

УДК 621.914.1

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ ОТ СИЛ РЕЗАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

© 2015 С.А. Тимофеев, А.В. Савилов

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Статья поступила в редакцию 05.11.2015

В статье рассматривается зависимость электропроводности от сил резания и температуры детали при высокопроизводительном фрезеровании авиационных деталей из алюминиевых сплавов торцевыми фрезами.

Ключевые слова: удельная электрическая проводимость, высокопроизводительное фрезерование, алюминий, фреза, динамометр, тепловизионная камера.

Представленная в рамках данной статьи работа проводится при финансовой поддержке правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

При изготовлении авиационных деталей контролируют не только геометрические размеры и качество поверхности, но и механические свойства материала. Повышение производительности обработки деталей за счёт интенсификации режимов резания ведёт к повышению экономической эффективности производства [1]. Однако оно не должно оказывать негативного воздействия на механические свойства детали и, следовательно, на её прочность и ресурс. Существуют различные методы оценки механических свойств авиационных материалов после механообработки. Для алюминиевых сплавов в настоящее время широкое распространение получило измерение электропроводности с помощью вихретокового метода [2].

В результате механической обработки авиационных деталей в значительной мере изменяется физико-механическое состояние их поверхностных слоев (микротвердость и остаточные напряжения).

Теоретической основой вихретокового контроля является наличие корреляционных связей между электрическими характеристиками металлов и сплавов и их химическим составом или структурным состоянием. Поэтому, на основании измерений удельной электрической проводимости, возможно контролировать структуру, однородность химического состава, механические свойства материала и т.п.

Тимофеев Сергей Анатольевич, аспирант кафедры оборудования и автоматизации машиностроения.

E-mail: sevans@istu.edu

Савилов Андрей Владиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования и автоматизации машиностроения. E-mail: saw@istu.edu

Вихретоковый контроль основан на возбуждении вихревых токов в поверхностном слое контролируемого металла и регистрации их обратного воздействия на измерительную систему. Все нарушения однородности контролируемого изделия мгновенно увеличивают электрическое сопротивление поверхностного слоя металла, что приводит к ослаблению вихревых токов [2].

Согласно А.С. Бакунову [3], для большинства термически упрочняемых алюминиевых сплавов показано, что их механические характеристики (предел прочности σ_b , предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ) имеют корреляционную связь с их удельной электрической проводимостью γ . Установлено, что для термически упрочняемых сплавов, чем ниже удельная электрическая проводимость, тем выше прочность и ниже пластичность.

Электрические характеристики материалов зависят не только от их химического состава, но в значительной мере от структурного состояния кристаллической решетки d , определяемого механической и термообработкой, а также от наличия дефектов кристаллической решетки [4]. Данная взаимосвязь выражена в формуле [5]:

$$\gamma = \frac{e^2 E n_0}{mkTV_T N_0 \pi} \cdot d,$$

где e – заряд электрона, Кл; m – масса покоя электрона, кг; n_0 – число электронов проводимости в единице объема; E – напряженность поля, В/м; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура материала, К; V_T – скорость теплового движения электронов, м/с; N_0 – число атомов в единице объема; d – период кристаллической решетки, м.

При механической обработке в зоне резания одновременно действуют значительные усилия резания, создающие наклеп, и температура, вызывающая разупрочнение металла при достижении определённого значения. Так же под влиянием пластической деформации изменяется кристаллическая решетка (параметр d), что, в свою очередь, должно привести к изменению электропроводности. Поэтому для контроля механических характеристик алюминиевых сплавов можно применить вихретоковый метод неразрушающего контроля с использованием измерителей удельной электрической проводимости [6].

Целью, описанного в данной работе исследования, является определение зависимости электропроводности от таких параметров процесса резания, как сила резания F и температура детали $T_n.d$. Зависимость электропроводности от параметров резания показана в предыдущей работе.

В качестве исследуемых материалов были выбраны фрагменты горячекатаных плит алюминиевых сплавов В950чТ2, 1933Т2 и 1163Т. Химический состав и механические свойства данных сплавов приведены в табл. 1, 2. Работы проводились на фрезерном обрабатывающем центре DMGHSC75 Linear.

