
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.9.02

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ ПРИ ТОЧЕНИИ ЗАГОТОВКИ ИЗ АЛЮМОМАТРИЧНОГО ЛИТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

© 2024 г. А. И. Пронин¹, В. В. Мыльников², *, Д. А. Валько¹, А. А. Вороной¹,
М. В. Мыльникова², Н. А. Рябов²

¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия

²Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Россия

*e-mail: mrmynikov@mail.ru

Поступила в редакцию 17.10.2023 г.

После доработки 24.03.2024 г.

Принята к публикации 19.04.2024 г.

В статье представлено решение задачи определения составляющих силы резания и температуры резания при точении алюмоматричного литого композиционного материала. В качестве параметра оптимизации приняты составляющие силы резания и температура резания при обработке алюмоматричного литого композиционного материала твердым сплавом. Исследования проводили на специально сконструированной для этих целей экспериментальной установке, состоящей из токарного станка и стенда для регистрации, контроля и анализа динамических процессов, в виде сигнала от резца, при проведении токарной обработки. Проведена компьютерная и математическая обработка методом наименьших квадратов полученных результатов, которая позволила вывести расчетные формулы для определения значений исследуемых факторов. Определены оптимальные значения факторов, соответствующие оптимальным значениям составляющих силы резания, и соответствующие им значения температуры резания.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, твердый сплав, композиционный материал, скорость резания, подача резания, глубина резания, сила резания, температура резания

DOI: 10.31857/S0235711924040041, EDN: OZJHSS

Наилучшую результативность механической обработки деталей машин и изделий с достижением минимальной себестоимости и максимального экономического эффекта на производстве можно получить лишь при условии оптимальных соотношений технологического процесса в конкретно заданных условиях обработки [1–5]. Выбор предпочтительных параметров и выявление диапазонов их значений с результативными комплексными показателями эффективности механической обработки материалов является одной из приоритетных задач решения параметрической оптимизации технологических процессов. Особая актуальность таких задач выходит на передний план при оптимизации параметров обработки новых современных малоизученных материалов нового поколения [6–9].

Упрочненные алюминиевые сплавы относятся к новому классу конструкционных материалов. По сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами они

имеют более высокие механические и эксплуатационные свойства [7, 8]. Способ их получения литье в кокиль, или прессование по технологии порошковой металлургии. Заготовки из упрочненных алюминиевых сплавов нуждаются в последующей лезвийной обработке. Этот процесс недостаточно изучен и требует дополнительных исследований физических процессов, протекающих в зоне резания. Настоящее исследование посвящено одному из таких процессов, который является одним из основных для определения режимных параметров обработки. Зная силы, действующие в процессе резания, можно рассчитать деформационные процессы в зоне формообразования, выбрать режущий инструмент, определить мощность, затрачиваемую на резание, а также осуществлять рациональную эксплуатацию станка и инструмента. Одним из ключевых шагов к повышению эффективности и устойчивости процесса обработки алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных дисперсными частицами Al_2O_3 является оптимизация параметров обработки [9, 10].

Представленные параметры точения не соответствуют чистовым и получистовым режимам, применяемым при изготовлении деталей из алюмоматричных композиционных материалов. В связи с этим, целью исследований являются переходы технологических операций механической обработки, которые применяются для данного класса материалов.

Цель исследования определить параметры обработки: составляющие силы и температуру резания соответствующие режимам обработки, которые рассчитаны по эмпирическим зависимостям и определить оптимальные параметры обработки алюмоматричного литого композиционного материала.

Выбор факторов эксперимента. Предварительный анализ режимов токарной обработки позволил определить наиболее значимые факторы, оказывающие существенное влияние на силу и температуру резания, тем самым значительно сократить временные затраты в реализации поставленной цели. В общем случае на исследуемые параметры оказывают следующие группы факторов: 1) геометрические размеры применяемых режущих пластин; 2) износ режущего инструмента; 3) основные параметры режимов токарной обработки; 4) твердость материала, по которому производили процесс резания; 5) смазочно-охлаждающая технологическая среда.

