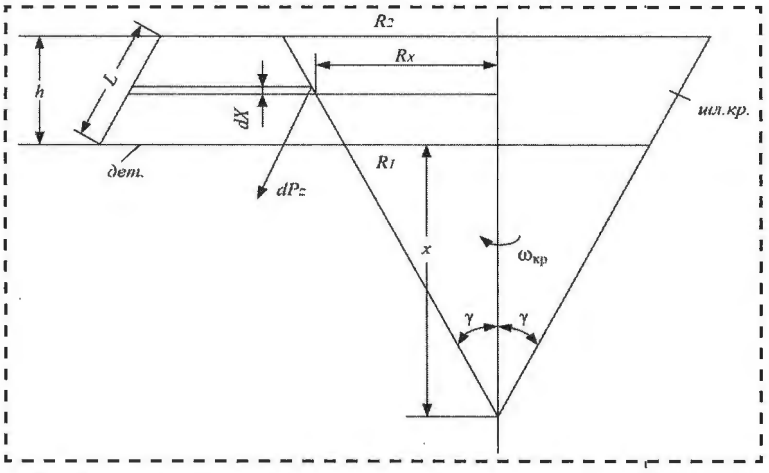

Рис. 4. Определение элементарной силы шлифования

Зная габариты абразивного круга и обрабатываемой детали, получаем:

$$P_z = 2 \cdot A \cdot (\sqrt{0,25 \cdot \mathrm{tg}\,25^\circ} - \sqrt{0,245 \cdot \mathrm{tg}\,25^\circ}) =$$

$$= 6,9 \cdot 10^{-3} A.$$

Режимы предварительного шлифования следующие:

угловая скорость круга — $\omega_{шл.\,кр} = 101$ рад/с;

глубина шлифования — $t = 2$ мм;

продольная подача — $S = 0,104$ мм/об.

В этом случае

$$A = 98 \cdot 10 \cdot 2^{0,6} \cdot 0,104^{0,65} \cdot (101 \cdot \mathrm{tg}\,25^\circ)^{Z_{P_z}} \times$$

$$\times \left(\frac{0,51}{\cos 25^\circ} \right) = 5477.$$

Тангенциальная составляющая силы резания P_z определяется как:

$$P_z = 6,9 \cdot 10^{-3} \cdot 5475 = 38 \text{ Н}.$$

При выполнении чистового технологического перехода:

$\omega_{шл.\,кр} = 121,2$ рад/с;

$t = 0,1$ мм;

$S = 0,207$ мм/об.

$$A = 98 \cdot 10 \cdot 0,1^{0,6} \cdot 0,207^{0,65} \cdot (121,2 \cdot \mathrm{tg}\,25^\circ)^{0,5} \times$$

$$\times \frac{1}{\cos 25^\circ} = 1290.$$

$$P_z = 6,9 \cdot 10^{-3} \cdot 1290 = 8,9 \text{ Н}.$$

Для нахождения эффективной мощности глубинного шлифования тангенциальная составляющая P_z необходима при прогнозировании производительности и качества обработки [2—5].

Эффективная мощность процесса глубинного шлифования поверхностей шлифования хвостовой части турбинной лопатки может быть определена по формуле:

$$N_{шл} = \frac{P_{Z_{кр}} \cdot \nu_{кр}}{102 \cdot 60},$$

где $P_{Z_{кр}} = 8,9$ Н; $\nu_{кр} = 28,9$ м/с.

$$N_{шл} = \frac{8,9 \cdot 28,9}{102 \cdot 60} = 0,04 \text{ кВт}.$$

Вышеуказанное значение мощности шлифования хвостовой части турбинной лопатки в два-три раза меньше мощности привода станка. Следовательно, можно сделать вывод о том, что малые энергетические затраты определяют высокую эффективность процесса обработки деталей глубинным шлифованием.

Список литературы

1. **Скрябин В.А., Жук А.П., Репин А.С.** Особенности, технологии обработки хвостовика лопаток турбокомпрессоров // Машиностроитель. 2006. № 7. С. 26—28.
2. **Коломеец В.В., Полутан Б.И.** Алмазные правящие ролики при врезном шлифовании деталей машин. Киев: Наук. думка, 1983. 144 с.
3. **Скрябин В.А., Жук А.П., Репин А.С.** Производительность процесса глубинного шлифования елочного профиля хвостовика лопаток турбокомпрессора дизеля // Технологическое обеспечение качества машин и приборов: сб. ст. III Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2006. С. 10—13.
4. **Скрябин В.А., Жук А.П., Ершов В.В.** Плоскошлифовальные полуавтоматы с ЧПУ для двухстороннего глубинного шлифования сложнопрофильных деталей // Техника машиностроения. 2002. № 4. С. 31—32.
5. **Скрябин В.А.** Влияние процесса глубинного шлифования елочного профиля хвостовика лопаток турбокомпрессора на качественные характеристики поверхностного слоя // Машиностроитель. 2008. № 10. С. 36—42.
6. **Рудской А.И., Баурова Н.И.** Технологическая наследственность при производстве и эксплуатации конструкционных материалов // Технология металлов. 2019. № 2. С. 2—10.
7. **Скрябин В.А.** Влияние процессов формования на структуру и свойства материалов // Технология металлов. 2019. № 4. С. 19—23.
8. **Скрябин В.А.** Исследование сил и напряжений при камерной обработке сложнопрофильных деталей незакрепленным шлифовальным материалом // Технология металлов. 2018. № 5. С. 15—21.