

УДК 621.923.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

© 2015 Д. Г. Фёдоров, Д. Л. Скуратов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Исследования параметров качества обработки металлов и их прогнозирование являются на сегодняшний день актуальной задачей. Ведётся разработка математических моделей, конечно-элементных моделей и эмпирических зависимостей. Все они требуют практической проверки. В статье представлены результаты экспериментальных исследований параметров качества и характеристик обработки шлифованием образцов из титанового сплава ВТ6, широко применяемого в авиационной промышленности. Обработка велась на плоскошлифовальном станке модели ЗД711ВФ11 кругом из карбида кремния зелёного на керамической связке. В ходе проведения работы производились замеры составляющих силы резания, шероховатости поверхности до и после обработки образцов, а также остаточных напряжений. Все измерения проводились на одних и тех же образцах, которые последовательно обрабатывались с измерением вышеуказанных параметров. Ввиду этого можно проследить все преобразования, проходящие в образцах. В качестве силоизмерительной установки использовался динамометр, изготовленный совместно с кафедрой технологий машиностроения Самарского государственного технического университета (СамГТУ). Результаты исследования могут послужить данными для проверки адекватности создаваемых математических моделей, дать представление о некоторых процессах, протекающих при обработке шлифованием плоских заготовок из титановых сплавов.

Плоское шлифование периферией круга, силы резания, остаточные напряжения, шероховатость поверхности.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-400-408

Механическая обработка материалов по своей производительности, техническим возможностям, экономичности, качеству и точности изготавливаемых деталей в настоящее время преобладает над другими методами обработки. Шлифование является одним из методов механической обработки, обеспечивает высокую точность (5-8 квалитет) и небольшую шероховатость поверхности ($Ra = 0,16...1,25$ мкм). При этом данный процесс обладает также достаточно высокой производительностью, что в совокупности обусловило широкое распространение операций шлифования при изготовлении ответственных деталей, в том числе деталей, входящих в состав двигателей летательных аппаратов. Зачастую шлифование является финишной операцией в технологическом процессе, а это означает, что дефекты, возникшие при обработке, не будут устранены и будут оказывать негативное влияние на работоспособность детали в составе двигателя.

Титановые сплавы получили широкое распространение в авиационной промышленности благодаря своим уникальным свойствам. Именно по этой причине для проведения исследований был выбран титановый сплав ВТ6.

При выполнении работ проводился комплекс экспериментов, таких как:

- шлифование образцов из титанового сплава ВТ6 с измерением исходной шероховатости поверхности образцов, шероховатости поверхности после обработки, сил резания;
- измерение остаточных напряжений в обработанных образцах по методу Давиденкова.

Оборудование, инструмент, образцы, средства измерения

Образцы. Геометрия образцов представлена на рис. 1. Такие характеристики, как длина, ширина и высота образцов обозначены соответственно l , B и H . Номинальные значения этих величин с допус-

ками на изготовление приведены в скобках. Образцы изготавливались фрезерованием из титанового сплава марки ВТ6. Химический состав, а также теплофизиче-

ские и механические характеристики сплава ВТ6 представлены в табл. 1, 2 [1].

На торце каждого образца электрокарандашом маркировался его порядковый номер.

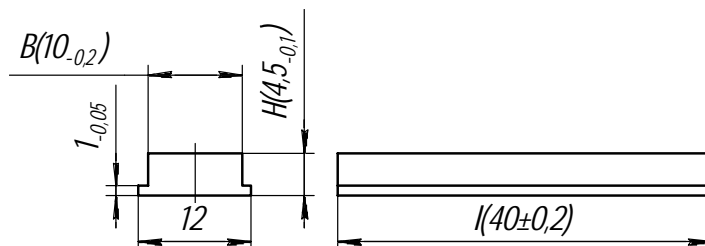


Рис. 1. Образцы, применённые при проведении исследований

Таблица 1. Химический состав титанового сплава ВТ6 (в процентах)

