

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ КОМПОЗИТА, СОСТОЯЩЕГО ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ LM25 С НАНОЧАСТИЦАМИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ Al_2O_3

Т. П. Танкачан

Технологическая школа Раджагири, Кочи, Индия
E-mail: thankachanin@yahoo.com

Предложен способ изготовления литьем с перемешиванием макрогетерогенного металлокомпозиата, представляющего собой алюминиевый сплав марки LM25 с массовой долей наночастиц оксида алюминия Al_2O_3 10 и 20 %. Излагается метод, основанный на понятии поверхности отклика и позволяющий определить степень шероховатости поверхности и величину режущего усилия при обработке металлокомпозиата режущим инструментом из кубического нитрида бора. Исследование выполнено для металлокомпозиата массовой долей наночастиц оксида алюминия Al_2O_3 10 и 20 %. С использованием метода дисперсионного анализа определены скорость резания, скорость подачи инструмента и глубина реза, обеспечивающие оптимальные значения степени шероховатости поверхности и режущей силы. Установлено, что найденные значения параметров близки к экспериментальным значениям.

Ключевые слова: макрогетерогенные металлические композиты, механические свойства, литье.

DOI: 10.15372/PMTF20190117

Введение. Макрогетерогенные металлические композиты (ММК) на основе алюминиевой матрицы с дискретно распределенными металлическими наночастицами широко используются в технике, поскольку их твердость, модуль упругости и износостойкость больше, чем у других алюминиевых сплавов. Известно, что при добавлении в чистый алюминий частиц оксида алюминия Al_2O_3 с массовой долей 4 % его временное сопротивление увеличивается в два раза. Использование таких композитов ограничено вследствие сложности их изготовления и отсутствия данных о влиянии наночастиц на механические свойства композита.

Технологии изготовления ММК можно разделить на два типа: изготовление в твердом состоянии и изготовление в жидком состоянии [1]. Изготовление ММК в жидком состоянии, в частности метод горячего литья с перемешиванием, является перспективным методом, поскольку он более простой и позволяет изготавливать образцы композитов различных размеров. Имеется небольшое количество работ, посвященных исследованию характеристик обрабатываемости ММК, усиленных наночастицами оксида алюминия Al_2O_3 , имеющими большую твердость и высокую абразивность. Свойства изделий из ММК, подвергнутых токарной обработке, зависят от ряда параметров процесса обработки, в частности

от скорости вращения шпинделя (скорости резания), скорости подачи инструмента и глубины реза.

Проведен ряд исследований механических свойств ММК, изготовленных методом литья с перемешиванием [1–8]. В работах [9–12] приведены результаты изучения микроструктуры и механических свойств ММК, в [13–18] — результаты исследования влияния параметров процесса обработки на свойства ММК.

Существует небольшое количество работ, в которых определяются параметры, обеспечивающие оптимальные значения степени шероховатости поверхности R_a и режущего усилия (усилия резания) F_z при обработке изготовленных методом литья с перемешиванием ММК на основе алюминиевой матрицы с массовой долей наночастиц Al_2O_3 10 и 20 %.

1. Исследуемые образцы. Размер армирующих частиц в металлических композициях изменяется в диапазоне от нескольких микрометров до сотен микрометров. Механические свойства металлических композитов (предел текучести, твердость, обрабатываемость) существенно улучшаются, если при изготовлении композита обеспечивается хорошая смачиваемость наночастиц оксида алюминия Al_2O_3 .

Для проведения исследований из металлического композита на основе алюминиевого сплава марки LM25, армированного наночастицами Al_2O_3 , методом горячего литья с перемешиванием были изготовлены образцы двух типов: 1) образцы с массовой долей наночастиц Al_2O_3 10 %; 2) образцы с массовой долей наночастиц Al_2O_3 20 %. Изготовление таких образцов существенно затруднено вследствие плохой смачиваемости керамических наночастиц в расплавленной металлической матрице. Для улучшения смачиваемости наночастицы Al_2O_3 предварительно измельчались и в них добавлялись микрочастицы порошка магния с массовой долей 1 %.

