

УДК 621.91

В. Е. ЗАЙЦЕВ¹, Е. А. СКРИПКА¹, О. В. ГНАТЕНКО²¹ Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина² ПАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗАНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ Ra ПРИ ТОРЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 6082 Т6

Сделан анализ требований, предъявляемых к корпусным деталям летательных аппаратов. Рассмотрены вопросы торцевого фрезерования при высокоскоростной механической обработке корпусных деталей из алюминиевого сплава 6082 Т6. Проведена статистическая обработка экспериментальных данных с целью определить, при каких значениях основных параметров режимов резания (скорости, подачи на зуб, ширины и глубины резания) получаются наиболее рациональные значения шероховатости поверхности. Разработана математическая модель, позволяющая заранее определить величину шероховатости поверхности Ra при торцевом фрезеровании.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, корпусные детали, алюминиевые сплавы, статистический анализ, математическая модель, шероховатость поверхности.

Требования к корпусным деталям авиационных агрегатов

В технологии авиастроения повышенное внимание уделяется качеству изготовления корпусных деталей авиационных агрегатов, ведь от них зависят качество, надежность, экономичность и долговечность летательных аппаратов.

Важным параметром при изготовлении исполнения корпусных деталей является шероховатость поверхности после механической обработки. При этом учитывают также технологические факторы, связанные с возможностью получения требуемой конфигурации заготовки, возможностями механической обработки, и удобства сборки.

Постановка задачи

Шероховатость – совокупность микронеровностей, образующих рельеф поверхности. Значение ее величины играет важную роль в том, как изготовленная деталь будет взаимодействовать с рабочей средой (другими деталями, основным агрегатом летательного аппарата и т.д.). Неровные поверхности изнашиваются чаще и имеют более высокий коэффициент трения, чем гладкие поверхности.

Шероховатость часто является показателем качества детали, т.к. неровности поверхности могут образовывать трещины, что приведет к коррозии металла и ухудшению прочностных и эксплуатационных характеристик [1, 2].

Таким образом, шероховатость поверхности

является нежелательной. Полностью избежать ее появления в процессе изготовления детали невозможно, поэтому большое значение имеет контроль значений шероховатости при производстве. Снижение шероховатости прямо пропорционально увеличению стоимости изделия.

Механизм возникновения шероховатости

Все причины возникновения шероховатости можно разбить на следующие группы:

1. Расположение режущих кромок инструмента, относительно обрабатываемой поверхности.
2. Упругая и пластическая деформация обрабатываемого металла.
3. Вибрации в технологической станочной системе.

При процессе фрезерования окончательная шероховатость поверхности является слагаемым двух независимых параметров:

– идеальный случай, когда значение шероховатости зависит от геометрии инструмента и скорости подачи;

– в реальном производстве ее значение является результатом нестабильности процесса резания.

Целью эксперимента является нахождение модели для количественной оценки параметра «шероховатость Ra», т.е. среднего арифметического отклонения профиля Ra (среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля y_i от средней линии m в пределах базовой длины, рис. 1):

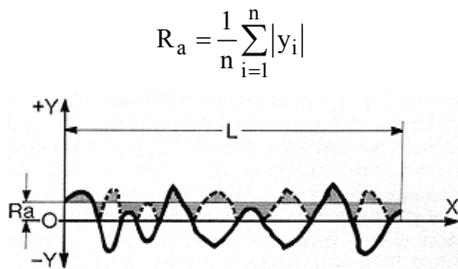


Рис. 1. Схема измерений величины R_a :
 L – длина исследуемой поверхности

Высокоскоростная обработка резанием

Высокоскоростная обработка резанием является наиболее перспективным процессом размерной обработки деталей. Сокращение времени механической обработки корпусных деталей сложной формы является главным фактором внедрения новых технологий в современное авиационное производство.

Возможность фрезерования алюминия на современных обрабатывающих центрах с высокими скоростями и многокоординатной обработкой позволила в авиационной промышленности использовать корпусные детали, имеющие сложную конструкцию, подвергнутые предварительной термообработке и выполненных из цельных алюминиевых заготовок [1].

Подробно остановимся на вопросе шероховатости поверхности после обработки.

В статьях [1] и [2] рассмотрены особенности торцевого фрезерования сплава 6082 Т6, а также свойства алюминиевого сплава 6082 Т6.

