

УДК 621.92

## ШЛИФОВАНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ. КРАТКИЙ ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

© 2018 Д.Г. Федоров, Д.В. Евдокимов, А.А. Пластинин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 17.01.2018

В статье представлен краткий литературный обзор по шлифованию титановых сплавов. Анализируются такие параметры процесса, как силы шлифования, тепловые явления, состояние поверхностного слоя после обработки, структурно-фазовые превращения в материале и остаточные напряжения.  
*Ключевые слова:* плоское шлифование, круглое шлифование, шероховатость поверхности, температура в зоне резания, структурно-фазовые превращения, обработка титановых сплавов.

### ВВЕДЕНИЕ

Из-за необходимости в повышении надежности летательных аппаратов, актуально и повышение качества производства деталей и составных частей летательных аппаратов. Это неизбежно приводит к увеличению количества шлифовальных операций, характеризующихся высокой точностью и производительностью обработки.

Такое положение дел требует изучения процесса шлифования в различных направлениях совершенствования. Выделим и рассмотрим некоторые из них.

### ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И СТОЙКОСТЬ ШЛИФОВАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

В работах Гусева В.Г., Кулакова Ю.М., Харцбека К. и др. [4, 12, 33, 36 и др.], представлены результаты исследований данного типа. Исследование производительности обработки рассматривали Худобин Л.В., Синченко В.И. [22, 37] и многие другие.

Лурье Г.Б. [13], П.И. Ящерицына и А.Г. Зайцева [44], считали, что режущая работоспособность шлифовального круга, приведенная к силе резания, является самым адекватным показателем. Величина этого отклонения этого показателя от номинального значения не превышает 8,2%.

Коэффициент шлифования возрастает прямо пропорционально росту скорости круга, это описано в работах [12, 40].

Чем выше зернистость материала, из которого состоит круг, тем выше толщина снимае-

мого элементарного слоя и, как следствие, выше режущая способность инструмента [13].

Значительное влияние на стойкость и режущую способность круга оказывают их конструктивные особенности. Эти особенности описывают авторы работ [14, 39]. Автор источника [13] обобщил большое количество результатов экспериментов и делает следующие выводы: крупнозернистые круги меньше подвержены эффекту «засаливания», чем мелкозернистые; период стойкости кругов изготовленных из монокорунда в 1,5...2 раза выше периода стойкости кругов из электрокорунда; стойкость кругов снижается за счет уменьшения номера структуры; стойкость круга прямо пропорциональна высоте и диаметру.

Не считая выводов автора источника [13], автор работы [2] подчеркивает, что стойкость шлифовального круга зависит и от инструмента при помощи которого происходит правка шлифовального круга, (в приоритете рассматривается карандаша марки Ц-5).

### ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Значение сил резания при шлифовании освещалось в работах [11, 14, 18, 21, 34, 38], на основе проведенных экспериментов. Согласно работе [25] величина радиальной (нормальной) составляющей силы резания  $P_y$  в 1,5...3 раза больше главной (касательной) составляющей силы резания  $P_z$ . соотношение сил  $P_y/P_z$  характеризует затраты на полезную работу при обработке материалов. Согласно работе [25] можно сказать, что автор стремится к тому, чтобы уменьшить силу  $P_y$ , при росте силы  $P_z$ . При таких показателях соотношения сил резания можно заметить, что происходит повышение

---

*Федоров Дмитрий Геннадьевич, аспирант.*

*E-mail: dmitriy.fedorov@ssau.ru*

*Евдокимов Дмитрий Викторович, аспирант.*

*Александр Пластинин Алексеевич, студент.*

полезных затрат энергии на обработку и снижается работа для определения силы трения. При повышении скорости круга составляющие силы  $P_y$  и  $P_z$  уменьшаются, это утверждается в работах [18, 34].

Аналогичным образом на силы резания влияют и различные скорости движения заготовки в поперечном, продольном и вертикальном направлениях. По мнению большинства авторов, увеличение этих параметров прямо пропорционально влияет на рост составляющих сил резания. Так, например, это утверждается в работах [12, 14, 18, 21, 27, 34, 35, 38, 41,]. Бывают и исключения для определенных условий обработки. В работе [24] показано, что при росте сил резания точность обработки снижается.

Большинством авторов были сделаны выводы, что при росте твердости круга происходит и рост сил резания [12, 40]. Но при рассмотрении зернистости материала сложно установить строгую зависимость, так как большое влияние оказывают определенные условия обработки [12, 40].

#### ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЗАГОТОВКЕ И ИНСТРУМЕНТЕ

Именно анализу тепловых явлений при шлифовании большое внимание уделили в своих работах [3, 5, 13, 19, 23, 26, 30, 33] такие исследователи, как В.А. Барвинок, Д.Г. Евсеев, А.Н. Резников, В.А. Сипайлов, В.Н. Трусов и др.

Некоторые авторы [5, 23, 33] считают, что процессы теплообразования непосредственно влияют на формирование поверхностного слоя. Однако в работе [11] высказывается мнение, согласно которому основное влияние на остаточные напряжения оказывает не температурный, а силовой фактор. Интерес так же представляют расчеты нестационарных тепловых полей при различных видах шлифования [20, 23, 32].

Не меньший интерес представляют исследования в области структурно-фазового состояния материалов, методом метастабильных диаграмм. Однако эти диаграммы известны не для всех материалов, что существенно ограничивает их использование [5, 31].

Увеличение скорости круга приводит к повышению мощности тепловыделения [13, 23, 36, 42], что в свою очередь ведет к росту температуры.

Что касается скорости подачи заготовки, то тут существуют существенные разногласия о влиянии на температурные явления. По данным работы автора [13], происходит увеличение температуры в зоне резания при повышении скорости подачи заготовки. Авторы работ [17, 28, 38] придерживаются противоположного мнения.

Также на температуру в зоне резания влияет вид конструкции шлифовального инструмента.

Данное утверждение изучали авторы работ [26, 38, 42]. Исследования, на примере обработки жаропрочных и титановых сплавов, показали, что наблюдается значительное преимущество прерывистых и композиционных кругов над кругами со сплошной режущей поверхностью. При помощи таких кругов происходит снижение максимальной температуры в зоне резания в 1,3...1,4 раза в зависимости от режима, обрабатываемого материала и впадин на круге [26, 42].

Согласно работам [13, 42] при уменьшенной теплопроводности материала заготовки, повышается температура в зоне резания.

#### АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ОБРАБОТКИ

Качество поверхностного слоя зачастую является критерием качества обработки. По этой причине многие авторы посвящают свои исследования именно этому вопросу. Изучением качества поверхностного слоя при шлифовании занимались Резников А.Н., Барвинок В.А., Гусев В.Г., Евсеев Д.Г., Ипполитов Г.М., Кашук В.А., Королева Е.М., Кравченко Б.А., Орлов Е.А., Кулаков Ю.М., Лурье Г.Б., Маслов Е.Н., Петухов А.Н., Попов И.Г., Саютин И.Г., Сулима А.М., Урывский Ф.П., Филимонов Л.Н., Шальнов В.А., Шихторин Ю.Ф., Юнусов Ф.С., Якимов А.В., Ящерицин П.И., и др. [3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 29, 31, 35, 40, 41, 42, 43, 44 и др.].

Качество поверхностного слоя характеризуется различными параметрами, такими как шероховатость, структурно-фазовые превращения, остаточные напряжения. Рассмотрим каждый из них в отдельности.

**Шероховатость поверхности.** Большое количество работ обратили внимание на шероховатости поверхности на процессы, протекающие при обработке заготовок, и долговечности конечного изделия [6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 18, 29, 35, 40, 42, 43, 44]. Результаты этих работ позволяют довольно четко предугадать величину долговечности детали и ее эксплуатационные свойства.

Согласно работе [43], добиться уменьшения шероховатости поверхности при обработке шлифованием можно путем влияния на следующие параметры (расположены в порядке возрастания их степени влияния на шероховатость): выхаживание, правка круга, скорость шлифования, зернистость круга, режимы резания, материал связки, химический состав СОЖ.

Выхаживание, согласно работе [8], может проходить с различной скоростью. Оно может быть ускоренным, обычным и замедленным. При круглом внутреннем шлифовании используют обычное и замедленное выхаживание, а вот при круглом наружном и плоском шлифовании используют обычное и ускоренное. Соглас-

но источнику [44], есть оптимальное время выхаживания, при котором высота шероховатости заготовки наименьшая.

При шлифовании на разных режимах правки одного и того же круга, можно получить абсолютно различную шероховатость [13, 15, 35, 42]. Если рассматривать окружную скорость то авторы работ [13, 14, 35, 40, 43] сходятся во мнении, что при увеличении окружной скорости шероховатость уменьшается, но есть разногласия в степени ее уменьшения.