Измерение электропроводности выполнялось прибором Sigmatest 2.069 [7] в связке с программным обеспечением Sigmatest 2.069 Data Acquisition Program, которое позволяет измерять параметр электропроводности в режиме сканирования, не отрывая датчик от детали. Для этого была разработана карта измерения электропроводности на плоскости (рис. 1).

Измерения температуры выполняли с помощью инфракрасной камеры FlirSC7000. Измерения проводились непосредственно на выходе обрабатываемой детали из зоны резания (рис. 2). Такой подход в измерении температуры обусловлен требованиями, изложенными в нормативной документации, используемой на отечественных авиастроительных предприятиях. Указанная нормативная документация регламентирует температуру обрабатываемой детали, а не температуру в зоне резания, как в большинстве классических опытов. Запаздывание по времени момента измерения, зависящее от расстояния до действительной зоны резания и подачи инструмента, составляло около 0,2 с, поэтому действительную температуру поверхности детали определяли методом экстраполяции на основании кривой охлаждения (рис. 3). Кривая охлаждения была

Таблица 1. Химический состав алюминиевых сплавов

Сплав	Fe	Si	Mn	Zr	Ni	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Примеси
В950чТ2	0,05–0,25	до 0,1	0,2–0,6	-	до 0,1	до 0,05	87,45–91,45	1,4–2	1,8–2,8	5–6,5	прочие, каждая 0,05; всего 0,1
1933Т2	0,06–0,15	до 0,1	-	0,1–0,15	-	до 0,06	88,8–89,8	0,8–1,2	1,6–2,2	6,3–7,2	
1163Т	0,15	до 0,1	0,4–0,8	-	-	-	93–94,5	3,8–4,5	1,2–1,6	0,1	

Таблица 2. Механические свойства алюминиевых сплавов

Сплав	Y, %	$\delta_5, %$	$\sigma_T, МПа$	$\sigma_B, МПа$	$\sigma_{0.2}, МПа$	Твердость НВ
В950чТ2	-	10-12	-	510-540	450-480	-
1933Т2	-	8	-	450	390	-
1163Т	-	12	-	460	345	-

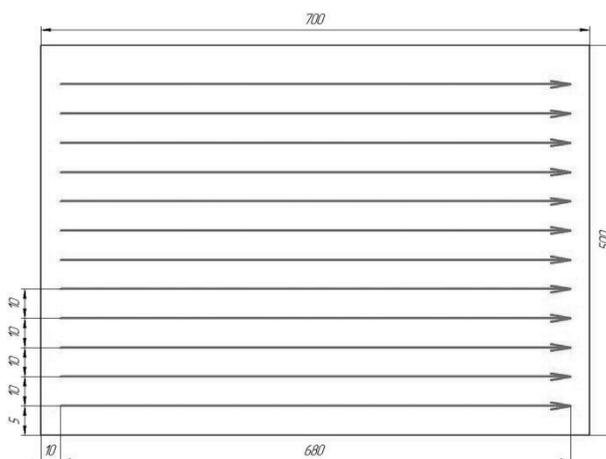


Рис. 1. Карта измерений электропроводности на плоскости

получена опытным путём для сплава В950чТ2, но из-за незначительного отличия в теплопроводности сплавов В950чТ2, 1933Т2 и 1163Т, и из-за малого времени запаздывания момента измерения, данная кривая была применена для всех трех сплавов. При проведении измерений в процессе экспериментов тепловизионная камера располагалась на расстоянии 1200 мм от обрабатываемой детали.

Во время обработки выполнялись измерения сил резания с помощью 3-х компонентной динамометрической платформы Kistler Type 5070.

Для обработки плоскостей в эксперименте были задействованы следующие типы фрез: торцевая сборная фреза Sandvik для обработки прямоугольных уступов R590-080HA06-11M (рис. 4) с пластинами R590-110504H-NLH10 и концевая сборная фреза Sandvik R790-050HA06S1-16M (рис. 5) с пластиной R790-160408PH-NLH13A.

