

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЗАГОТОВОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ АБРАЗИВНЫМИ ЛЕНТАМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Балякин А.В.^{*}, Скуратов Д.Л.^{**}

*Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королёва (Самарский университет),
Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия*

^{} e-mail: balaykinav@ssau.ru*

*^{**} e-mail: skuratov-sdl56@ya.ru*

Статья поступила в редакцию 06.07.2020

Представлена методика расчета, позволяющая определять температурные поля в зоне обработки при формообразовании заготовок на операциях ленточного шлифования абразивными лентами различных типов. Методика содержит аналитические зависимости для расчета температурных полей, а также формулы для определения теплофизических параметров, необходимых для осуществления расчетов. Приведены результаты численного эксперимента по расчету температурных полей, выполненного применительно к операциям ленточного шлифования заготовок из титановых сплавов ВТ9 и ВТ20 абразивными лентами различных типов. Использование методики дает возможность прогнозирования структурного и фазового состояния поверхностного слоя обрабатываемых заготовок на операциях ленточного шлифования при наличии метастабильных диаграмм состояния обрабатываемых материалов.

Ключевые слова: абразивное ленточное шлифование, титановые сплавы, лопатки компрессора, методика расчета температурного поля, результаты расчета.

Введение

Многие детали авиационных двигателей и авиаагрегатов работают при значительных знакопеременных нагрузках, что требует обеспечения их высокого качества изготовления и, как следствие, эксплуатационной надежности. Поэтому управление формированием поверхностного слоя деталей, который характеризуется такими параметрами, как шероховатость поверхности, остаточные напряжения, структурное и фазовое состояние, является актуальной задачей. Особенно это важно на финишных операциях деталей из титановых сплавов, в частности, на операциях ленточного шлифования. Как известно, с ростом среднетемпературной температуры от 500 °С и выше у титановых сплавов наблюдается интенсивный рост фазы [1].

В настоящее время титановые сплавы являются одними из важнейших конструкционных материалов, применяемых в различных отраслях промышленного производства [2, 3]. Высокая

прочность в сочетании с низкой плотностью (около 4,5 г/см³), хорошее сопротивление ползучести до 550 °С, биосовместимость [4] и отличная коррозионная стойкость [5] являются наиболее востребованными свойствами современных титановых сплавов. Особое место эти сплавы занимают при производстве изделий, в которых массе и высокому эксплуатационным характеристикам заказчиком придается ключевое значение. К таким изделиям в первую очередь следует отнести лопаточные машины (ГТД, ГТУ и т.д.), авиационные и космические летательные аппараты, суда различного назначения, медицинские протезы и т.п. Рабочая температура большинства титановых сплавов находится в пределах от 250 до 600 °С [6–9].

Использование технологических методов обеспечения качества продукции, в том числе за счет выбора оптимальной температуры в зоне обработки при ленточном шлифровании, позволяет минимизировать потери от брака и повысить надежность работы деталей в процессе их эксплуатации.

Следует отметить, что достижение требуемых параметров качества обработки возможно при условии полного понимания физической сущности явлений, происходящих при указанном ранее процессе, и наличии математической модели теплофизики процесса резания, а на её базе — методики расчета тепловых полей в зоне шлифования.

Абразивные ленты позволяют снизить теплонапряженность процесса обработки, при этом исключается необходимость балансировки инструмента, а в обработанных поверхностях формируются сжимающие остаточные напряжения. Процесс ленточного абразивного шлифования достаточно хорошо известен [10—17] и широко используется при формообразовании сложнопрофильных лопаток компрессора ГТД. Следует отметить, что эффективность данного процесса может быть существенно увеличена, например, за счёт применения лент с прерывистой режущей поверхностью: прерывистых, содержащих участки с абразивными зёрнами и без них; композиционных, содержащих участки с абразивными зёрнами и твердой смазкой, и комбинированных, содержащих участки с абразивными зёрнами, твердой смазкой и без абразивных зёрен [26].