Усилие резания и качество поверхности обрабатываемой детали являются основными параметрами, характеризующими качество процесса обработки и его стоимость. В данной работе при исследовании влияния параметров процесса обработки на степень шероховатости поверхности и величину силы резания применяется метод, основанный на понятии поверхности отклика. Обработка образцов из металлического композита с массовой долей наночастиц Al_2O_3 10 и 20 % осуществлялась режущим инструментом CBN7020, изготовленным из кубического нитрида бора.

2. Методика эксперимента. В экспериментах использовался металлический композит, представляющий собой алюминиевый сплав марки LM25, содержащий наночастицы оксида алюминия Al_2O_3 размером 40 нм. Наночастицы вводились в алюминиевый сплав марки LM25 с помощью механической мешалки. Затем из композита отливались цилиндрические образцы. Распределение частиц в расплавленной матрице зависит от геометрии механической мешалки, параметров перемешивания, положения мешалки в расплаве, температуры расплава и характеристик наночастиц. Образец алюминиевого сплава марки LM25 помещался в тигель и нагревался до температуры 760 °С, превышающей температуру плавления алюминиевых сплавов. Затем в расплавленный металл медленно погружался миксер. Предварительно нагретые частицы смешивались с расплавленным алюминиевым сплавом. Перед смешиванием проводилось диспергирование наночастиц Al_2O_3 путем добавления в них микрочастиц порошка магния с массовой долей 1 %, что также способствовало улучшению смачиваемости наночастиц алюминиевым расплавом. Для равномерного перемешивания наночастиц с частицами высокорекреакционного порошка магния использовалась планетарная мельница. После введения всей порции наночастиц перемешивание происходило в течение 8 мин. Затем расплавленная смесь выливалась в предварительно нагретую форму, расположенную под печью. В нижней части печи имелось устройство, позволяющее нагревать и перемешивать смесь в процессе ее разлива. Диаметр отлитых заготовок составлял 90 мм, высота — 280 мм.

Таблица 1

Уровни факторов

Уровень факторов	V_c , м/мин	f , мм/об	a , мм
1	95	0,06	0,4
2	125	0,13	0,7
3	155	0,20	1,0

Из полученных заготовок изготавливались цилиндрические образцы высотой 260 мм и диаметром 65 мм. Эксперименты проводились в условиях сухой среды с помощью режущего инструмента CBN7020 на токарном станке с числовым программным управлением. Мощность шпинделя составляла 17 кВт, максимальная скорость вращения — 4500 об/мин. Поскольку использовалось новое оборудование, влияние вибрации на результаты эксперимента было незначительным. Компоненты силы резания в направлениях X , Y , Z могли быть измерены в диапазоне от -5 до 5 кН.

Параметр шероховатости R_a в каждом эксперименте определялся с помощью измерителя шероховатости SurfTest201 фирмы Mitutoyo. Инструмент перемещался по рабочей поверхности по винтовой линии с шагом 0,9 мм на расстояние, равное 6,0 мм. Измеренное значение параметра шероховатости R_a находилось в диапазоне $0,05 \div 35,00$ мкм. Для того чтобы исключить погрешности измерения шероховатости вследствие прерывания операций, измерения проводились без разборки режущего инструмента при резке вдоль трех направляющих, расположенных под углом друг к другу 120° . Результаты измерений осреднялись по трем резам.

В экспериментах определялось влияние скорости резания V_c , скорости подачи инструмента f и глубины реза a на параметр шероховатости R_a и компоненту усилия резания F_z . Для каждой из этих трех переменных (факторов) процесса резания было выбрано три уровня (табл. 1). В соответствии с результатами исследований, представленными в работе [8], для скорости подачи были выбраны следующие три уровня: 0,06; 0,13 и 0,20 мм/об. Уровни факторов выбирались в соответствии с рекомендациями производителей режущих инструментов. Выбор трех уровней для трех факторов обуславливает необходимость проведения 27 экспериментов.

3. Обработка экспериментальных данных. Оптимальные значения параметров выбираются следующим образом:

- 1) выбираются входные параметры (независимые переменные) и желаемый отклик (зависимая переменная);
- 2) составляется план эксперимента;
- 3) с использованием квадратичной модели метода поверхности отклика выполняется регрессионный анализ;
- 4) с использованием метода дисперсионного анализа выбираются значимые входные переменные;
- 5) с помощью квадратичной модели метода поверхности отклика проверяется необходимость корректировки независимых переменных;
- 6) выполняется оптимизация независимых параметров и проводятся эксперименты для верификации предсказанных параметров.