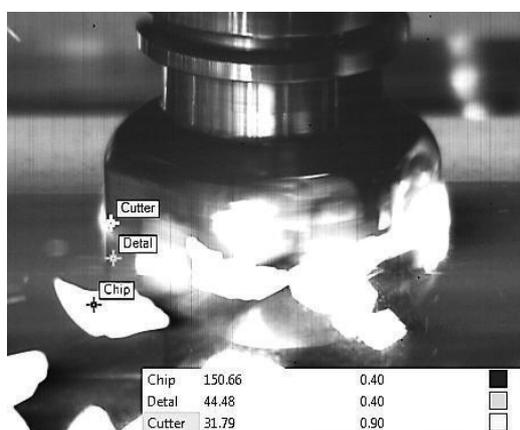


Рис. 2. Схема измерения температуры

Диапазоны режимов резания используемых в работе фрез указаны в табл. 3.

Получены корреляционные зависимости удельной электрической проводимости от температуры детали после обработки и сил резания (рис. 6-9). С помощью программы Excel графики были аппроксимированы.

В настоящей работе проведены исследования по возможности контроля механических характеристик алюминиевых сплавов вихретоковым методом неразрушающего контроля с использованием измерителя удельной электрической проводимости.

Анализ полученных зависимостей показывает:

1) рассмотренные в данной работе режимы обработки не влияют значительным образом на значения электропроводности заготовки, и могут применяться при обработке алюминиевых сплавов 1163Т, 1933Т2 и В95Т2 на производстве

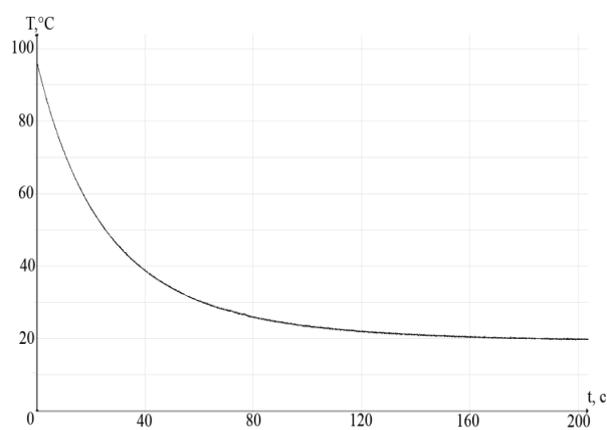


Рис. 3. Кривая охлаждения алюминиевых сплавов

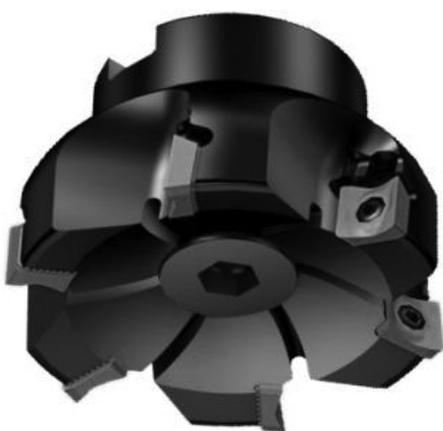


Рис. 4. Фреза типа R590



Рис. 5. Фреза типа R790

Таблица 3. Диапазоны режимов резания

Фреза	D_c	z	V_c	a_e	a_p	n	f_z
Обработка плоскости							
R590-080HA06-11M	80	6	1000 – 3000	30 – 70	1 – 5	3979 – 11936	0,1 – 0,4
R790-025HA06S2-16L	50	3	1000 – 3000	20 – 45	1 – 5	6366 – 19098	0,1 – 0,4

Примечание: D_c – диаметр инструмента, мм; z – число зубьев инструмента; V_c – скорость резания, м/мин; a_e – ширина фрезерования, мм; a_p – глубина фрезерования, мм; n – число оборотов шпинделя, мин⁻¹; V_f – минутная подача, мм/мин; f_z – подача, мм/зуб; Q – объем снимаемой стружки, см³/мин