Тепловые явления, сопровождающие процессы лезвийной и абразивной обработки, оказывают влияние как на протекание самого процесса, так и на качество изготовления деталей, а также на состояние режущего инструмента. Поэтому температура в зоне контакта режущего инструмента с обрабатываемой заготовкой не должна превышать критических значений, что достигается назначением рациональных условий обработки. В процессе шлифования эластичным абразивным инструментом наблюдается снижение интенсивности тепловых импульсов от воздействия зёрен, следовательно, плотность теплового потока и средняя контактная температура в зоне резания снижаются, т.е. значительно уменьшается вероятность появления шлифовочных прижогов и трещин [18—24]. Имеет место также увеличение площади пятна контакта инструмента с заготовкой по сравнению с обычным шлифованием, рост числа режущих зёрен и уменьшение их разновысотности, а следовательно, снижение шероховатости поверхности [18].

Процесс ленточного шлифования заготовок со сложным профилем, например заготовок лопаток компрессора ГТД [25], является одним из самых сложных с точки зрения моделирования теплофизических процессов в зоне обработки и прогнозирования средних контактных температур. Это

связано с изменением площади контакта абразивной ленты с перовой частью заготовки лопатки в процессе обработки, плотности теплового потока q в зоне контакта, а также с изменением в определенной мере теплофизических свойств материала поверхностного слоя заготовки. Кроме того, в процессе ленточного шлифования имеет место наложение температурных полей в точках изменения направления движения инструмента и т.д. Поэтому разработка методики расчета температурного поля в заготовке при ленточном шлифовании представляет как научный, так и практический интерес.

Методика расчета температурных полей и результаты численного эксперимента

Для расчета температурного поля на участках до, после и в зоне контакта абразивной ленты с обрабатываемой заготовкой были использованы аналитические зависимости, представленные в работе [26]. Эти зависимости позволяют выполнить расчет температуры на поверхности и по глубине поверхностного слоя при использовании различных типов лент, а именно: сплошных, абразивные зёрна у которых имеются на всей рабочей поверхности, прерывистых, композиционных и комбинированных, при различных режимах резания и интенсивности подачи смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зону обработки, т.е. подобрать оптимальные условия шлифования.

При ленточном шлифовании заготовок эффективная мощность, затрачиваемая на протекание процесса, по данным авторов работ [27, 28], примерно равна общей тепловой мощности, выделяющейся в зоне контакта ленты с заготовкой и распределяющейся в дальнейшем посредством различных тепловых потоков между заготовкой, абразивной лентой, стружкой и СОЖ. Эффективную (общую) тепловую мощность, являющуюся одним из важнейших исходных параметров при расчете пространственно-временного температурного поля в обрабатываемой заготовке, можно определить по формуле:

$$N_{\text{эф}} \approx N_Q = P_z v_{\text{л}}, \quad (1)$$

где N_Q — общая тепловая мощность, Вт; P_z — главная составляющая силы резания, Н; $v_{\text{л}}$ — рабочая скорость ленты, м/с.

Распределение общей тепловой мощности между тепловыми потоками, поступающими в заготовку, инструмент и стружку, определялось по методике, подробно изложенной в работе [28]. В

соответствии с результатами исследований, выполненных В.А. Сипайловым, доля тепловой мощности, поступающей в охлаждающую жидкость, из уравнения теплового баланса была исключена. Это обусловлено тем, что тепловая мощность, идущая в охлаждающую жидкость, поступает в нее главным образом не непосредственно из зоны контакта, а с обрабатываемой поверхности, находящейся вне зоны контакта ленты с заготовкой.