Ti	Al	V	C	Fe	Si	O ₂	N ₂	H ₂	Прочие примеси
			не более						
основа	5,5-7,0	4,2-6,0	0,1	0,3	0,15	0,2	0,05	0,015	0,3
Примечание. Допускается содержание $\leq 2\%$ Zr									

Таблица 2. Теплофизические и механические свойства титанового сплава ВТ6

σ_{θ} , МПа	δ_5 , %	Ψ , %	λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	C , $\frac{\text{кДж}}{\text{гК} \cdot \text{К}}$
	не менее			
20 °С	20 °С	20 °С	600 °С	600 °С
850-1100	10	30	15,49	883

Инструмент. Для проведения обработки в качестве инструмента применялся шлифовальный круг плоского прямого профиля (1А1) наружным диаметром 300 мм, высотой 40 мм и посадочным отверстием 76 мм. Круг был выполнен из карбида кремния зелёного (64С), имел средний размер зёрен 260 мкм (F60), характеристику твёрдости, соответствующую среднемягкой (СМ2), среднюю структуру, соответствующую 7, и имел керамическую связку, т.е. имел характеристику 1А1 300×40×76 63С F60 L 7 V.

Выбор обусловлен тем, что круги на основе карбида кремния зелёного часто используются при обработке титановых сплавов.

Обработка образцов выполнялась на плоскошлифовальном станке модели 3Д711ВФ11 с цифровым пультом управления. Все рабочие перемещения станка автоматизированы. Станок характеризует-

ся высокой жёсткостью и виброустойчивостью, что гарантирует стабильную точность и чистоту обработки. Применение в узлах подачи шариковинтовых пар качения обеспечивает плавное высокоточное безлюфтовое позиционирование.

Динамометрическое устройство для измерения сил резания изготовлено на основе патента RU 2011113074 «Устройство для триботехнических испытаний материалов» [2], из которого за основу были взяты силоизмерительная и электронная части устройства.

Схема устройства представлена на рис. 2. Устройство представляет собой «плечо» 1, изготовленное из пружинной стали (рис.3), на котором закреплялось зажимное устройство 2 с установленным образцом 3. Плечо устанавливалось в плиту 4 и поджималось винтами 5. В свою очередь, плита 4 притягивалась к магнитной плите, установленной на столе станка.