Для решения поставленной задачи: 1) пластины использовали массово производимые в соответствии с ГОСТ заводом-изготовителем, где геометрические размеры являются стандартизированными, т.е. на результаты в исследовании влияния не оказывают; 2) износ принят постоянным. Кроме того, в настоящем исследовании для полного исключения влияния износа на динамику изменения силы и температуры резания в процессе твердого точения было до минимума сокращено время контакта режущей поверхности пластины с поверхностью заготовки; 3) исходя из опыта ранее выполненных работ в качестве контролируемых параметров были выбраны скорости подачи и резания при фиксированной глубине резания; 4) твердость обрабатываемых заготовок была принята как постоянный фактор, не влияющий на результаты исследования.

С целью обеспечения необходимой идентичности условий и достоверности получаемых результатов измерение значений исследуемых факторов производили на заготовках с одинаковыми диаметрами.

Методика проведения исследования. Исследования проводили на специально сконструированной для этих целей экспериментальной установке, состоящей из токарного станка марки 16K20Ф3С32 и стенда *STD.201-2* для регистрации, контроля и анализа динамических процессов, в виде сигнала от резца, при проведении токарной обработки. Динамометр, смонтированный в конструкции данного стенда, служит для замера составляющих силы резания: F_x – осевая, F_y – радиальная,

F_z — тангенциальная и имеет измерительный преобразователь, передающий сигналы динамических нагрузок на блок управления. Такой блок используется в качестве платы сбора данных электросигналов с датчиков *STD201-2* и форматирует в *high-speed USB2.0* с последующей передачей на порт *USB ПЭВМ*.

В качестве испытуемого инструмента использовали проходной резец с механическим креплением сменных многогранных пластин (СМП). Державка резца сечением 20×20 мм. Геометрические параметры резца: передний угол $\gamma = -7^\circ$; задний угол $\alpha = 5^\circ$; угол наклона режущей кромки $\lambda = 0^\circ$. Материал СМП — ВК8 (92%WC + 8%Co). Форма СМП трехгранная ГОСТ 19042–80 (ИСО 1832-85) с обозначением ТВЕА15, 880408RMT. Теплопроводность материала режущей части инструмента $\lambda_p = 50.2$ Вт/(м·°C).

В качестве материала заготовок для проведения исследований использовался дисперсно-упрочненный алюминиевый сплав. Заготовка диаметром 32.5 мм и длиной 60 мм.

Диапазон скоростей резания и подач для обработки был рассчитан по эмпирическим формулам [11].

Последовательность эксперимента состояла из следующих этапов: 1) заготовку устанавливали и зажимали в патроне станка 16К20Ф3С32; 2) перед каждым экспериментом заменяли режущую кромку пластины с целью снижения влияния ее износа на экспериментальные значения; 3) проводили измерения силы и температуры резания, для этого использовали динамометр и пирометр *Testo 835-T2*.

Результаты экспериментов. Проводили три серии экспериментов. Первая серия экспериментов выполнялась с фиксированной скоростью подачи и резания при изменении глубины резания. Вторая серия экспериментов выполнялась при фиксированных значениях глубины и скорости резания при изменении скорости подачи. Третья серия экспериментов выполнялась при фиксированных значениях глубины и скорости подачи при изменении скорости резания. Во всех трех сериях экспериментов определяли значения силы F_x , F_y , F_z и температуры T . В каждой серии осуществляли по 4 этапа исследований с одинаковым приращением на пяти значениях изменяемых параметров.

Экспериментально полученные данные были сведены в табл. 1.

При проведении исследований первой серии экспериментов с постоянной скоростью подачи, составляющей 0.15 мм/об и скорости резания, равной 118 м/мин, при изменении глубины резания от 0.2 до 2.5 мм наблюдали монотонное увеличение, как температуры, так и всех составляющих F_x , F_y , F_z силы резания. При увеличении глубины резания от 0.2 до 2.5 мм сильнее всего наблюдался рост радиальной F_y составляющей силы резания, что подтверждает результаты, представленные в работах [5, 6, 12]. Величина этой составляющей силы резания возросла в 5.3 раза. При том же изменении глубины резания величина осевой F_x и тангенциальной F_z составляющей силы резания увеличилась в среднем в 2.3 раза, а значение температуры в 1.6 раза.