Знание мощности теплового потока, поступающего в обрабатываемую заготовку, необходимо для расчета его плотности. А плотность теплового потока является одной из основных физических величин, необходимых для определения приращения температуры поверхности в зоне контакта [28, 29] и расчета температурного поля в обрабатываемой заготовке. Плотность теплового потока, идущего в заготовку, определялась по следующей формуле:

$$q = \frac{N_{\text{эф}}}{F_{\text{к}}} k_{\text{Q}} = \frac{N_{\text{эф}}}{L_{\text{к}} \cdot B_{\text{л}}} k_{\text{Q}}, \quad (2)$$

где q — плотность теплового потока, Вт/м²; $N_{\text{эф}}$ — эффективная мощность, Вт; $F_{\text{к}}$ — площадь контакта ленты с заготовкой, м²; $L_{\text{к}}$ — длина дуги контакта шлифовальной ленты и заготовки, м; $B_{\text{л}}$ — ширина абразивной ленты, м; k_{Q} — коэффициент, показывающий, какая доля выделившейся при шлифовании тепловой мощности поступила в заготовку; средние значения коэффициента k_{Q} , например, при шлифовании спинки и корыта лопаток, выполненных из различных групп материалов, приведены в таблице.

При ленточном шлифовании пера лопаток для определения величин $L_{\text{к}}$ при обработке спинки и

Средние значения коэффициента при ленточном шлифовании спинки и корыта пера лопаток из различных материалов

Материал	Элементы поверхности лопатки	
	Спинка	Корыто
Стали коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные	0,860	0,900
Сплавы: жаростойкие и жаропрочные на никелевой основе; титановые	0,825	0,875
	0,835	0,885

корыта можно воспользоваться формулами для определения длин контакта для условий наружного и внутреннего шлифования, приведенными в работе [27]. Значение коэффициента теплоотдачи между шлифуемой поверхностью заготовки и смазывающе-охлаждающей жидкостью при ее турбулентном течении определялось по формуле, приведенной в работе [31]:

$$\alpha_{\text{СОЖ}} = 6 \cdot 10^4 \nu_{\text{СОЖ}}^{0,8}, \quad (3)$$

где $\nu_{\text{СОЖ}}$ — скорость потока смазывающе-охлаждающей жидкости, м/с.

При шлифовании конвективный теплообмен смазывающе-охлаждающей жидкости с поверхностью заготовки имеет место вне зоны контакта ленты с заготовкой и во время прохождения зоны контакта участками прерывистой и комбинированной лент, не содержащих абразивные зерна.

Значение коэффициента теплоотдачи обрабатываемой поверхности заготовки в зоне контакта, во время прохождения ее участками с твердой смазкой композиционной и комбинированной лент, определялось из соотношения:

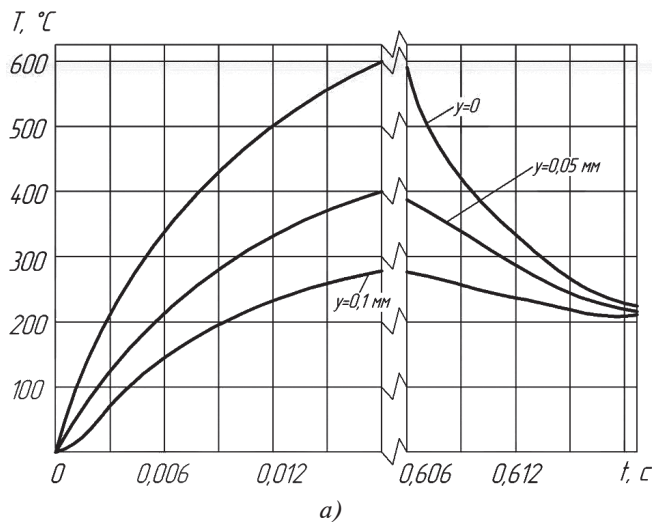
$$\alpha_{\text{ТС}} = \frac{2\varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi t_{\text{уч.тс}}}}. \quad (4)$$