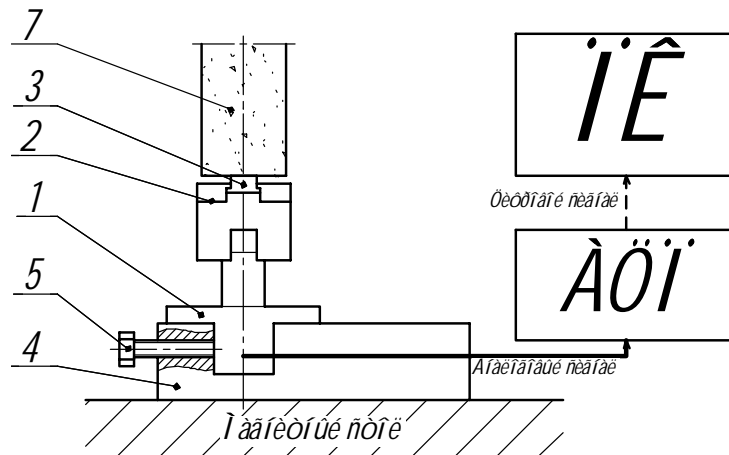


Рис. 2. Схема устройства для определения сил при шлифовании

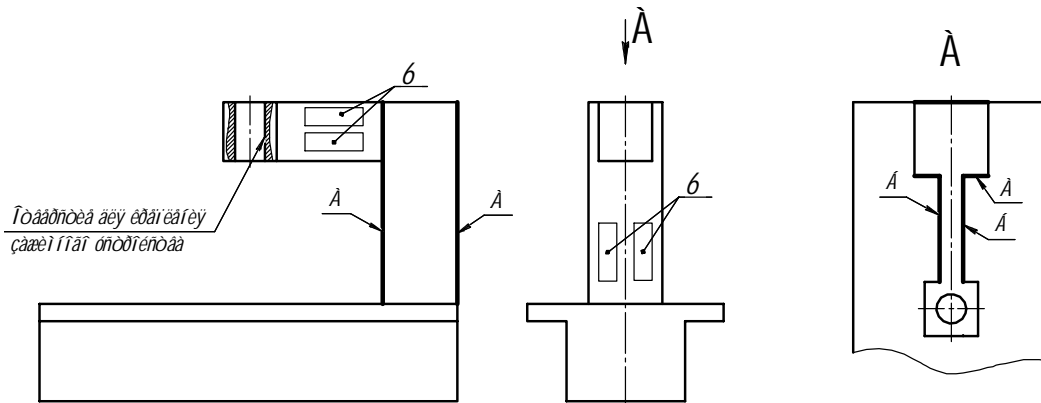


Рис. 3. Конструктивное исполнение детали «плечо»

Тензорезисторы б для измерения силы P_y приклеены к поверхностям А и Б для измерения силы P_z . Под действием шлифовального круга 7 «плечо» 1 упруго деформируется, сжимая одни и растягивая

другие тензорезисторы, вызывая тем самым изменение токов в цепи, пропорциональное действующим силам. Электрическая схема прибора представлена на рис.4.

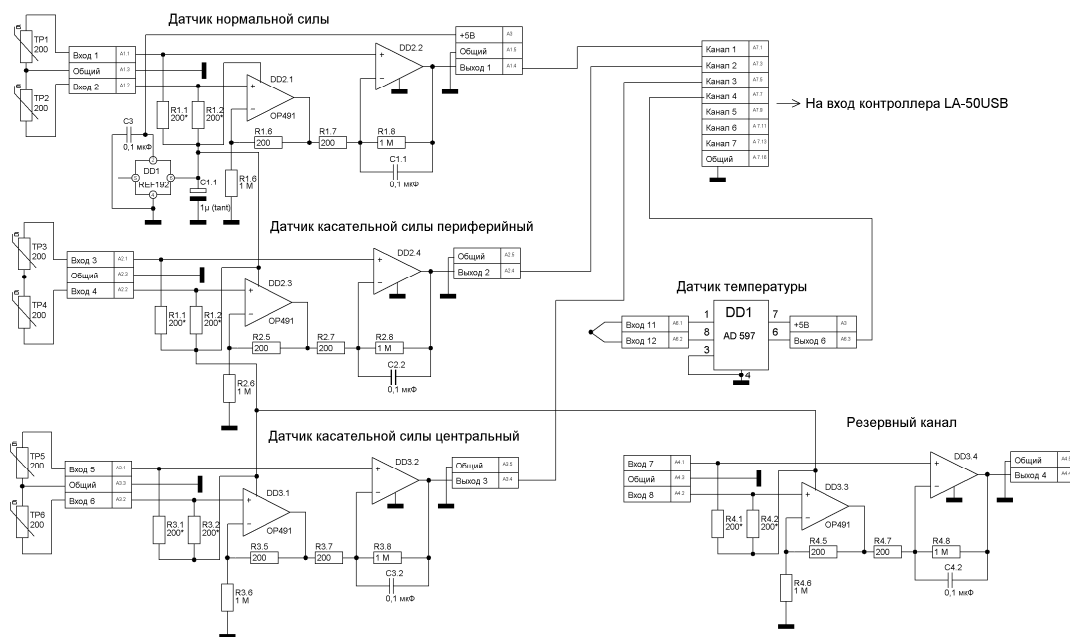


Рис. 4. Электрическая схема устройства

Электрическая схема прибора, согласно патенту RU 2011113074, допускает использование трёх основных датчиков измерения сил, одного резервного канала и датчика измерения температур. В соответствии с планом эксперимента каждый образец шлифовался на всю ширину поверхности без поперечной подачи, вследствие чего использование датчика измерения поперечных сил было нецелесообразно. Использование датчика измерения температур хотя и возможно, но в данных исследованиях измерения температуры не производилось. Аналоговый сигнал с вышеописанной электрической цепи поступает в аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) L-Card E14-140M, далее цифровой сигнал передаётся на персональный компьютер (ПК) в программную среду PowerGraph 3.3 Professional, который строит график изменения сил от времени. Частота сбора данных 200 Гц.