Согласно исследованиям [12, 14, 40, 44], шероховатость обрабатываемой заготовки уменьшается пропорционально снижению толщины снимаемого слоя, не зависимо от того, как режимный фактор вызвал это снижение. Без сомнений можно утверждать, что с уменьшением зернистости шлифовального круга снижается и шероховатость обрабатываемой поверхности, данное утверждение подтверждается работами [6, 7, 12, 18].

Еще один не маловажный фактор влияния на шероховатость является СОЖ. Согласно работе [7] при правильном подборе химического состава и очистке СОЖ высота микронеровностей может снизиться в 4 раза.

**Структурно-фазовые превращения в поверхностном слое.** По мнению автора работы [23], самым теплонпряженным процессом среди методов механической обработки материалов является шлифование. При обработке в таких условиях могут протекать структурно-фазовые преобразования в поверхностном слое [1, 16, 42]. Учитывая влияние этой проблемы многие исследователи такие как авторы работ [3, 4, 5, 12, 13, 14, 21, 31, 42], описывают структурно-фазовое состояние поверхности заготовки при шлифовании.

По мнению автора работы [14], на изменение структуры материала могут влиять совокупность некоторых факторов таких как: плохо выбранный инструмент с другими характеристиками, недостаток в охлаждении, завышенный режим, состояние режущей поверхности инструмента, не правильный выбор химического состава СОЖ и т.п.

С помощью работ [3, 5, 13, 31] можно сделать следующие выводы: для прогнозирования структурно-фазового состояния поверхности на операциях шлифования необходимо знать величину среднеконтактной температуры, скорости нагрева и охлаждения, а также необходимо наличие метастабильной диаграммы состояния обрабатываемого материала; при росте времени воздействия теплового источника на заготовку появляется эффект аккумуляции тепла в месте обработки; в зависимости от условий обработки шлифованием структурно-фазовое состояние поверхности, формируется по двум сценариям

– в первом, при интенсивной тепловой нагрузке в слое образуется аустенито-мартенсит вторичной закалки, под которым расположен вторично отпущенный тростито-мартенсит и тростит; во втором, что при понижении интенсивности воздействия теплового потока может наблюдаться вторично-отпущенный слой, плавно переходящий в основную структуру мартенсита закалки; чем выше интенсивность и время воздействия на заготовку теплом, тем глубже залегают структурно-фазовые изменения.

С повышением любого из режимных параметров возникает вероятность появления прижога [12, 14]. Рост твердости, повышает вероятность появления прижогов [12, 14]. Также согласно результатам работ [4, 42] можно увидеть, что использование комбинированных и композитных кругов уменьшает вероятность образования структурно-фазовых преобразований.

У кругов с крупным зерном меньше вероятность появления прижогов, нежели чем у кругов с мелким зерном [12], возможно, это объясняется большей теплонпряженностью при обработке кругами с мелкой зернистостью.

**Остаточные напряжения.** Остаточным напряжениям и их влиянию на заготовку посвятили свои работы следующие авторы [3, 5, 11, 13, 14, 16, 17, 18, 21, 29, 35, 40, 41, 42, 44]. Изучение проходило, как со стороны изучения формирования остаточных напряжений, так и со стороны влияния на работоспособность детали.

На формирование остаточных напряжений влияет три основных фактора описанных в работах [5, 25, 35, 44] – это силовой, тепловой и структурно-фазовый. По работам [11, 25], можно сказать, что при отсутствии структурно-фазовых превращений в материале основное влияние оказывает силовой фактор. Однако из-за высокой температуры снижается предел текучести материала, что приводит к повышенному воздействию силового фактора. Согласно работе [9], возникшие от силового фактора деформации при резании, выше на порядок деформаций температурного характера.

Несмотря на это некоторые авторы считают, что доминирующим фактором является тепловой [5, 13, 23, 18, 44].

Авторы работ [18, 35, 40] придерживаются мнения о том, что при шлифовальной обработке, растягивающие напряжения возникают за счет воздействия температурных факторов, а если возникают сжимающие остаточные напряжения, то эти напряжения считают сформированными под действием силового фактора.

В работах [3, 5, 11, 13, 14, 17, 21, 42, 44] происходило изучение остаточных напряжений при помощи экспериментов. При формировании остаточных напряжений, одним из наиболее влиятельных факторов, является скорость реза-

ния. Так считают авторы работ [13, 44].