Здесь

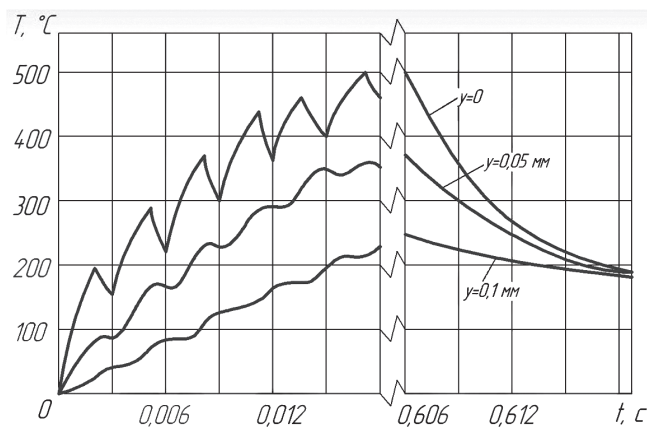
$$\varepsilon_i = \sqrt{\lambda_i c_i \rho_i},$$

где λ_i — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c_i — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ_i — плотность материала, кг/м³ (в формуле (4) индекс $i = 1$ применять для материала заготовки, $i = 2$ — для твердой смазки ленты).

На рис. 1 и 2 приведены результаты расчета температурных полей в лопатках, изготовленных из титановых сплавов ВТ20 и ВТ9. Как видно из рис. 1, при шлифовании лопатки входного направляющего аппарата (ВНА) ГТД из титанового сплава ВТ20 применение прерывистой ленты взамен сплошной позволяет снизить температуру в зоне контакта примерно на 17,5%, а использование при шлифовании лопатки компрессора низкого давления (КНД) ГТД из титанового сплава ВТ9 композиционной лентой взамен сплошной позволяет уменьшить среднеконтактную температуру на 38%, что видно из рис. 2. А если учесть, что рост β -фазы наблюдается при температурах, превышающих 500 °С, то применение в технологическом



а)



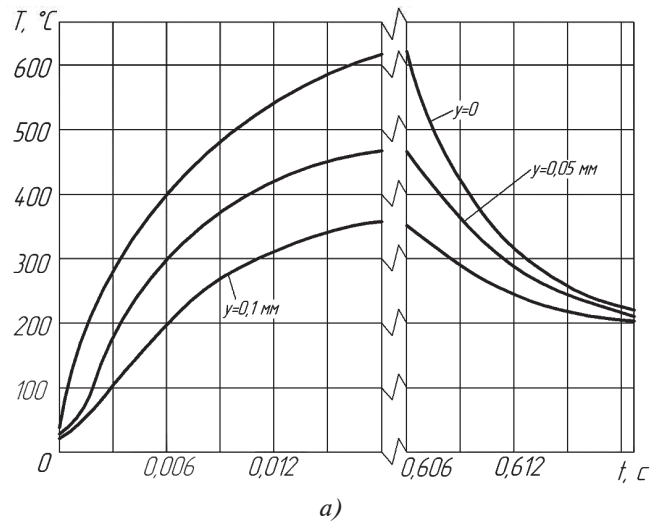
б)

Режим шлифования: $V_{л} = 15$ м/с; $S_{пр} = 2$ м/мин;
 $t = 0,03$ мм/ход

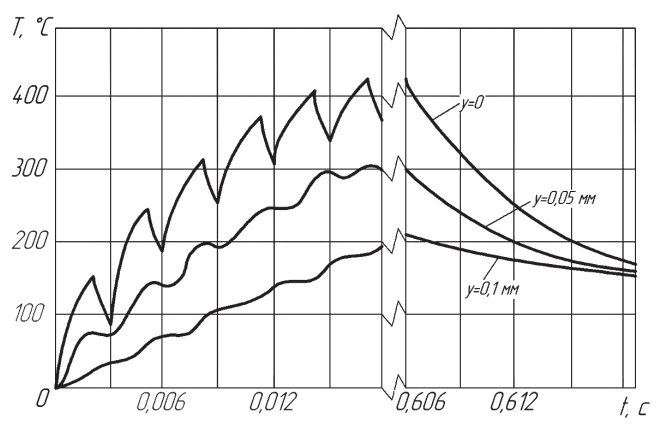
Рис. 1. Температурное поле в поверхностном слое спинки лопатки ВНА из титанового сплава BT20 при ленточном шлифовании сплошной лентой (а) и прерывистой лентой (б)

процессе композиционной ленты позволит существенно уменьшить вероятность появления шлифовочных прижогов.