В данной работе зависимость между параметрами резания и технологическими параметрами принимается в виде

$$Y = \psi(V_c, f, a),$$

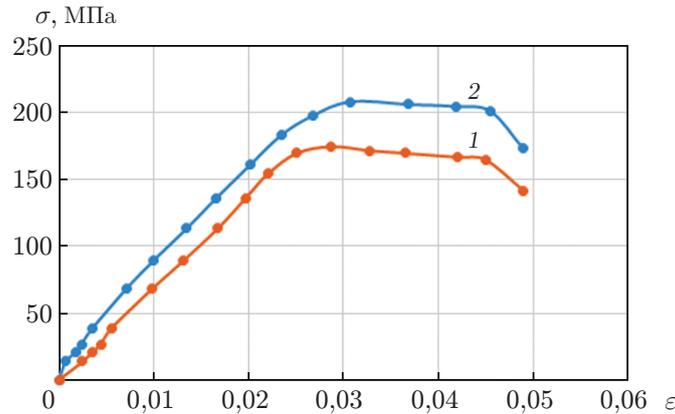


Рис. 1. Диаграмма $\sigma \sim \varepsilon$ для образцов из ММК:
1 — $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$, 2 — $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 20\%$

где Y — характеристика обрабатываемости; ψ — функция отклика. Для аппроксимации Y принимается нелинейная квадратичная модель

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=0}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j} \beta_{ij} X_i X_j,$$

где β_0 — свободный член в уравнении регрессии; β_i, β_{ii} — коэффициенты при линейных и квадратичных членах соответственно; β_{ij} — коэффициенты при слагаемых, учитывающих взаимное влияние параметров X_i .

4. Результаты исследования и их обсуждение. Свойства ММК зависят не только от размеров частиц и их массовой доли в композите, но и от их распределения в объеме и прочности соединения частиц с матрицей.

4.1. *Твердость и временное сопротивление.* Твердость определялась на полированных образцах методом Роквелла. При этом использовались стальные шарики диаметром 1/16 дюйма, которые вдавливались силой $9,8 \cdot 10^2$ Н. Среднее значение твердости HRВ металлокерамического композита с массовой долей наночастиц $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$ составило 49, среднее значение твердости металлокерамического композита с массовой долей наночастиц $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 20\%$ — 61. Массовая твердость более точно характеризует прочность металлокерамического композита. Эксперименты на растяжение образцов, изготовленных в соответствии со стандартом ASTM E-8, проводились на универсальной испытательной машине. Диаметр поперечного сечения образца равен 6 мм, длина его рабочей части — 30 мм. Образцы из металлокерамического композита с массовой долей наночастиц $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$ разрушались при нагрузке, равной 4,95 кН, образцы из металлокерамического композита с массовой долей наночастиц $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 20\%$ — при нагрузке, равной 5,9 кН. На рис. 1 представлены зависимости напряжение — деформация, полученные в экспериментах на растяжение.

Удлинение всех испытанных образцов не превышало 3,3%. Максимальное напряжение при разрушении образцов вычислялось по формуле

$$\sigma_{\max} = P_{\max}/S_{\min},$$

где P_{\max} — нагрузка, при которой разрушались образцы; $S_{\min} = (\pi/4)d^2 = (\pi/4) \cdot 6^2 = 28,27 \text{ мм}^2$ — минимальная площадь образца. Таким образом, для образцов из металлокерамического композита $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$ $\sigma_{\max} = 175,1 \text{ Н/мм}^2$, для образцов из металлокерамического композита $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 20\%$ $\sigma_{\max} = 208,7 \text{ Н/мм}^2$.

4.2. *Сканирование поверхностей образцов электронным микроскопом.* На рис. 2 приведены полученные с использованием электронного микроскопа микрофотографии металлокомпозита с массовой долей наночастиц $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$. На рис. 2,а видно, что наночастицы распределены равномерно, в то время как на рис. 2,б видны агломераты. На фотографиях не замечены поры, что свидетельствует о хорошей смачиваемости на границе наночастиц и матрицы. Вследствие трения при непрерывном перемешивании частиц порошка магния Mg и наночастиц Al_2O_3 в планетарной шаровой мельнице температура порошка композита увеличивается. Поскольку магний более активно вступает в реакцию, чем алюминий, при вступлении его в контакт с кислородом образуется тонкая пленка MgO, вследствие чего увеличивается смачиваемость композитного порошка в расплавленном сплаве алюминия.