Автоматизированная система АСБ-1 использовалась для измерения остаточных напряжений в образцах по методу Давиденкова [3]. Система АСБ-1 предназначена для определения остаточных напряжений в образцах сложной формы в процессе химического или электрохимического травления под управлением программного обеспечения.

Автоматизированная система состоит из комплекта оборудования и приспособлений: персонального компьютера с управляющей программой и сетевым адаптером, образующим сеть с интерфейсом RS-485, рабочего места. Рабочее место включает в себя источник бесперебойного питания, источник питания постоянного тока Б5-47 и прибор АСБ-1 в составе: стойки измерительной, измерительного модуля и модуля привода.

Функционирование автоматизированной системы основано на принципе измерения перемещения консольно закреплённого образца в процессе электрохимического травления. Датчик фиксирует перемещение образца, после чего сигналы с датчика преобразуются в измерительном модуле (АЦП) и поступают на обработку

в управляющую программу. Результаты обработки информации поступают на экран дисплея в виде графиков.

Профилограф-профилометр модели БВ-7669М использовался для измерения шероховатости поверхности. Он предназначен для измерений параметров профиля и параметров шероховатости поверхности по системе средней линии (ГОСТ 25142-82) с разделением «волнистости» и «шероховатости». Прибор внесён в Государственный реестр средств измерения, регистрационный номер 33319-06.

Длина измеряемого участка – 10 мм. Длина образца – 40 мм. Для повышения точности измерения производились в двух зонах образца – вблизи левого и правого краёв. Измерения с каждого края производились дважды, затем осреднялись. Максимальный разброс результатов в пределах одного образца 0,063 мкм – до проведения обработки и 0,042 мкм – после обработки.

Прочие измерительные инструменты и вспомогательные приспособления:

- штангенциркуль ШЦ-I-0-135-0,1-2 ГОСТ 166-89;
- микрометр МК25-2 ГОСТ 6507-90

Методика проведения экспериментов. Натурный эксперимент проводился в два основных этапа, на которых измерялись составляющие силы резания и остаточные напряжения, а также выполнялись измерения шероховатости поверхности образцов до и после проведения обработки. Образцы шлифовались на всю ширину, равную 10 мм, вследствие чего варьирование поперечной подачей не производилось. Величина снимаемого слоя с заготовки по лимбу станка была заложена равной 0,15 мм.

Для повышения точности измерений и уменьшения влияния случайных погрешностей на каждом из режимов обрабатывалось по два образца. В табл. 3 приведены режимы, на которых выполнялась обработка образцов.

Таблица 3. Режимы обработки образцов

№ режима	$V_{заг}$, м/мин	S_t , мм/ход
1	16,1	0,015
2	16,1	0,010
3	16,1	0,005
4	11,04	0,015
5	11,04	0,010
6	11,04	0,005
7	5,52	0,015
8	5,52	0,010
9	5,52	0,005

На первом этапе эксперимента образцы закреплялись в силоизмерительной установке (динамометре), располагающейся на магнитном столе станка 3Д711ВФ11 для их последующей обработки. Перед проведением шлифования измерялась шероховатость образца.

При проведении обработки образца производилось измерение сил резания. Полученные данные в виде электронных графиков сохранялись на жёстком диске компьютера, после чего производилась их обработка и анализ.

Затем измерялась шероховатость поверхности обработанных образцов.

На втором этапе образцы подвергались измерению остаточных напряжений.

Данные, полученные в ходе исследования, были обработаны, проанализированы и представлены ниже.

Шероховатости поверхности. Данные результатов измерений сведены в табл. 4.