Сведения о планировании эксперимента и статистической обработке данных

В соответствии с тенденциями развития современной науки в методологии принят системный и вероятностно-статистический подход к исследованию процессов резания. Обобщенный процесс резания рассматривается как динамическая система, а совокупность входных переменных и выходных характеристик – как многомерные случайные процессы. Важной задачей исследований процесса резания является формализация результатов исследований с целью создания математического описания исследуемого процесса и сокращения сроков исследования.

Цель эксперимента – изучить влияние различных взаимодействий на объект исследования. Эти взаимодействия называются факторами. Если факторы варьируются при исследовании, то они называются варьируемыми или переменными. Если эти факторы в процессе эксперимента стабилизируются

на определенном уровне, то они называются постоянными. Отдельная группа факторов является неуправляемыми и неконтролируемыми, определяющими возможное влияние окружающей среды на процесс резания, например колебание температуры, вибрация пола в помещении, где проводятся эксперименты и т.д. Каждый переменный фактор принимает в эксперименте одно или несколько значений. Эти значения называются уровнями факторов. Факторы, действуя на объект, изменяют его состояние. Выходной величиной объекта или откликом называют такой параметр, по которому судят об изменении состояния объекта.

Выбрать модель – значит выбрать вид этой функции, записать ее уравнение. Тогда останется спланировать и провести эксперимент для оценки численных значений констант этого уравнения. Наглядное, удобное, воспринимаемое представление о функции отклика дает ее геометрический аналог – поверхность отклика. Чаще всего проводятся простые эксперименты – случаи с двумя факторами.

Пространство, в котором строится поверхность отклика, называется факторным пространством. Оно задается координатными осями, по которым откладываются значения факторов и параметра оптимизации (рис. 2).

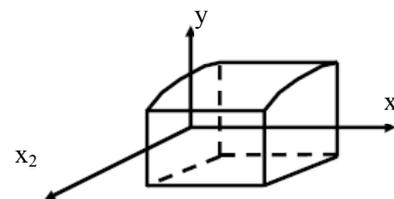


Рис. 2. Пример факторного пространства

Зависимость выходной величины (отклика) y от варьируемых факторов x_1, x_2, \dots, x_n , полученная с применением регрессионного анализа, называется регрессионной моделью, которая является частным случаем математической модели объекта.

Математическую модель данного процесса можно представить в виде:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i,j=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (1)$$

где $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ – коэффициенты, числовые значения которых определяют по результатам эксперимента;

b_0 – свободный член;

b_1, b_2, \dots, b_n – линейные коэффициенты регрессии;

x_{ij}^2 – квадратичный член;

b_{ij} – коэффициенты регрессии при квадратичных членах факторов.

Уравнение вида (1) называют уравнением регрессии. Построенная модель позволяет получить информацию о самом процессе и о способах управ-

ления им. С помощью регрессионной модели легко оценить степень и характер влияния каждого из факторов на выходную величину; модель может послужить основой для оптимизации процесса.

Для получения математической модели был проведен многофакторный эксперимент, в котором варьировали всеми переменными факторами. Эксперимент проводился на специальной установке. Экспериментальная установка моделирует заданный технологический процесс резания в заданных условиях и выдает информацию о параметрах процесса в удобном виде. Экспериментальная установка состоит из режущего устройства и измерительной системы. Описание эксперимента и экспериментальной установки приведено в [2].

Статистическая обработка экспериментальных данных

Для постулирования модели исследуемого процесса применялся метод ANOVA. Подробно о методе в [2].

Закон распределения полученных данных и определение возможных наиболее значимых взаимодействий между факторами представлены соответственно на рис. 3 и 4.

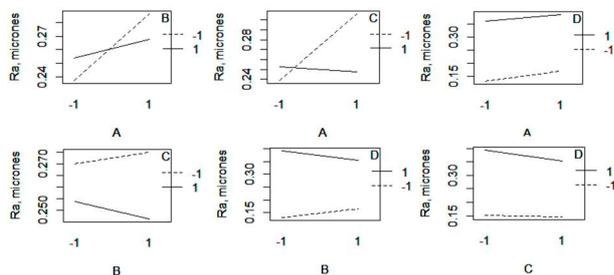


Рис. 3. Диаграмма взаимодействий между факторами

При помощи диаграммы взаимодействий между независимыми переменными мы можем сказать,

```
lm(formula = output^0.5 ~ Feed_per_tooth + Cutting_speed + Depth_of_cut +
  Width_of_cut + Feed_per_tooth:Cutting_speed + Feed_per_tooth:Depth_of_cut +
  Cutting_speed:Depth_of_cut, data = dm)
```