Исследование показало, что расхождение в значениях среднетемпературной температуры, полученных аналитическим и экспериментальным путем, методом полусинтетической термопары, не превышает 10 %. Знание распределения температуры в поверхностном слое заготовки, скоростей нагрева и охлаждения и выдержки при высокой температуре позволяет сделать заключение о возможности структурно-фазовых изменений в поверхностном слое. При ленточном шлифовании, как и при обычном, необходимо использовать метастабильные диаграммы состояния материала, так как при скоростях нагрева, характерных для процесса ленточного шлифования, происходит образование метастабильных структур, положение



а)



б)

Режим шлифования: $V_{л} = 15$ м/с; $S_{пр} = 2$ м/мин;
 $t = 0,03$ мм/ход

Рис. 2. Температурное поле в поверхностном слое спинки лопатки КВД из титанового сплава BT9 при ленточном шлифовании сплошной лентой (а) и композиционной лентой (б)

критических точек у которых может существенно смещаться по сравнению с известными диаграммами равновесия. Метастабильные диаграммы состояния для некоторых материалов, используемых для изготовления лопаток, приведены в работах [30, 31].

Выводы

1. Разработана методика для расчета температурного поля в заготовках при шлифовании абразивными лентами различных типов: сплошными, прерывистыми, композиционными и комбинированными.

2. Рассчитаны температурные поля в заготовках лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов BT9 и BT20 абразивными лентами различных типов. На основе результатов численного эксперимента установлено, что использование при

шлифовании заготовок лопаток из титанового сплава VT20 прерывистой абразивной лентой взамен сплошной позволило снизить температуру в зоне резания на 17,5%, а применение при шлифовании заготовок лопаток из титанового сплава VT9 композиционной абразивной лентой обеспечило снижение температуры в зоне контакта на 38%.