5. Анализ результатов экспериментов по резанию композита. Проведены экспериментальные исследования влияния скорости резания V_c , скорости подачи инструмента f и глубины реза a на степень шероховатости поверхности R_a и силу резания F_z . В табл. 2 приведены значения R_a и F_z , полученные в результате 27 экспериментов по резанию нанокompозита на основе алюминиевого сплава.

Таблица 2
Экспериментальные значения степени шероховатости поверхности и силы резания

Номер эксперимента	a , мм	f , мм/об	V_c , м/мин	$\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$		$\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 20\%$	
				R_a , мкм	F_z , Н	R_a , мкм	F_z , Н
1	1,0	0,20	155	2,33	254,27	2,56	325,70
2	1,0	0,20	125	2,45	199,22	2,69	253,28
3	1,0	0,20	95	2,63	177,03	2,88	227,17
4	1,0	0,13	155	1,73	224,14	1,91	286,31
5	1,0	0,13	125	1,91	183,26	2,10	235,19
6	1,0	0,13	95	2,03	154,13	2,23	195,78
7	1,0	0,06	155	1,14	182,17	1,29	234,40
8	1,0	0,06	125	1,25	166,03	1,40	213,18
9	1,0	0,06	95	1,45	145,23	1,61	184,71
10	0,7	0,20	155	2,12	266,15	2,33	340,17
11	0,7	0,20	125	2,30	187,02	2,51	237,69
12	0,7	0,20	95	2,48	161,05	2,70	206,22
13	0,7	0,13	155	1,38	195,14	1,53	250,17
14	0,7	0,13	125	1,67	165,34	1,83	211,50
15	0,7	0,13	95	1,73	141,14	1,90	180,29
16	0,7	0,06	155	0,98	159,16	1,08	204,61
17	0,7	0,06	125	1,05	145,16	1,16	185,42
18	0,7	0,06	95	1,13	129,15	1,25	163,77
19	0,4	0,20	155	1,89	206,12	2,09	262,19
20	0,4	0,20	125	2,06	170,11	2,27	218,39
21	0,4	0,20	95	2,37	141,15	2,59	180,30
22	0,4	0,13	155	1,21	176,05	1,33	225,78
23	0,4	0,13	125	1,34	146,37	1,47	187,57
24	0,4	0,13	95	1,55	118,05	1,70	150,79
25	0,4	0,06	155	0,83	121,12	0,93	153,92
26	0,4	0,06	125	0,88	114,05	0,99	146,38
27	0,4	0,06	95	0,95	98,45	1,07	125,76