Residuals:				
Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.14905	-0.05406	0.01007	0.06662	0.14990

Coefficients:				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-1.058e-01	4.223e-01	-0.250	0.804
Feed_per_tooth	1.677e+00	1.915e+00	0.876	0.390
Cutting_speed	4.677e-04	6.622e-04	0.706	0.487
Depth_of_cut	3.149e-02	7.336e-02	0.429	0.672
Width_of_cut	1.145e-01	1.684e-02	6.799	4.95e-07 ***
Feed_per_tooth:Cutting_speed	-1.880e-03	2.994e-03	-0.628	0.536
Feed_per_tooth:Depth_of_cut	-9.468e-02	1.123e-01	-0.843	0.407
Cutting_speed:Depth_of_cut	-3.071e-05	1.123e-04	-0.274	0.787

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.09527 on 24 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.6696, Adjusted R-squared: 0.5733
 F-statistic: 6.949 on 7 and 24 DF, p-value: 0.0001435

Рис. 5. Результаты анализа ANOVA

что значимыми для определения отклика являются A:B, A:C, B:C (подача на зуб – скорость резания; подача на зуб – глубина фрезерования; скорость – глубина резания).

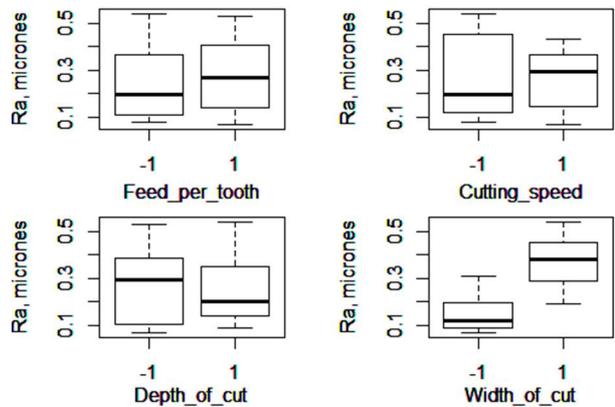


Рис. 4. Ящичковые диаграммы

Эффект от взаимодействий между B:D, C:D не велик, также как и эффект от A:D. Это означает, что наименьшая шероховатость поверхности Ra может быть получена за счет увеличения величин подачи на зуб и скорости резания, увеличения значений подачи, скорости и глубины резания.

Полученные экспериментальные данные имеют нормальное распределение (см. рис. 4).

Для определения значений шероховатости поверхности Ra была предложена следующая модель (2):

$$Y^{0.5} = \beta_0 + \beta_A \cdot A + \beta_B \cdot B + \beta_C \cdot C + \beta_D \cdot D + \beta_{AB} \cdot AB + \beta_{BC} \cdot BC + \beta_{BD} \cdot BD, \quad (2)$$

где $\beta_0, \beta_A, \beta_B, \beta_C, \beta_D, \beta_{AB}, \beta_{BC}, \beta_{BD}$ – параметры модели.

Согласно результатам анализа ANOVA (рис. 5) значение $p = 0,0001435$ и значение коэффициента корреляции $R = 57,33\%$, т.е. предложенная модель является точной на 57,33%.

На рис. 6 показаны результаты сравнения полученных данных с теоретическими значениями. Как видно из рисунка, фактор D является наиболее значимым.

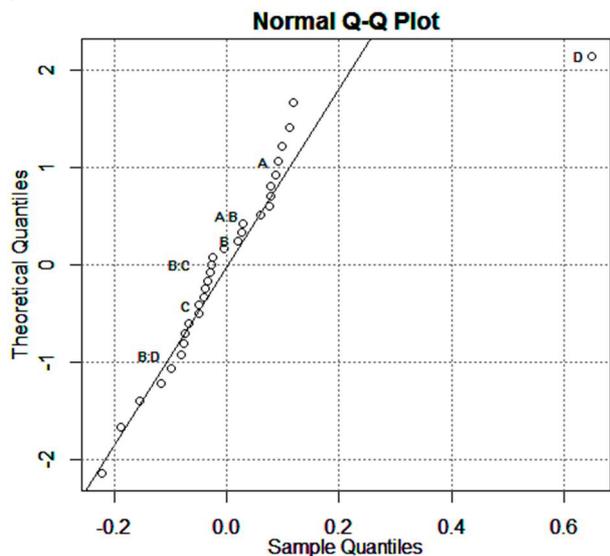


Рис. 6. Диаграмма «квантиль – квантиль»