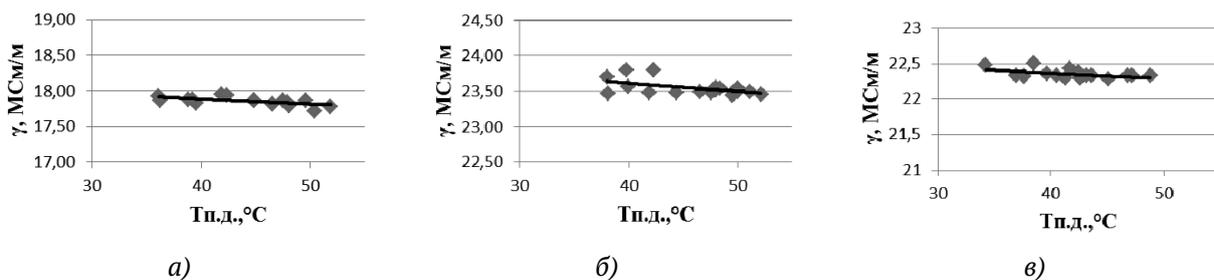


Рис. 6. Корреляционные зависимости между γ и Тп.д. для разных сплавов при обработке плоскости фрезой R590-080HA06-11M: а – сплав 1163Т; б – сплав 1933Т2; в – сплав В950чТ2

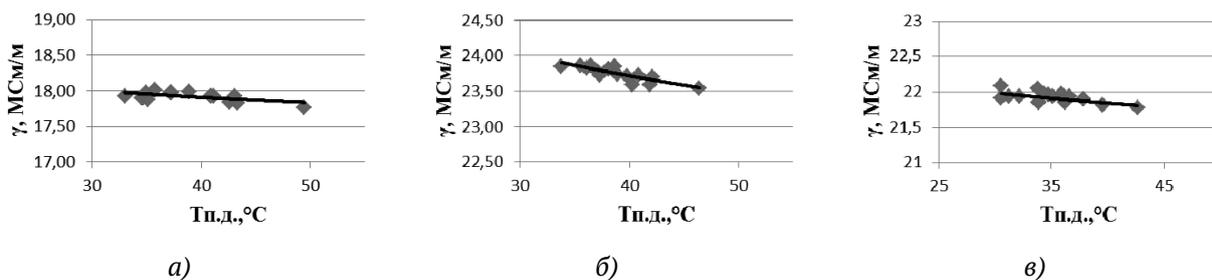


Рис. 7. Корреляционные зависимости между γ и Тп.д. для разных сплавов при обработке плоскости фрезой R790-025HA06S2-16L: а – сплав 1163Т; б – сплав 1933Т2; в – сплав В950чТ2

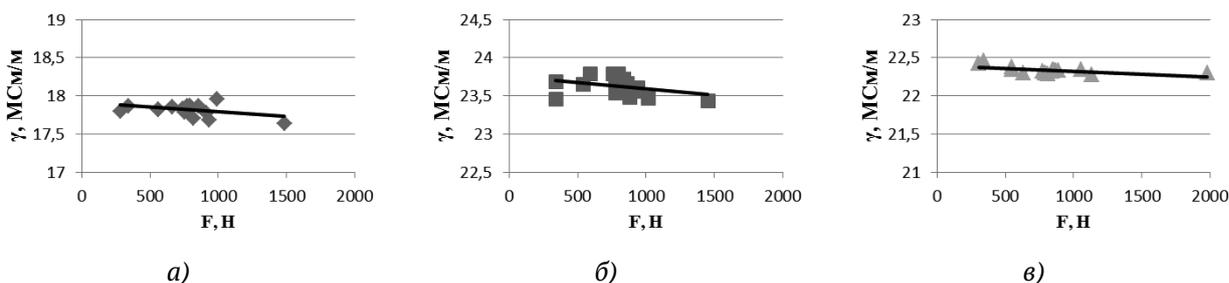


Рис. 8. Корреляционные зависимости между γ и F для разных сплавов при обработке плоскости фрезой R590-080HA06-11M: а – сплав 1163Т; б – сплав 1933Т2; в – сплав В950чТ2