Таблица 4. Шероховатость поверхности образцов

№ режима	Ra , мкм		ΔRa , мкм
	до обработки	после обработки	
1	0,300	0,210	0,090
2	0,294	0,191	0,104
3	0,272	0,198	0,074
4	0,380	0,213	0,168
5	0,548	0,234	0,315
6	0,264	0,175	0,089
7	0,232	0,227	0,005
8	0,292	0,217	0,076
9	0,282	0,216	0,066

Шероховатость поверхности всех обработанных образцов лежит в пределах $Ra = 0,175...0,234$ и практически не зависит от исходной шероховатости.

Составляющие силы резания. В

процессе проведения обработки все данные по каждому из образцов сохранялись в виде графиков зависимости составляющих P_y и P_z силы резания от времени. Также возможен вывод данных в табличном виде. В табл. 5 представлены результаты измерений величины составляющих силы резания у образца на режиме 1 ($V_{кр} = 35$ м/с, $V_{заг} = 16,1$ м/мин, $S_t = 0,015$ мм/ход. Снимаемый припуск равен 0,15 мм). В аналогичном виде получены таблицы для каждого из образцов.

Как видно из табл. 5, с увеличением количества проходов составляющие силы резания возрастают и лишь на 7-11 проходах стабилизируются (выделены в таблице). Это обусловлено тем, что на первых проходах происходит выборка люфтов и зазоров в технологической системе. Когда в системе создаётся натяг, то колебания составляющих P_y и P_z силы резания уменьшаются, хотя и имеется некоторый разброс в пределах 4,18 кг (или 11%) для силы P_y и 3,22 кг (18%) для силы P_z . При выхаживании обе составляющие силы резания резко уменьшаются.

Значения максимальных и средних значений сил резания сведены в табл. 6.

Таблица 5. Силы резания при обработке образца на режиме №1

	№ прохода	P_y , кг	P_z , кг
	1	10,30	5,03
Обработка	2	16,95	10,17
	3	21,49	10,37
	4	25,58	13,04
	5	28,72	13,36
	6	31,06	14,43
	7	34,98	14,45
	8	35,00	15,86
	9	38,65	15,88
	10	37,97	17,02
	11	34,47	13,80
	Выхаживание	12	25,31
13		23,42	9,64
14		18,95	9,27
15		17,77	8,03
16		11,97	6,38
17		14,63	6,33
18		9,58	5,23
19		11,72	5,16
20		6,38	3,47

Таблица 6. Составляющие силы резания и их соотношение

№ п/п	$V_{заг}$, м/мин	S_t , мм/ход	P_y^{max} , кг	P_z^{max} , кг	$\frac{P_y^{max}}{P_z^{max}}$	P_y^{cp} , кг	P_z^{cp} , кг	$\frac{P_y^{cp}}{P_z^{cp}}$
1	16,1	0,015	38,65	17,02	2,27	34,51	15,02	2,30
2		0,01	30,45	13,79	2,21	26,74	12,74	2,10
3		0,005	19,26	9,21	2,09	16,33	8,70	1,88
4	11,04	0,015	18,89	8,71	2,17	14,57	6,95	2,10
5		0,01	13,84	7,14	1,94	11,93	6,12	1,95
6		0,005	10,44	5,68	1,84	7,68	4,67	1,65
7	5,52	0,015	11,33	5,98	1,89	8,80	4,86	1,81
8		0,01	10,09	4,87	2,07	6,38	3,95	1,61
9		0,005	5,87	3,83	1,53	3,79	2,75	1,38

Согласно мнению, изложенному в работе [4], соотношение сил P_y/P_z качественно характеризует процесс шлифования. Чем меньше это соотношение, тем большая часть энергии уходит непосредственно на разрушение межатомарных

связей в материале заготовки, т.е на съём материала, а не на преодоление силы трения и, как следствие, нагрев.

На рис. 4. представлены графики зависимости сил P_y и P_z от режимов резания.