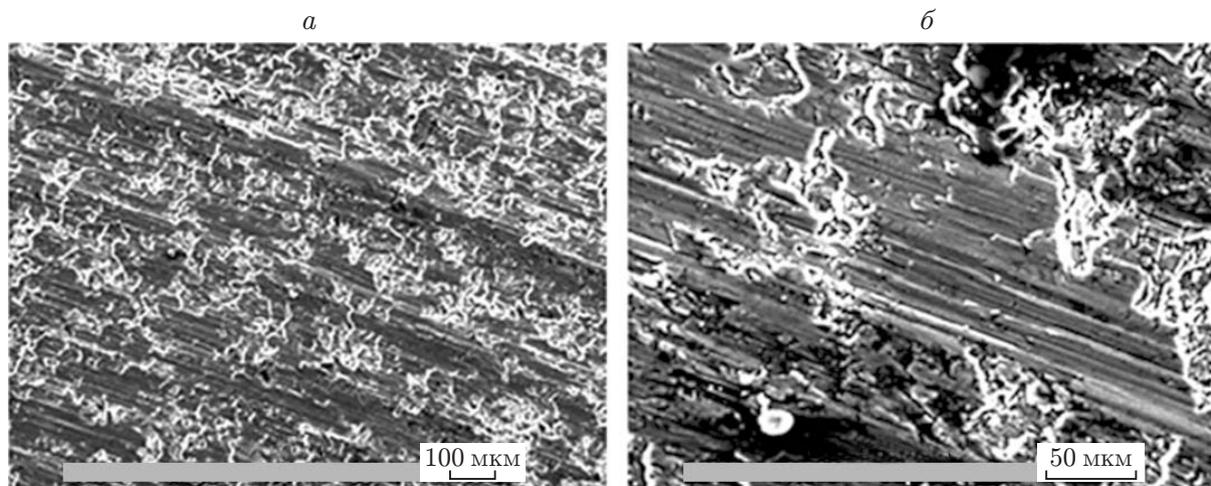


Рис. 2. Микрофотографии ММК с массовой долей наночастиц $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$:
 а — $\times 100$, б — $\times 500$

Для композита с $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$ значения степени шероховатости поверхности R_a находятся в диапазоне $0,83 \div 2,63$ мкм, значения силы резания F_z — в диапазоне $98,45 \div 266,15$ Н, для композита с $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 20\%$ $R_a = 0,93 \div 2,88$ мкм, $F_z = 125,76 \div 340,17$ Н.

5.1. *Дисперсионный анализ влияния технологических параметров на процесс резания.* С использованием статистических методов выполнен дисперсионный анализ экспериментальных данных, приведенных в табл. 2, и определена статистическая значимость различных факторов.

Установлено, что значимыми факторами, влияющими на среднеарифметическое значение степени шероховатости поверхности композита R_a с $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$ и $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 20\%$, являются скорость резания (вклад 5,009 и 4,843 % соответственно), скорость подачи инструмента (вклад 83,526 и 83,353 %), глубина реза (вклад 10,210 и 10,637 %), взаимное влияние глубины реза и скорости подачи инструмента (вклад 0,303 и 0,335 %), взаимное влияние скорости реза и скорости подачи (вклад 0,201 и 0,184 %). Статистически незначимыми параметрами для среднеарифметического значения шероховатости R_a являются слагаемые, содержащие квадрат глубины реза (вклад 0,017 и 0,016 % соответственно), произведение скорости реза и глубины реза (вклад 0,083 и 0,074 %), произведение скорости подачи инструмента и глубины реза (вклад 0,303 и 0,335 %). Как следует из приведенных данных, наиболее существенное влияние на шероховатость поверхности оказывают скорость подачи инструмента и глубина реза.

В результате дисперсионного анализа экспериментальных данных установлено, что наиболее значимым фактором, влияющим на силу резания в осевом направлении F_z , для композита с $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$ и $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 20\%$ является скорость резания (вклад 36,23 и 36,68 %). Вторым по значимости фактором является скорость подачи инструмента (вклад 31,19 и 30,12 %), следующим по значимости фактором — глубина реза (вклад 21,24 и 21,28 %). Значимость взаимного влияния скорости подачи инструмента и глубины реза составляет 0,92 и 0,93 % соответственно, взаимного влияния глубины реза и скорости реза — 0,68 и 0,82 %. Значимость взаимного влияния скорости реза и скорости подачи инструмента на силу резания F_z также является существенной и составляет 5,85 и 5,65 % соответственно.