Во второй серии экспериментов при постоянной глубине резания, равной 0.5 мм, и скорости резания, равной 118 м/мин, при изменении скорости подачи от 0.05 до 0.3 мм/об с приростом на одинаковое значение, составляющее 0.1 мм/об на первых трех этапах эксперимента и 0.05 мм/об на четвертом этапе эксперимента наблюдали монотонное увеличение как температуры, так и всех составляющих F_x , F_y , F_z силы резания. При увеличении скорости подачи от 0.05 мм/об до 0.3 мм/об сильнее всего наблюдался рост радиальной F_y составляющей силы резания — в 3.75 раза. При том же изменении скорости подачи величина осевой F_x и тангенциальной F_z составляющих силы резания увеличилась в среднем в 3 раза, а значение температуры — в 2.2 раза.

Таблица 1. Результаты эксперимента

Номер серии эксперимента	t , мм	S_0 , мм/об	n , мин ⁻¹	V , м/мин	F_x , Н	F_y , Н	F_z , Н	T , °С
1	0.2	0.15	1250	118	8	3	15	61
	0.5				9	6	21	78
	1.0				14	10	29	85
	2.5				19	16	34	99
2	0.5	0.05	1250	118	6	4	10	45
		0.15			9	6	21	78
		0.25			14	10	27	91
		0.30			17	15	32	98
3	0.5	0.15	800	75	12	13	28	69
			1000	94	11	10	25	73
			1250	118	9	6	21	79
			1600	151	8	6	19	99

При испытаниях в третьей экспериментальной серии при постоянной глубине резания, равной 0.5 мм, и скорости подачи, равной 0.15 мм/об, при изменении скорости резания от 75 до 151 м/мин наблюдали монотонное уменьшение всех составляющих F_x , F_y , F_z силы резания при этом происходило увеличение температуры. При увеличении скорости резания от 75 до 151 м/мин сильнее всего наблюдалось уменьшение радиальной F_y составляющей силы резания в 2.1 раза, а значение температуры возросло в 1.4 раза.

Обработка экспериментальных результатов. Полученные результаты (табл. 1) подвергли компьютерной обработке, для этого применили программу “Microsoft Office Excel”, в которой выполнили графическое построение полученных зависимостей, составляющих F_x , F_y , F_z силы резания и температуры T , представленных на рис. 1, 2 и 3.

На рис. 1 изображены полученные в ходе экспериментов зависимости температуры T и составляющих F_x , F_y , F_z силы резания от глубины резания t . Откуда видим, что с увеличением t возрастает F_x , F_y , F_z и, следовательно, количество выделяющейся теплоты. При $t = 2.5$ мм наблюдается самые большие значения составляющих силы резания F_x , F_y , F_z и температуры T .

На рис. 2 изображены полученные в ходе экспериментов зависимости температуры T и составляющих F_x , F_y , F_z силы резания от скорости подачи S_0 . Откуда видим, что с увеличением S_0 возрастают F_x , F_y , F_z и, следовательно, количество выделяющейся теплоты. При $t = 2.5$ мм наблюдается самые большие значения составляющих силы резания F_x , F_y , F_z и температуры T .

На рис. 3 изображены полученные в ходе экспериментов зависимости температуры T и составляющих F_x , F_y , F_z силы резания от скорости резания V . Откуда видим, что с увеличением V уменьшаются F_x , F_y , F_z , при этом температура резания увеличивается. При $V = 118$ м/мин наблюдается самые минимальные значения составляющих силы резания F_x , F_y , F_z и самая максимальная температура T .

На основании полученных экспериментальных данных и построенных графиков проводили математическую обработку полученных результатов, используя метод наименьших квадратов, которая позволила вывести расчетные формулы (табл. 2) для определения значений исследуемых факторов.