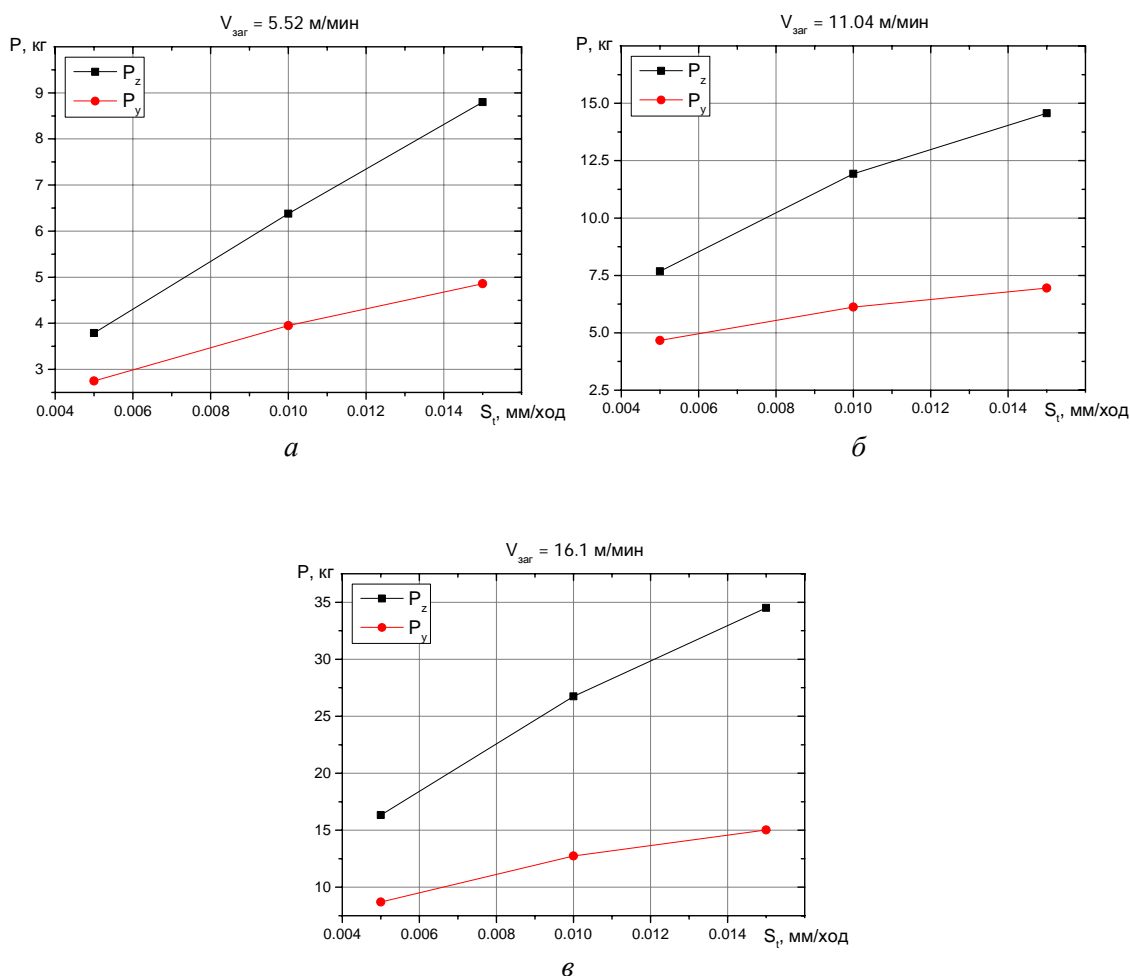


Рис. 4 Зависимость составляющих силы резания от режимов обработки:
 а – $V_{кр} = 35$ м/с, $V_{заг} = 5,5$ м/мин; б – $V_{кр} = 35$ м/с, $V_{заг} = 11,04$ м/мин;
 в – $V_{кр} = 35$ м/с, $V_{заг} = 16,1$ м/мин

Остаточные напряжения. После измерения остаточных напряжений (ОН) окно программы предоставляло график в виде, представленном на рис. 5. С этого графика снимались следующие значения,

характеризующие залегание ОН: максимальное значение ОН, глубина залегания максимальных ОН и общая глубина залегания ОН. Результаты измерений представлены в табл. 7.