Библиографический список

1. *Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Чибисова Е.В., Шмырова А.В.* Влияние химического состава и термической обработки на механические свойства поковок псевдо- β -титанового сплава // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 1. С. 190-201.
2. *Veiga C., Davim J.P., Loureiro A.* Properties and applications of titanium alloys: A brief review // Reviews on Advanced Materials Science. 2012. Vol. 32. No. 2, pp. 133-148.
3. *Makoto Y.* An overview on the development of titanium alloys for non-aerospace application in Japan // Materials Science and Engineering: A. 1996. Vol. 213. No. 1-2, pp. 8-15. DOI: 10.1016/0921-5093(96)10241-0
4. *Ureña J., Gordo E.R., Ruiz-Navas E., Vilaboa N., Saldaña L., Jiménez-Morales A.* Electrochemical comparative study on corrosion behavior of conventional and powder metallurgy titanium alloys in physiological conditions // Metal Powder Report. 2017. Vol. 72. No. 2, pp. 118-123. DOI: 10.1016/j.mprp.2016.04.003
5. *Skublova L., Skorik V., Mrazikova R., Hadzima B.* Corrosion resistance of Ti6Al4V titanium alloy with modified surfaces // Komunikacie. 2010. Vol. 12. No. 4, pp. 80-84.
6. *Gorynin I.V.* Titanium alloys for marine application // Materials Science and Engineering: A. 1999. Vol. 263. No. 2, pp. 112-116. DOI: 10.1016/S0921-5093(98)01180-0
7. *Moiseyev V.N.* Titanium Alloys. Russian Aircraft and Aerospace Applications. — Boca Raton: CRC Press, 2006. — 216 p.
8. *Zhang L.C., Chen L.Y., Wang L.* Surface Modification of Titanium and Titanium Alloys: Technologies, Developments, and Future Interests. Advanced Engineering Materials. 2020. Vol. 22. No. 5, 37 p. DOI: 10.1002/adem.201901258
9. *Leyens C., Peters M.* Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications. — Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2003. — 532 p.
10. *Братчиков А.Я., Звоновских В.В., Бабошкин А.Ф.* Ленточное глубинное шлифование — новый вид обработки. — Л.: ЛДНТП, 1989. — 20 с.
11. *Ваксер Д.Б.* Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании. — М.-Л.: Машиностроение, 1964. — 136 с.
12. *Зубарев Ю.М., Бабошкин А.Ф.* Современные технологии шлифования абразивными лентами // Высокие технологии в машиностроении «Интер-партнер-98»: Сб. науч. тр. Международной научно-технической конференции. — Харьков-Алушта: ХГПУ, 1998. С. 38-40.
13. *Митревич К.С.* Исследование процесса ленточного шлифования // Станки и инструмент. 1959. № 7. С. 12-14.
14. *Митревич К.С.* Силы резания при ленточном шлифовании // Станки и инструмент. 1960. № 4. С. 25-29.
15. *Юнусов Ф.С., Борисович Г.В.* Исследование параметров строчечной обработки сложных профильных поверхностей // Труды КАИ. 1971. Вып. 131. С. 39-40.
16. *Юнусов Ф.С.* Формообразование сложнопрофильных поверхностей шлифованием. — М.: Машиностроение, 1987. — 246 с.
17. *Юнусов Ф.С., Губайдуллин А.Ю., Дружинин А.М.* Повышение производительности ленточного шлифования // Вестник машиностроения. 1973. № 8. С. 70-71.
18. *Верезуб В.Н.* Шлифование абразивными лентами. — М.: Машиностроение, 1972. — 103 с.
19. *Грисенко Е.В., Судариков А.С., Кудашкин В.Н.* Исследование температуры и мощности при шлифовании высокохромистых сталей абразивными лентами со сплошной и прерывистой рабочей поверхностью // Управление качеством в механическом производстве: Сб. науч. тр. — Пермь, 1975. С. 56-59.
20. *Зубарев Ю.М., Сикалова М.А.* Расчет теплового потока при плоском шлифовании // Повышение производительности и качества обработки изделий электрофизическими и комбинированными методами: Сб. науч. тр. — СПб., 1992. — 59 с.
21. *Маталин А.А.* Исследование температуры шлифования стальных изделий // Качество поверхности и долговечность деталей машин: Сб. статей. — Л.: ЛИЗИ, 1956. С. 66-124.
22. *Цува Х., Накаяма Н.* Анализ контактных напряжений при шлифовании абразивной лентой // Режущий инструмент. 1970. № 39. С. 3-8.
23. *Якимов А.В.* Оптимизация процесса шлифования. — М.: Машиностроение, 1975. — 176 с.
24. *Волощенко А.В., Герасимов И.В., Олешко В.С., Ткаченко Д.П.* Контроль прижогов лопаток компрессоров газотурбинных двигателей прибором «Поверхность-11» // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 2. С. 101-105.
25. *Печенин В.А., Болотов М.А.* Модель анализа и классификации геометрии лопаток газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 2. С. 55-65.
26. *Скуратов Д.Л., Балякин А.В., Анкалимова Ю.Х.* Аналитическое решение задачи по расчёту температурного поля в обрабатываемых заготовках при ленточном шлифовании // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. Т. 21. № 1(87). С. 98-104.
27. *Маслов Е.Н.* Теория шлифования металлов. — М.: Машиностроение, 1974. — 320 с.

28. *Сипайлов В.А.* Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. — М.: Машиностроение, 1978. — 167 с.
29. *Якимов А.В.* Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. — М.: Машиностроение, 1984. — 312 с.
30. *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: КуАИ, 1981. С. 71-78.
31. *Скуратов Д.Л.* Разработка и совершенствование технологических методов и средств, обеспечивающих повышение качества и снижение трудоемкости изготовления деталей ГТД: Дисс. ... докт. техн. наук. — Самара: СГАУ, 2004. — 337 с.