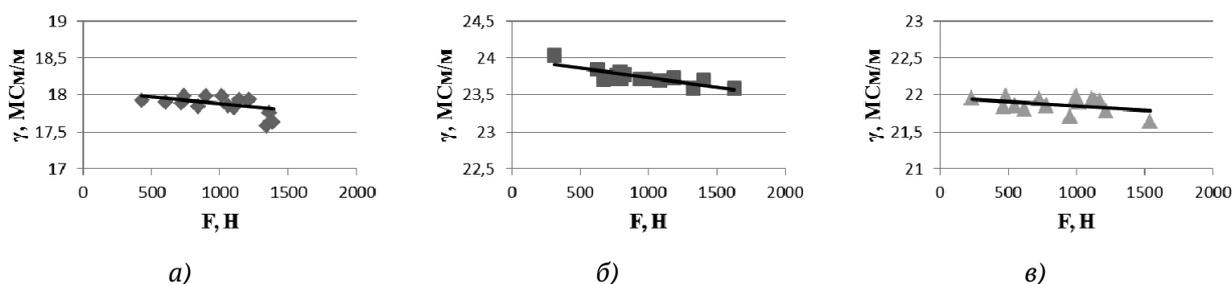


Рис. 9. Корреляционные зависимости между γ и F для разных сплавов при обработке плоскости фрезой R790-025HA06S2-16L: а – сплав 1163Т; б – сплав 1933Т2; в – сплав В950чТ2

без нарушения микроструктуры данных сплавов;

2) во всех опытах замечена тенденция к снижению электропроводности при росте температуры на поверхности детали и увеличении сил резания при этом следует отметить, что не достигнута критическая, согласно НД, температура в 100 °С;

3) возможно, что изменение электропроводности, обусловленное изменением сил резания

и температуры сопоставимо с изменением электропроводности обусловленным неоднородностью материалов и их механических свойств [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Современные методы оптимизации высокопроизводительного фрезерования // Известия Самарского

- научного центра РАН. 2013. Т. 15. №6(2). С.476-479.
2. Савилов А.В., Тимофеев С.А. Исследование зависимости электропроводности от параметров резания при высокопроизводительном фрезеровании алюминиевых сплавов // Вестник ИРГТУ. 2014. №2. С.55-60.
 3. Бакунов А.С., Мужичкий В.Ф., Попов Б.Е. Контроль механических свойств алюминиевых сплавов электромагнитным методом // Дефектоскопия. 1995. №2. С.61-67.
 4. Васильков С.Д., Александров А.С., Афанасьев И.В. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из алюминиевого сплава после механической обработки // Инструмент и технологии. 2009. №30-31, С.26-29.
 5. Берестецкий В.Б., Лившиц Е.М., Путаевский Л.П. Квантовая электродинамика // Теоретическая физика в 10 томах, т.4. М.: Наука. 1989 – 421 с.
 6. Кравченко Б.А., Кравченко А.Б. Влияние температуры резания на формирование остаточных напряжений // Современные методы повышения эффективности и качества механической обработки. Куйбышев: КПИ, 1989. С. 79–88.
 7. Тимофеев С.А. Высокопроизводительное фрезерование авиационных деталей из алюминиевых сплавов по критерию заданной электропроводности // Высокоэффективные технологии производства летательных аппаратов: сборник докладов. Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 2012. С. 25-33.
 8. Замащиков Ю.И. Скоростные диаграммы резания, учитывающие сплошность материала // Вестник ИРГТУ. 2014. №3. С.33-40.

DEPENDENCE CONDUCTIVITY ALUMINUM PART FROM CUTTING FORCES AND TEMPERATURES OF HIGH PERFORMANCE MILLING

© 2015 S.A. Timofeev, A.V. Savilov

Irkutsk National Research Technical University

In article discusses the dependence of the electrical cutting forces and temperature details in high performance milling of aircraft parts made of aluminum alloy end mills.

Keywords: specific electric conductivity, high performance milling, aluminum cutter, thermal imaging camera, dynamometer.