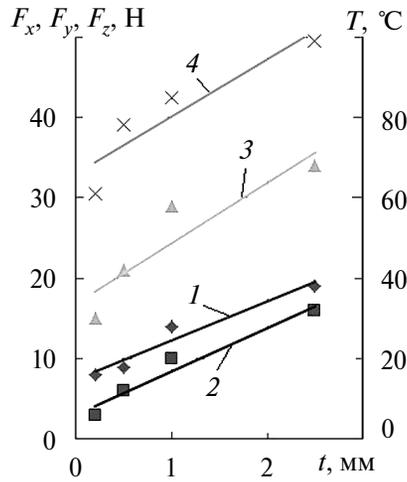


Рис. 1. Зависимости: 1 – $F_x(t)$; 2 – $F_y(t)$; 3 – $F_z(t)$; 4 – $T(t)$ при: $V = 118$ м/мин; $S_0 = 0.15$ мм/об; $\gamma = -7^\circ$, $\varphi = 90^\circ$, $h_s = 0$.

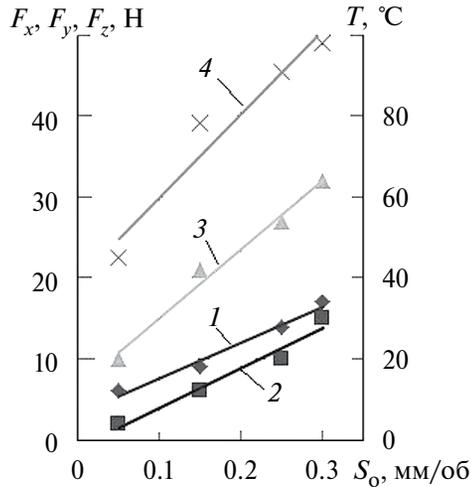


Рис. 2. Зависимости: 1 – $F_x(S_0)$; 2 – $F_y(S_0)$; 3 – $F_z(S_0)$; 4 – $T(S_0)$ при: $V = 118$ м/мин; $t = 0.5$ мм; $\gamma = -7^\circ$; $\varphi = 90^\circ$; $h_s = 0$.

Выводы. 1. Наиболее влияющим фактором на составляющие силы резания является глубина резания t , при ее изменении от 0.2 до 2.5 мм, составляющие силы резания в среднем возрастают в 2.3–5.3 раза. При увеличении глубины резания соответственно увеличивается площадь срезаемого слоя $t \times S_0$ и объем деформируемого материала. **2.** Не менее важным режимным параметром является подача на оборот S_0 , при ее изменении от 0.05 до 3.0 мм/об составляющие силы резания в среднем возрастают от 3.0 до 3.75 раза. При увеличении подачи также увеличивается площадь срезаемого слоя. Замедление роста составляющих силы резания при увеличении подачи объясняется тем, что при увеличении подачи соответственно увеличивается толщина среза; известно, что с увеличением толщины среза уменьшается деформация в зоне

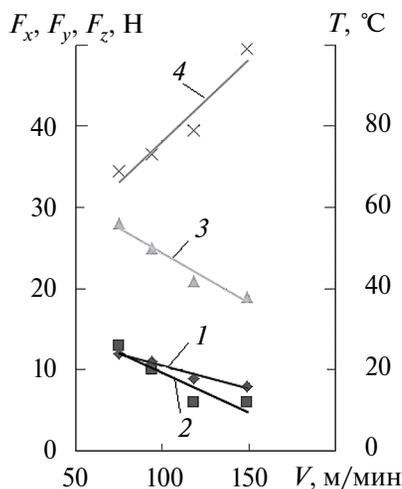


Рис. 3. Зависимости: 1 – $F_x(V)$; 2 – $F_y(V)$; 3 – $F_z(V)$; 4 – $T(V)$ при $S = 0.15$ мм/об; $t = 0.5$ мм; $\gamma = -7^\circ$; $\varphi = 90^\circ$; $h_s = 0$.