Уравнение модели, описывающей шероховатость Ra, имеет вид (3):

$$Y^{0,5} = -0,1058 + 1,677 \cdot A + 4,677 \cdot 10^{-4} \cdot B + 3,149 \cdot 10^{-2} \cdot C + 0,1145 \cdot D - 1,88 \cdot AB - 9,486 \cdot 10^{-2} \cdot AC - 3,071 \cdot 10^{-5} \cdot BC. \quad (3)$$

Модель только с одним значимым фактором не может быть постулирована. В первую очередь, тот факт, что скорость резания и подача на зуб не влияют на отклик, не может быть принят. Являясь главными параметрами процесса, они влияют на величину шероховатости.

Объяснить такие результаты эксперимента можно следующим образом. После фрезерования на поверхности остаются следы от фрезы (рис. 7).

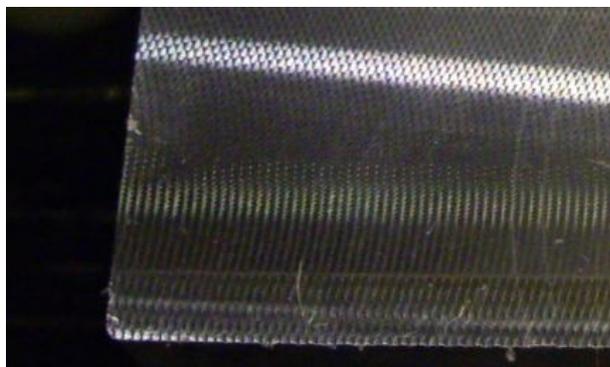


Рис. 7. Поверхность после фрезерования

В ходе эксперимента шероховатость измерялась в направлении, перпендикулярном оси инстру-

мента (в направлении глубины резания) и в случаях, когда глубина и ширина резания имели наименьшие значения (по 1 мм каждое) было достаточно трудно установить иглу профилометра и определить величину шероховатости из-за маленькой измеряемой площади. Такие результаты ANOVA могут быть объяснены тем, что погрешности при измерении вызваны следами фрезы и поэтому фактор D оказывает наибольшее влияние на отклик.

Существует два метода оценки качества поверхности: количественный и качественный. Исходя из всего вышеизложенного, данная модель является пригодной для качественной оценки.

Проверка адекватности модели

Результаты теста Шапиро-Уилка для исследуемой модели следующие: значения величины $p = 0,5701$, что является достаточным для принятия данной модели.

Согласно результатам проверки (рис. 8 и 9), экспериментальные данные не характеризуются нормальным распределением.

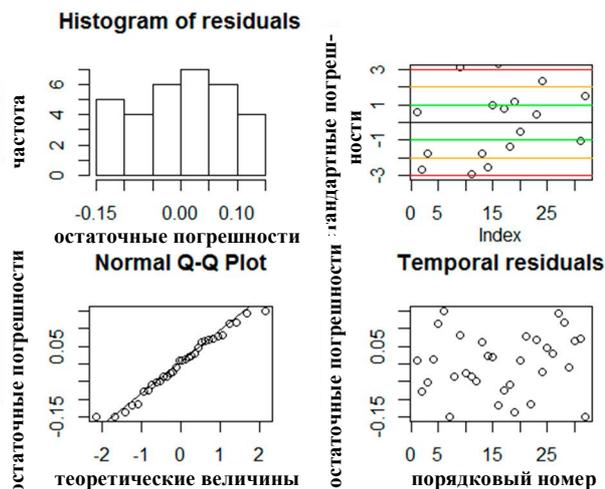


Рис. 8. Результаты проверки модели на адекватность

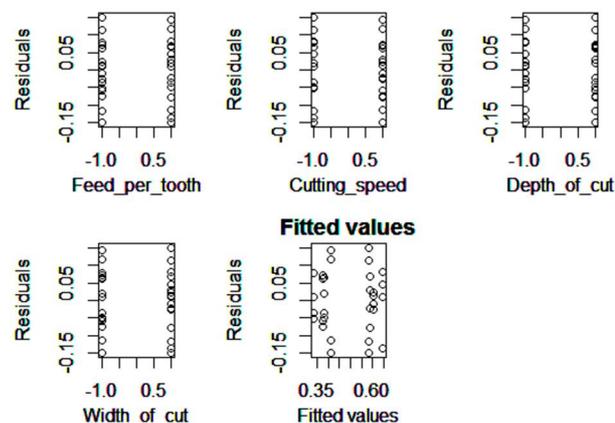


Рис. 9. Остаточные погрешности независимых переменных

Это также подтверждает ранее предположенный источник возникновения погрешностей измерения – небольшая «полезная» площадь при проведении эксперимента.