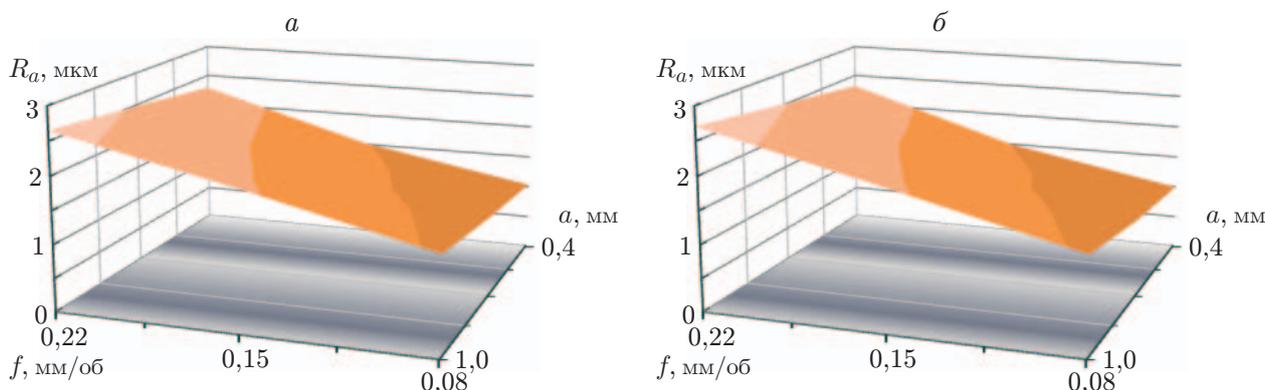


Рис. 3. Поверхность отклика для степени шероховатости R_a в координатах f, a для ММК с различной массовой долей наночастиц Al_2O_3 :
 а — $\varphi_{Al_2O_3} = 10 \%$, б — $\varphi_{Al_2O_3} = 20 \%$

5.2. *Графическое представление результатов исследования.* На рис. 3 представлены зависимости степени шероховатости поверхности от скорости подачи инструмента f и глубины реза a в виде поверхностей отклика для композита с массовой долей наночастиц Al_2O_3 10 и 20 %. Видно, что степень шероховатости поверхности увеличивается с увеличением скорости подачи инструмента, глубины реза и уменьшается с увеличением скорости резания. Эти результаты соответствуют результатам, приведенным в работах [8, 16, 17]. После обработки поверхность композита с $\varphi_{Al_2O_3} = 10 \%$ является более гладкой, чем поверхность композита с $\varphi_{Al_2O_3} = 20 \%$. Это обусловлено тем, что с увеличением массовой доли наночастиц увеличиваются твердость композита и временное сопротивление при растяжении.

При малой скорости резания V_c на конце резца образуются непрочные наросты, при этом увеличивается интенсивность разрушения стружки, в результате чего степень шероховатости обрабатываемой поверхности увеличивается. С увеличением скорости резания V_c наросты на конце резца исчезают, интенсивность разрушения стружки уменьшается, в результате уменьшается степень шероховатости обрабатываемой поверхности. Из рис. 3 следует, что степень шероховатости поверхности увеличивается с увеличением скорости подачи инструмента. Этот результат согласуется с результатом работы [8]. Увеличение степени шероховатости поверхности с увеличением скорости подачи обусловлено тем, что при этом образуются борозды геликоидальной формы. Это, в свою очередь, обусловлено формой инструмента и геликоидальным движением обрабатываемой детали. С увеличением скорости подачи ширина и глубина борозд увеличиваются, поэтому обработку деталей следует проводить при небольшой скорости подачи.

На рис. 4 приведены зависимости силы резания F_z от скорости подачи инструмента и глубины реза в виде поверхностей отклика для композита с массовой долей наночастиц $\varphi_{Al_2O_3} = 10, 20 \%$. Видно, что сила резания F_z увеличивается с увеличением скорости резания, скорости подачи инструмента и глубины реза. Эти результаты согласуются с результатами работ [13, 15, 16].

Установлено, что для композитов с массовой долей наночастиц $\varphi_{Al_2O_3} = 10, 20 \%$ минимальная сила резания F_z имеет место при скорости подачи $f = 0,06$ мм/об, скорости резания $V_c = 95$ м/мин и глубине реза $a = 0,40$ мм. Для композита с $\varphi_{Al_2O_3} = 10 \%$ минимальное усилие равно $F_z = 99,45$ Н, для композита с $\varphi_{Al_2O_3} = 20 \%$ $F_z = 125,76$ Н. Это обусловлено тем, что с увеличением в композите доли наночастиц увеличиваются твердость композита, его динамическая прочность и временное сопротивление.