Таблица 2. Расчетные формулы для определения T и F_x, F_y, F_z

Режимы резания			Формула для определения $T, ^\circ\text{C}$	Формула для определения F_x, F_y, F_z, H		
$V, \text{ м/мин}$	$S_0, \text{ мм/об}$	$t, \text{ мм}$		F_x	F_y	F_z
118	0.15	0.2–2.5	$T = 14.2t + 65.8$	$F_x = 4.8t + 7.4$	$F_y = 5.4t + 3.1$	$F_z = 7.5t + 16.9$
118	0.05–0.3	0.5	$T = 206.1S + 39.4$	$F_x = 44.1S + 3.2$	$F_y = 49.2S - 1$	$F_z = 84.8S + 6.6$
75–151	0.15	0.5	$T = -0.4V + 134.5$	$F_x = -0.06V + 16.1$	$F_y = -0.1V + 19.4$	$F_z = -0.12V + 36.7$

резания. Это и приводит к замедлению роста составляющих силы резания. 3. Менее значимым фактором является скорость резания V , при изменении скорости от 75 до 151 м/мин при постоянных S_0 и t , составляющие силы резания уменьшаются в среднем в 1.2 раза. Причину такого уменьшения можно объяснить уменьшением ширины стружки с увеличением скорости резания. Другим фактором, который уменьшает составляющие силы резания, является увеличение угла сдвига с увеличением скорости резания. Большой угол сдвига приводит к снижению усилий сдвига в зоне первичного сдвига. Третьей причиной снижения составляющих силы резания может быть термическое размягчение алюминиевой матрицы, которое происходит с повышением температуры резания. 4. Количество тепла, выделяемого при механической обработке алюмоматричного композиционного материала, больше, чем тепло, выделяемое в некомпозитном материале. Предпочтительным диапазоном скорости резания, на токарном станке обеспечивающим устойчивый процесс резания и качество обработанной поверхности, является 120–150 м/мин. При этих скоростях снижаются, вырыв твердой фазы композиционного материала и шероховатость обработанной поверхности до $R_a 1.25$. 5. С увеличением глубины и скорости подачи возрастают составляющие силы резания и, следовательно, количество выделяющейся теплоты.

Но составляющая силы резания возрастает в меньшей степени, чем увеличивается подача, и потому прирост тепла отстает от роста подачи. При этом центр давления стружки на резец отдалается от режущей кромки и увеличивается площадь соприкосновения стружки с резцом, поэтому улучшаются условия теплоотвода. 6. С ростом скорости резания увеличивается количество выделяющейся теплоты. При этом возрастает и температура резания, т.к. условия теплоотвода остаются практически неизменными. Однако прирост температуры отстает от увеличения скорости резания.

Финансирование работы. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20009, <https://rscf.ru/project/22-13-20009/>

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stephenson D. A., Agapiou J. S.* Metal Cutting Theory and Practice. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2005. 864 p.
2. *Ashley S.* High – speed machining goes mainstream // Mechanical Engineering. 1995. № 5. P. 56.
3. *Боровский Г. В., Григорьев С. Н., Маслов А. П.* Современные технологии обработки материалов. М.: Машиностроение, 2015. 304 с.
4. *Plaza M.* The prons and cons of high-speed machining // Canadian Machinery and Metalworking. 1995. September. P. 8.
5. *Schulz H., Moriwaki T.* High – speed machining // CIRP Annals. 1992. V. 41 (2). P. 637.
6. *Грубый С. В.* Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 149 с.
7. *Чернышова Т. А. и др.* Дисперсно-наполненные композиционные материалы для пар трения скольжения // Конструкции из КМ. 2007. № 3. С. 38.
8. *Мыльников В. В., Пронин А. И., Мыльникова М. В., Романова Е. А., Шетулов Д. И.* Исследование теплофизических процессов получения различных алюмоматричных композитов // Журнал технической физики. 2023. Т. 93. № 1. С. 29.
9. *Макаров А. Д.* Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
10. *Saravanan T., Udayakumar R.* Optimization of machining hybrid metal matrix composites using desirability analysis // J. Sci. Res. 2013. V. 15. № 12. P. 1691.
11. *Даниленко Б. Д.* Выбор режимов резания при токарной обработке алюминиевых сплавов резами с СМП при работе на станках с ЧПУ // Машиностроитель. 2010. № 7. С. 17.
12. *Плотников А. Л., Таубе А. О.* Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ: Монография. Волгоград: РПК “Политехник”, 2003. 184 с.