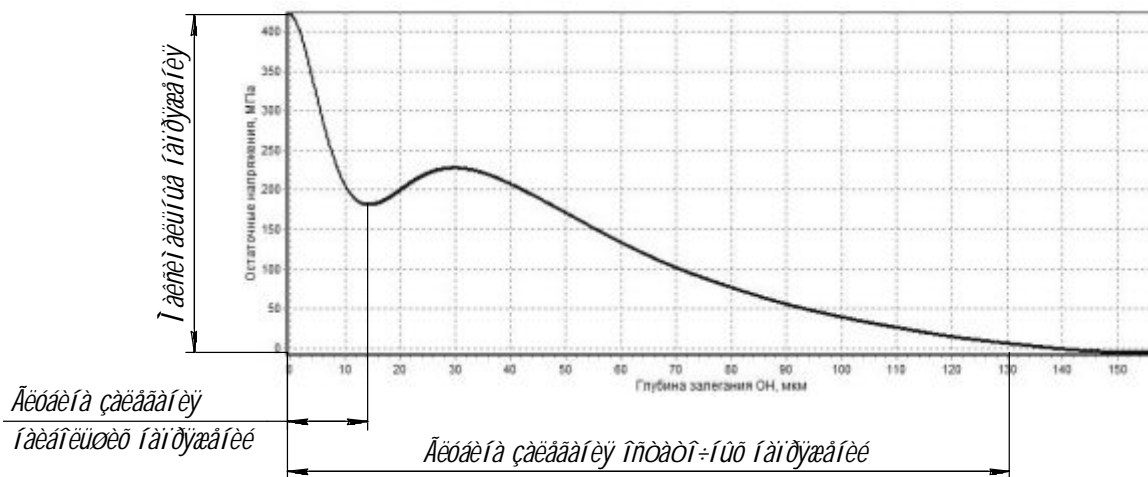


Рис. 5. Типовой график распределения ОН в образце

Таблица 7. Распределение остаточных напряжений

№ п/п	Макс. знач. ОН, МПа	Глубина залегания максимальных ОН, мкм	Глубина залегания ОН, мкм
1	617	17,5	170
2	425	17,5	137
3	400	15	120
4	470	17	152
5	495	16	142
6	405	20	135
7	340	25	157
8	550	20	172
9	370	19	155

Заклучение

На основании проведённых исследований установлено, что с увеличением скорости движения заготовки V_3 с 5,52 м/мин до 16,1 м/мин и подаче на глубину S_f с 0,005 мм/ход до 0,015 мм/ход главная составляющая силы резания P_z увеличивается в 2...3,1 раза, а радиальная составляющая силы резания P_y – в 3,9...4,3 раза. При этом величина растягивающих остаточных напряжений ($\sigma_\tau - \mu\sigma_0$) возрастает в 1,1...1,8 раза, а шероховатость остаётся практически неизменной.

Авторы выражают глубокую благодарность доктору технических наук, профессору И.Д. Ибатуллину за предоставленную установку определения составляющих силы резания, а также сотрудникам кафедр механической обработки материалов СГАУ и технологии машиностроения СамГТУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010 г. (шифр темы 2013-218-04-4777) и Министерства образования и науки РФ.