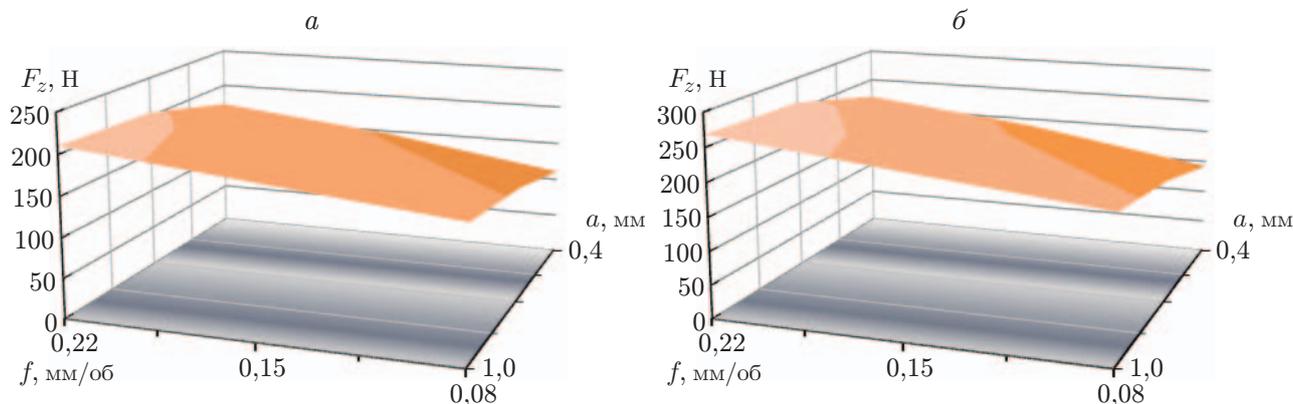


Рис. 4. Поверхность отклика для режущей силы F_z в координатах f , a для ММК с различной массовой долей наночастиц Al_2O_3 :

a — $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$, b — $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 20\%$

6. Уравнения регрессии. Для композита с $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$ получено уравнение

$$R_a = 0,558\,03 - 2,324 \cdot 10^{-3}V_c + 8,226\,19f + 0,446\,27a + 13,492\,06f^2 + 0,197\,53a^2 - \\ - 0,022\,22fV_c + 0,277\,778 \cdot 10^{-3}V_c a - 0,357\,143fa. \quad (1)$$

Аналогичное уравнение для R_a получено для композита с $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 20\%$.

Для композита с $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 20\%$ получено следующее уравнение регрессии:

$$F_z = 37,898\,59 - 0,119\,69V_c - 342,829\,93f + 194,853\,63a + 187,074\,83f^2 - 94,370\,37a^2 + \\ + 7,765\,08fV_c + 0,497\,314V_c a - 241,904\,76fa. \quad (2)$$

Аналогичное уравнение для F_z получено для композита с $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$.

Используя уравнения (1), (2), можно рассчитать степень шероховатости поверхности и усилие резания для любой комбинации технологических параметров резания. Это обусловлено тем, что уровни факторов находятся в диапазонах, приведенных в табл. 2. Полученные с использованием предложенной модели значения степени шероховатости поверхности и силы резания близки к экспериментальным значениям и определены с доверительной вероятностью 95 %.

7. Оптимизация технологических параметров резания и достоверность полученных результатов. Определены оптимальные параметры обработки на токарном станке образцов из ММК, обеспечивающие минимальные силы резания F_z и степень шероховатости поверхности R_a . Для композитов с $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10, 20\%$ получены следующие значения: скорость подачи инструмента $f = 0,06$ мм/об, скорость резания $V_c = 155$ м/мин, глубина реза $a = 0,40$ мм. При таких значениях параметров обработки для композита с массовой долей наночастиц $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$ $R_a = 0,7521$ мкм, для композита с $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 20\%$ $R_a = 0,8443$ мкм. Эти значения близки к экспериментальным значениям, равным 0,83 и 0,93 мкм соответственно.

Оптимальные параметры обработки, обеспечивающие минимальное усилие резания F_z , для обоих рассматриваемых композитов имеют следующие значения: $f = 0,06$ мм/об, $V_c = 95$ м/мин, $a = 0,40$ мм. При таких значениях параметров обработки для композита с $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$ $F_z = 99,55$ Н, для композита с $\varphi_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 20\%$ $F_z = 126,83$ Н. Эти значения близки к экспериментальным значениям, равным 98,40 и 125,76 Н соответственно.