CALCULATION RESULTS OF TEMPERATURE FIELDS WHILE GRINDING WORKPIECES FROM TITANIUM ALLOYS BY ABRASIVE BELTS OF VARIOUS TYPES

Balyakin A.V.* , Skuratov D.L.**

*Samara National Research University named after academician S.P. Korolev
(Samara University),*

34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia

** e-mail: balaykinav@ssau.ru*

*** e-mail: skuratov-sdl56@ya.ru*

Abstract

The article presents calculation technique, which allows defining temperature fields in the machining zone while workpieces shaping at the belt grinding operations by abrasive belts of various types, such as the ones:

- with the solid working area;
- intermittent, containing areas with abrasive grains and without them;
- composite, containing areas with abrasive grains, solid lubricant and without abrasive grains.

The technique includes analytical dependences for the temperature fields calculating, as well as equations for the thermo-physical parameters defining, which are necessary for these calculations, and a table with the values of the coefficient, determining what share of the thermal power, released while grinding, enters the workpiece while various groups of materials machining.

The article presents the results of numerical experiment on temperature fields calculation, performed relating to the belt grinding operations of gas turbine engine blades from VT9 and VT20 titanium alloys by abrasive belts of various types, namely, solid, intermittent and composite. It follows from the results of the experiment that at grinding the blades workpieces of the gas turbine engine inlet guide vane from the VT20 titanium alloy, application of

intermittent belt instead of the solid one allowed temperature reduction in the contact zone of about 17.5%. At the same time, composite belt application instead of the solid one while grinding blades of the low-pressure compressor of the gas turbine engine allowed average contact temperature reduction by 38%. It was found that, depending on the machining mode, application of abrasive belts with intermittent working surface, i.e. with the sections without grains, as well as ones without grains and with solid lubricant allowed significant reduction, or total elimination of the burn marks on the machined surfaces of the workpieces.

Application of the foregoing technique allows predicting both structural and phase states of the surface layer of the workpieces being machined while belt-grinding operations in the presence of the metastable phase diagrams of the materials being machined.

Keywords: abrasive belt grinding, titanium alloys, compressor blades, temperature field calculation technique, calculation results.

References

1. Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Chibisova E.V., Shmyrova A.V. The effect of chemical composition and heat treatment on mechanical properties of forgings