Большая часть исследователей считает, что при увеличении скорости подачи заготовки снижается глубина залегания растягивающих остаточных напряжений [5, 13, 17, 44].

При росте глубины шлифования происходит повышение величины глубины залегания остаточных напряжений, поэтому глубина шлифования оказывает большое влияние на преобразования поверхностного слоя заготовки [5]. Так же оказывают влияние и другие составляющие подачи, к примеру продольная, в меньшей мере, что нельзя сказать о вертикальной, она подчиняется определенной закономерности, что и описано автором работы [10].

Авторы работы [10] считают наоборот, что СОЖ увеличивает остаточные напряжения и не влияет на их тип. Авторы работ [17, 42] описывают использование смазывающе-охлаждающих вставок в круге, что неплохо снижает величину растягивающих остаточных напряжений.

Также большую роль в формировании остаточных напряжений играет процесс выхаживания [10, 13, 44]. Автор работы [10] считает, что процесс выхаживания снижает величину сжимающих остаточных напряжений, а автор [44] считает, что снижает величину растягивающих. Так как процесс выхаживания влияет, как на силу, так и на теплонапряженность поверхностного слоя, при обработке шлифованием. Происходит небольшой съём материала, в котором при обработке были наведены остаточные напряжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов В.М.* Основы надежности газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1981. 207 с.
2. *Байкалов А.К.* Введение в теорию шлифования материалов. Киев: Наукова думка, 1978. 207 с.
3. *Барвинок В.А.* Исследование качества поверхности и тепловых явлений при алмазном и эльборовом шлифовании высокопрочных сталей: Дис. ... канд. техн. наук. Куйбышев, 1970. 153 с.
4. *Гусев В.Г., Петров В.П.* Интенсивное шлифование колец подшипников сборными абразивными кругами // Интенсификация технологических процессов механической обработки: Тез. докл. Секц. 5. Финишные методы обработки. Всесоюз. конф., окт. 1986 г. Л., 1986. С. 46-47.
5. *Евсеев Д.Г.* Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. 128 с.
6. *Ипполитов Г.М.* Абразивно-алмазная обработка. М.: Машиностроение, 1969. 334 с.
7. *Кацук В.А., Верецагин А.Б.* Справочник шлифовщика. М.: Машиностроение, 1988. 480 с.
8. *Королева Е.М.* Закономерности процесса круглого шлифования // Вестник машиностроения. 1998. № 11. С. 52-56.
9. *Кравченко Б.А., Кравченко А.Б.* Физические аспекты теории процесса резания металлов. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2002. 167 с.
10. *Кравченко Б.А., Митряев К.Ф.* Обработка и выносливость высокопрочных материалов. Куйбышев: Куйбышев. кн. изд-во, 1968. 132 с.
11. *Кравченко Б.А.* Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке: учебное пособие. Куйбышев: Куйбышев. политехн. ин-т, 1981. – 90 с.
12. *Кулаков Ю.М., Хрульков В.А., Дунин-Барковский И.В.* Предотвращение дефектов при шлифовании. М.: Машиностроение, 1975. 144 с.
13. *Лурье Г.Б.* Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1969. 172 с.
14. *Маслов Е.Н.* Теория шлифования металлов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
15. *Орлов, Е.А.* Краткий справочник металлиста [под ред. П.Н. Орлова, Е.А. Скороходова]. М.: Машиностроение, 1986. 960 с.
16. *Петухов А.Н.* Сопrotивление усталости деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1993. 240 с.
17. *Попов И.Г., Кононов В.К.* Качество поверхностного слоя стали 30ХГСНА после торцового шлифования прерывистым кругом // Высокоэффективные методы обработки резанием жаропрочных и титановых сплавов: Межвуз. сб. Куйбышев, 1982. С. 89-92.
18. *Резников А.Н.* Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник [под ред. А.Н. Резникова]. М.: Машиностроение, 1977. 391 с.
19. *Резников А.Н.* Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
20. Расчет температуры в зоне резания при шлифовании с учетом изменения микротвердости материала детали / *Э.В. Рыжов, Н.К. Беззубенко, И.А. Чуб, М.С. Шибер* // Сверхтвердые материалы. 1996. № 2. С. 52-55
21. *Саютин Г.И.* Выбор шлифовальных кругов. М.: Машиностроение, 1976. 64 с.
22. *Синченко В.И., Остапенко В.А., Темненко В.П.* Лабораторная оценка технологических свойств СОЖ для шлифования стали ШХ15 // Вестник машиностроения. 1978. № 6. С. 26-28.
23. *Сипайлов В.А.* Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978 – 167 с., ил.
24. *Сиротенко Л.Д., Ханов А.М., Муратов К.Р.* Моделирование процесса резания при финишной абразивной обработке плоскостей деталей // Спанки и инструмент. 2015. №4. С. 22-23.
25. *Скуратов Д.Л., Трусов В.Н.* Обработка конструкционных материалов. Процессы резания и режущие инструменты. Ч.1: учеб. пособие. Самара: изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. 196 с.
26. *Скуратов Д.Л., Трусов В.Н.* Обработка металлов шлифованием и методы ее интенсификации: Учебное пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 1997. 88 с.
27. *Сотникова К.Ф., Антонов Е.С.* Нормативы режимов резания на механическую обработку титановых сплавов. Книга 2. М.: НИАТ, 1980. 230 с.
28. *Старков В.К.* Термодинамика высокоскоростного шлифования без применения смазочно-охлаждающих средств // Вестник машиностроения. 2002. № 9. С. 50-55.
29. *Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д.* Поверх-

- ностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
30. Трусов В.Н. Теоретические основы круглого электроабразивного шлифования деталей ГТД и повышение его эффективности на основе применения кругов специальной конструкции: Дис ... док. техн. наук. Самара, 2001. 336 с. (ДСП).
  31. Урывский Ф.П. Влияние параметров термического цикла на формирование свойств поверхностного слоя при шлифовании титановых сплавов и закаленных сталей // Высокоэффективные методы механической обработки жаропрочных и титановых сплавов: Межвуз. сб. Куйбышев, 1981. С. 71-78.
  32. Урывский Ф.П., Барвинок В.А. Теоретический метод расчета температурных полей при шлифовании с охлаждением // Известия вузов. Сер. Машиностроение. 1971. № 1. С. 190-195.
  33. Урывский Ф.П., Маркушин Е.М., Баландин Г.П. К расчету температурных полей в изделии при шлифовании кругами со специальными вставками // Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов. Куйбышев, 1978. Вып.5. С. 60-65
  34. Урывский Ф.П., Солер Я.И. Исследование сил резания при торцовом шлифовании быстрорежущих сталей алмазными и боразоновыми кругами // Производительность, качество обработки и надежность в эксплуатации изделий из жаропрочных и титановых сплавов: Сб. ст. Куйбышев, 1970. Вып. 43. С. 22-28.
  35. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, 1979. 248 с.
  36. Харцбекер К., Старков В.К., Овчинников Д.С. Высокоскоростное шлифование закаленных сталей // Вестник машиностроения. 2002. № 9. С. 43-50.
  37. Худобин Л.В., Берзин В.Р. Повышение производительности внутреннего шлифования // Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментами из сверхтвердых синтетических материалов. Куйбышев, 1978. Вып. 1. С. 80-85.
  38. Худобин Л.В., Псигин Ю.В., Маценко П.К. Шероховатость поверхности после шлифования сборными комбинированными кругами // Вестник машиностроения. 1996. № 6. С. 32-35.
  39. ЦБПНТ. Общемашиностроительные нормативы режимов резания и времени для технического нормирования работ на шлифовальных станках. Серийное производство. М.: Машгиз, 1959. 196 с.
  40. Шальнов В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов. М.: Машиностроение, 1972. 272 с.
  41. Юнусов Ф.С. Формообразование сложнопольных поверхностей шлифованием. М.: Машиностроение, 1987. 248 с.
  42. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.
  43. Ящерицын П.И. Повышение эксплуатационных свойств шлифованных поверхностей. Минск: Наука и техника, 1966. 384 с.
  44. Ящерицын П.И., Зайцев А.Г. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента. Минск: Наука и техника, 1972. 480 с.

## GRINDING OF TITANIUM ALLOYS. A SHORT LITERARY REVIEW

© 2018 D.G. Fedorov, D.V. Evdokimov, A.A. Plastinin

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The article presents a brief literature review on the grinding of titanium alloys. Process parameters such as grinding forces, thermal phenomena, the state of the surface layer after treatment, structural-phase transformations in the material, and residual stresses were analyzed.

*Keywords:* flat grinding, round grinding, surface roughness, temperature in the cutting zone, structural-phase transformations, treatment of titanium alloys.