Как видно из диаграмм «квантиль – квантиль» (см. рис. 6) и остаточных погрешностей (см. рис. 9), данные имеют достаточно однородное распределение, что позволяет использовать модель для качественной оценки.

Заключение

На рис. 10 изображены контурные диаграммы: При помощи диаграмм можно получить стабильную величину отклика в зависимости от изменяемых параметров. Как видно из диаграмм, значение шероховатости R_a стабильно (рис. 10, а) в диапазоне скоростей 550...700 м/мин при величине подачи $f_z = 0,15...0,20$ мм/зуб. Также хорошо видно, что величина подачи при скорости близкой к 640 м/мин может принимать любые значения.

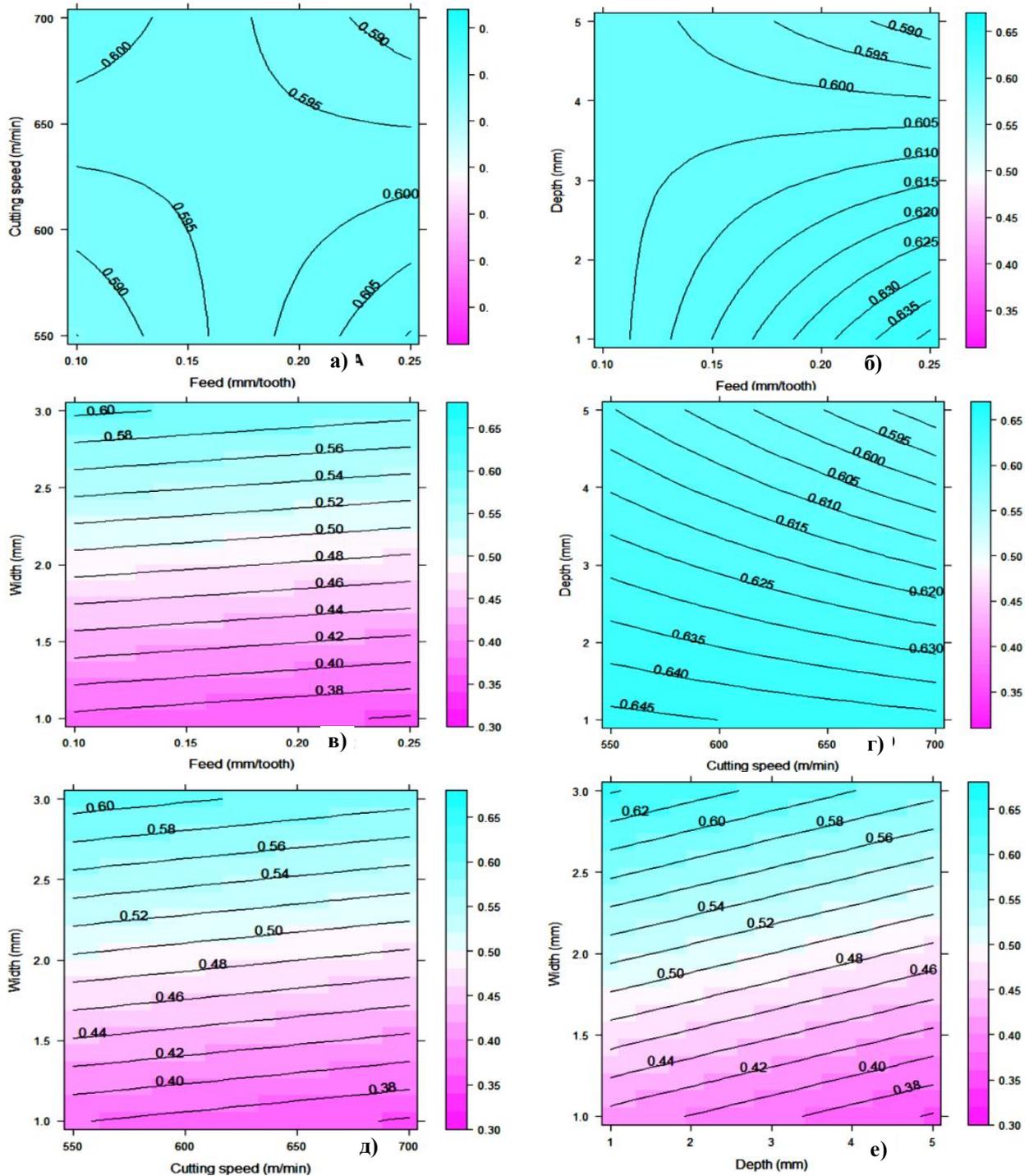


Рис. 10. Контурные диаграммы

Любое изменение глубины резания при величине подачи 0,1 мм/зуб и любое изменение подачи на зуб при глубине резания равной 3,7 мм не оказывают влияния на величину Ra (рис. 10, б). Стабильность отклика постоянна в любых диапазонах ширины резания и подачи (рис. 10, в), ширины и скорости резания (рис. 10, г), глубины и ширины резания (рис. 10, д). Как было сказано ранее, значение шероховатости зависит от глубины и скорости резания (рис. 10, е).

Изучение шероховатости поверхности Ra в рассматриваемом случае не является достаточно достоверным, тем не менее, модель исследуемого отклика может использоваться для качественной оценки.

Литература

1. Макаров, А. И. Особенности технологических процессов высокоскоростного фрезерования сложных поверхностей [Электронный ресурс] / А. И. Макаров // *Материалы 65-й Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) "Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров" Международного научного симпозиума «Автотракторостроение – 2009»*. – Книга 7. – Москва, МГТУ «МАМИ», 2009. – С. 147–149. – Режим доступа: http://www.mami.ru/science/autotr2009/scientific/article/s07/s07_27.pdf. – 1.09.2013.

2. Зайцев, В. Е. Исследование влияния основных параметров резания на величину крутящего момента при торцевом фрезеровании алюминиевого сплава 6082 Т6 [Текст] / В.Е. Зайцев, Е. А. Скрипка // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 5(102). – С. 4–11.