- from a pseudo- β -titanium alloy. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 190-201.
2. Veiga C., Davim J.P., Loureiro A. Properties and applications of titanium alloys: A brief review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2012, vol. 32, no. 2, pp. 133-148.
 3. Makoto Y. An overview on the development of titanium alloys for non-aerospace application in Japan. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, vol. 213, no. 1-2, pp. 8-15. DOI: 10.1016/0921-5093(96)10241-0
 4. Ureña J., Gordo E.R., Ruiz-Navas E., Vilaboa N., Saldaña L., Jiménez-Morales A. Electrochemical comparative study on corrosion behavior of conventional and powder metallurgy titanium alloys in physiological conditions. *Metal Powder Report*, 2017, vol. 72, no. 2, pp. 118-123. DOI: 10.1016/j.mprp.2016.04.003
 5. Skublova L., Skorik V., Mrazikova R., Hadzima B. Corrosion resistance of Ti_6Al_4V titanium alloy with modified surfaces. *Komunikacie*, 2010, vol. 12, no. 4, pp. 80-84.
 6. Gorynin I.V. Titanium alloys for marine application. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, vol. 263, no. 2, pp. 112-116. DOI: 10.1016/S0921-5093(98)01180-0
 7. Moiseyev V.N. *Titanium Alloys. Russian Aircraft and Aerospace Applications*. Boca Raton, CRC Press, 2006, 216 p.
 8. Zhang L.C., Chen L.Y., Wang L. Surface Modification of Titanium and Titanium Alloys: Technologies, Developments, and Future Interests. *Advanced Engineering Materials*, 2020, vol. 22, no. 5, 37 p. DOI: 10.1002/adem.201901258
 9. Leyens C., Peters M. *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2003, 532 p.
 10. Bratchikov A.Ya., Zvonovskikh V.V., Baboshkin A.F. *Lentochnoe glubinnoe shlifovanie - novyi vid obrabotki* (Tape creep grinding - a new type of machining), Leningrad, LDNTP, 1989, 20 p.
 11. Vakser D.B. *Puti povysheniya proizvoditel'nosti abrazivnogo instrumenta pri shlifovanii* (Ways to improve performance of abrasive tools in grinding), Moscow - Leningrad, Mashinostroenie, 1964, 136 p.
 12. Zubarev Yu.M., Baboshkin A.F. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Vysokie tekhnologii v mashinostroenii"*, Kharkov-Alushta, XGPU, 1998, pp. 38-40.
 13. Mitrevich K.S. *Stanki i instrument*, 1959, no. 7, pp. 12-14.
 14. Mitrevich K.S. *Stanki i instrument*, 1960, no. 4, pp. 25-29.
 15. Yunusov F.S., Borisovich G.V. *Trudy KAI*, 1971, no. 131, pp. 39-40.
 16. Yunusov F.S. *Formoobrazovanie slozhnoprofil'nykh poverkhnostei shlifovaniem* (Complex surfaces shaping by grinding), Moscow, Mashinostroenie, 1987, 246 p.
 17. Yunusov F.S., Gubaidullin A.Yu., Druzhinin A.M. *Vestnik mashinostroeniya*, 1973, no. 8, pp. 70-71.
 18. Verezub V.N. *Shlifovanie abrazivnymi lentami* (Grinding with abrasive belts), Moscow, Mashinostroenie, 1972, 103 p.
 19. Grisenko E.V., Sudarikov A.S., Kudashkin V.N. *Upravlenie kachestvom v mekhanicheskom proizvodstve, Sbornik statei*, Perm, 1975, pp. 56-59.
 20. Zubarev Yu.M., Sikalova M.A. *Povyshenie proizvoditel'nosti i kachestva obrabotki izdelii elektrofizicheskimi i kombinirovannymi metodami, Sbornik statei*, Saint Petersburg, 1992, 59 p.
 21. Matalin A.A. *Kachestvo poverkhnosti i dolgovechnost' detalei mashin, Sbornik statei*, Leningrad, LIZI, 1956, pp. 66-124.
 22. Tsuva X., Nakayama N. *Rezhushchii instrument*, 1970, no. 39, pp. 3-8.
 23. Yakimov A.V. *Optimizatsiya protsessa shlifovaniya* (Grinding process optimization), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 176 p.
 24. Voloschenko A.V., Gerasimov I.V., Oleshko V.S., Tkachenko D.P. The burns-control of compressor blade of gas turbine engine of device "Surface-11". *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 101-105.
 25. Pechenin V.A., Bolotov M.A. Analysis model and classification of the geometry of gas turbine engine blades. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 55-65.
 26. Skuratov D.L., Balyakin A.V., Apkalimova Yu.Kh. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2019, vol. 21, no. 1(87), pp. 98-104.
 27. Maslov E.N. *Teoriya shlifovaniya metallov* (Theory of metal grinding), Moscow, Mashinostroenie, 1974, 320 p.
 28. Sipailov V.A. *Teplovye protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti* (Thermal processes in grinding and surface quality management), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 167 p.
 29. Yakimov A.V. *Abrazivno-almaznaya obrabotka fazonnykh poverkhnostei* (Abrasive-diamond machining of profiled surfaces), Moscow, Mashinostroenie, 1984, 312 p.
 30. Uryvskii F.P. *Vysokoeffektivnye metody mekhanicheskoi obrabotki zharoprochnykh i titanovykh splavov, Sbornik statei*, Kuibyshev, KuAI, 1981, pp. 71-78.
 31. Skuratov D.L. *Razrabotka i sovershenstvovanie tekhnologicheskikh metodov i sredstv, obespechivayushchikh povyshenie kachestva i snizhenie trudoemkosti izgotovleniya detalei GTD* (Development and improvement of technological methods and tools that improve the quality and reduce the complexity of manufacturing parts of the gas turbine engine), Doctoral thesis. Samara, SGAU, 2004, 337 p.