Заключение. Исследована обрабатываемость металлокомпозиата, представляющего собой алюминиевый сплав марки LM25 с массовой долей наночастиц оксида алюминия Al_2O_3 10 и 20 %. С использованием метода дисперсионного анализа определены скорость резания, скорость подачи инструмента и глубина реза, обеспечивающие оптимальные значения степени шероховатости поверхности и силы резания. Найденные значения параметров близки к экспериментальным значениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ansary Y. A., Montazerianb M., Abdizadehb H., Baharvandic H. R.** Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy matrix composite reinforced with nanoparticle MgO // *J. Alloys Compounds*. 2009. V. 484, N 1/2. P. 400–404.
2. **Hashim J., Looney L., Hashmi M. S. J.** Metal matrix composites: production by the stir casting method // *J. Materials Process. Technol.* 1999. V. 92/93. P. 1–7.
3. **Kok M.** Production and mechanical properties of Al_2O_3 particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites // *J. Materials Process. Technol.* 2005. V. 161, N 3. P. 381–387.
4. **Mazaherya A., Abdizadeha H., Baharvandib H. R.** Development of high performance A356/nano- Al_2O_3 composites // *J. Material Sci. Engng.* 2009. V. 518, N 1/2. P. 61–64.
5. **Hai S., Wenli G., Hui Z., et al.** Optimization of stirring parameters through numerical simulation for the preparation of aluminum matrix composite by stir casting process // *ASME. J. Manufactur Sci. Engng.* 2010. V. 132, N 6. P. 1–7.
6. **Adel M. H., Mohammed A., Tarek Q., Ahmed G.** Effect of processing parameters on friction stir welding aluminium matrix composites wear behavior // *Materials Manufactur Process.* 2012. V. 27, N 12. P. 1419–1423.
7. **Rana R. S., Rajesh P., Das S.** Review of recent studies in Al matrix composites // *Sci. Engng Res.* 2012. V. 3, N 6. P. 1–16.
8. **Kilickap E., Cakir O., Aksoy M., Inan A.** Study of tool wear and surface roughness in machining of homogenised SiC-p reinforced aluminium metal matrix composite // *J. Materials Process. Technol.* 2005. V. 164/165. P. 862–867.
9. **Mileiko S. T.** High-temperature metal matrix composites // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2014. V. 55, N 1. P. 136–146.
10. **Farhadinia F., Sedghi A., Nooghani M. T.** Properties of an Al / ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiB}_2 + \text{ZrB}_2$) hybrid composite manufactured by powder metallurgy and hot pressing // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2017. V. 58, N 3. P. 454–460.
11. **Palanikumar K., Karthikeyan R.** Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of Al/SiC particulate composites // *J. Materials Design.* 2007. V. 28, N 5. P. 1584–1591.
12. **Chiang K. T.** Modeling and analysis of the effects of machining parameters on the performance characteristics in the EDM process of $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ mixed ceramic // *Intern. J. Adv. Manufactur Technol.* 2008. V. 37, N 5/6. P. 523–533.
13. **Uday A. D., Harshad A. S., Suhas S. J.** Cutting forces and surface roughness in machining Al/SiCp composites of varying composition // *Materials Sci. Technol.* 2010. V. 14, N 2. P. 258–274.
14. **Suresh S. M., Debadutta M., Srinivasan A., et al.** Production and characterization of micro and nano AlO particle-reinforced LM25 aluminium alloy composites // *ARNP J. Engng Appl. Sci.* 2011. V. 6, N 6. P. 94–98.
15. **Arunachalam R. M., Ramesh S., Senthilkumar J. S.** Machining performance study on metal matrix composites-A response surface methodology approach // *Amer. J. Appl. Sci.* 2012. V. 9, N 4. P. 478–483.

16. **Mohamed A. T., Nahed A. E., Ahme M. E.** Some experimental data on workability of aluminium-particulate-reinforced metal matrix composites // *J. Materials Process. Technol.* 2008. V. 202. P. 1–3.
17. **Rajesh K. B., Sudhir K., Das S.** Effect of machining parameters on surface roughness and tool wear for 7075 Al alloy SiC composite // *Intern. J. Adv. Manufactur. Technol.* 2010. V. 50, N 5-8. P. 459–469.
18. **Chinmaya R. D., Yung C. S.** Modeling of machining of composite materials: A review // *Intern. J. Mach. Tools Manufactur.* 2012. V. 57. P. 102–121.

*Поступила в редакцию 1/IX 2017 г.,
после доработки — 7/V 2018 г.
Принята к публикации 28/V 2018 г.*