Поступила в редакцию 1.05.2014, рассмотрена на редколлегии 10.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. Проектирования ракетно-космических аппаратов В. Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РІЗАННЯ НА ВЕЛИЧИНУ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ Ra ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ АЛЮМІНІСВИХ СПЛАВІВ 6082 Т6

В. Є. Зайцев, К. А. Скрипка, О. В. Гнатенко

Зроблено аналіз вимог, пропонованих до корпусних деталей літальних апаратів. Розглянуто питання торцевого фрезерування при високошвидкісній механічній обробці корпусних деталей з алюмінієвого сплаву 6082 Т6. Проведено статистична обробку експериментальних даних з метою визначити, при яких значеннях основних параметрів режимів різання (швидкості, подачі на зуб, ширини і глибини різання) виходять найбільш раціональні значення шорсткості поверхні. Розроблено математичну модель, що дозволяє заздалегідь визначити величину шорсткості поверхні Ra при торцевому фрезеруванні.

Ключові слова: високошвидкісне фрезерування, корпусні деталі, алюмінієві сплави, статистичний аналіз, математична модель, шорсткість поверхні.

INVESTIGATION OF THE CUT MAIN PARAMETERS INFLUENCE TO SURFACE ROUGHNESS Ra OF ALUMINUM ALLOY 6082 T6 MILLING

V. E. Zaitsev, K. A. Skrypka, O. V. Gnatenko

The analysis of the requirements of body parts flying machines. The problems in high-speed end milling machining parts made from aluminum alloy 6082 T6. Statistical processing of the experimental data in order to determine for which values of the main parameters of cutting conditions (speed, feed per tooth, the width and cut depth) are obtained by the most rational of surface roughness. A mathematical model, which allows determining the value Ra of torque.

Key words: high-speed milling, body parts, aluminum alloys, statistical analysis, torque mathematical model, surface roughness.

Зайцев Віталій Егоревич – д-р техн. наук, професор кафедри технології виробництва літальних апаратів, проректор по науково-педагогічній роботі, Національний аэрокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, e-mail: vitaliy.zaitsev@khai.edu.

Скрипка Катерина Андріївна – магістр кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національний аэрокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, e-mail: kateeskrpuna@gmail.com.

Гнатенко Олег Віталіїв – Гл. металург, ПАО «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна, e-mail: vitaliy.zaitsev@khai.edu.