Библиографический список

1. Альтман М.Б., Глазунов С.Г., Кишкина С.И. Авиационные материалы. Справочник в девяти томах. Т. 5. М.: ОНТИ, 1973. 583 с.
2. Ненашев М.В., Калашников В.В., Деморецкий Д.А., Ибатуллин И.Д., Нечев И.В., Журавлев А.Н., Мурзин А.Ю., Ганигин С.Ю., Якунин К.П., Кобякина О.А., Чеботаев А.А., Утянкин А.В., Шашкина Т.А., Неяглова Р.Р., Трофимова Е.А., Галлямов А.Х. Устройство для триботехнических испытаний материалов: патент РФ № 2011113074; опубл. 10.10.2012; бюл. № 28.
3. Букатый С.А. Прогнозирование коробления деталей ГТД после обработки поверхности на основе исследования остаточного напряжённого состояния материала: дисс. ... д-ра. техн. наук. Рыбинск, 1996. 265 с.
4. Кравченко Б.А., Кравченко А.Б. Физические аспекты теории процесса резания металлов. Самара: Самарский государственный технический университет, 2002. 167 с.

Информация об авторах

Фёдоров Дмитрий Геннадьевич, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fedorovdmytry@gmail.ru. Область научных интересов: исследование теплофизических процессов, протекающих в материале при его обработке шлифованием.

Скуратов Дмитрий Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий производства двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: skuratov@ssau.ru. Область научных интересов: исследование теплофизических процессов при механической обработке материалов.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE SURFACE LAYER QUALITY AND CUTTING FORCES IN FLAT GRINDING OF THE BT6 TITANIUM ALLOY

© 2015 D. G. Fedorov, D. L. Skuratov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

A set of mathematical models, finite-element models and empirical dependences is being developed. All of them require practical testing. The article presents the results of experimental research of the quality and characteristics of grinding specimens made of the BT6 titanium alloy widely used in aerospace industry. Machining was conducted on a modern surface grinding machine, model 3D711VF11 by a ceramically bonded silicon carbide disk. The operation components of the cutting force, surface roughness (before and after machining of the specimens), as well as residual stresses were measured in the course of operation. All measurements were performed with the same specimens that were sequentially machined with the measurement of the earlier described parameters. In view of this, it is possible to trace all the transformations that take place inside the specimens. A force gage made jointly with the Department of Mechanical Engineering of SamGTU (Samara State Technical University) was used as a force-measuring system. The results of the research can be used to verify the adequacy of the mathematical models created and provide an insight into some processes occurring in surface grinding of flat titanium alloy blanks.

Surface grinding with the periphery of a straight wheel, cutting force, residual stresses, surface roughness.

References

1. Altman M.B., Glazunov S.G., Kishkina S.I. *Aviatsionnye materialy. T. 5* [Aircraft materials. Reference book in 9 volumes.V. 5]. Moscow: ONTI Publ., 1973. 583 p.
2. Nenashev M.V., Kalashnikov V.V., Demoretskiy D.A., Ibatullin I.D., Nechaev I.V., Zhuravlev A.N., Murzin A.Yu., Ganigin S.Yu., Yakunin K.P., Kobyakina O.A., Chebo-taev A.A., Utyankin A.V., Shashkina T.A., Neyaglova R.R., Trofimova E.A., Gallyamov A.Kh. *Ustroystvo dlya tribotekhnicheskikh ispytaniy materialov* [Device for tribotechnical tests of materials]. Patent RF, no. 2011113074, 2012. (Published 10.10.2012, bulletin no. 28).
3. Bukatyy S.A. *Prognozirovanie korobleniya detaley GTD posle obrabotki poverkhnosti na osnove issledovaniya ostatochnogo napryazhennogo sostoyaniya materiala* Dis. dokt. tekhn. nauk. [Predicting warpage of gas turbine engine components after surface treatment based on the research of the residual stress state of the material. Doctoral thesis in Engineering Science]. Rybinsk, 1996. 265 p.
4. Kravchenko B.A., Kravchenko A.B. *Fizicheskie aspekty teorii protsessa rezaniya metallov* [Physical aspects of the theory of metal cutting]. Samara: Samara State Technical University Publ., 2002. 167 p.

About authors

Fedorov Dmitriy Gennad'evich, engineer, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: fedorovdmytry@gmail.ru. Area of Research: thermophysical processes occurring in a material during abrasive machining.

Skuratov Dmitriy Leonidovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Engine Production Technology, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: skuratov@ssau.ru. Area of Research: thermal processes in machining of materials.