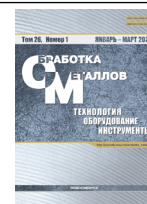




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov







Особенности расчета температуры резания при высокоскоростном фрезеровании алюминиевых сплавов без применения СОЖ

Дмитрий Губин^{1, а}, Антон Кисель^{2, b, *}

¹ Омский государственный технический университет, пр. Мира, 11, г. Омск, 644050, Россия

² Калининградский государственный технический университет, Советский пр., 1, г. Калининград, 236022, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0003-1825-1310>,  gubin.89@list.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-8014-0550>,  kisel1988@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914.1

История статьи:

Поступила: 19 октября 2023

Рецензирование: 16 ноября 2023

Принята к печати: 22 января 2024

Доступно онлайн: 15 марта 2024

Ключевые слова:

Температура резания
Высокоскоростное фрезерование
Алюминиевый сплав
Гомологическая температура
Тепловизор
Прогнозирование
Удельная работа
Предел текучести

АННОТАЦИЯ

Введение. Расчет температуры при высокоскоростном фрезеровании алюминиевых сплавов представляет интерес, поскольку температура может выступать как один из основных ограничивающих факторов при выборе рациональных режимов фрезерования. Особенно это актуально при фрезеровании тонкостенных изделий, применяемых в авиакостроении, поскольку высокие температуры могут привести к местному короблению конструкции. Контроль температурного фактора в производственных условиях не представляется возможным, в связи с чем возникает необходимость в разработке математической модели расчета температуры. **Целью работы** является разработка методики прогнозирования температуры резания при высокоскоростном фрезеровании заготовок из алюминиевых сплавов для условий резания, в которых нет возможности применять СОЖ. **Методы.** В данной статье представлены экспериментальные исследования температуры резания при высокоскоростном фрезеровании заготовок из алюминиевого сплава без применения СОЖ с помощью бесконтактных методов измерения температуры. Полученные результаты использовались для определения коэффициентов, подставляемых в формулы для расчета температур на передней и задней поверхностях режущего лезвия. **Результаты и обсуждение.** По результатам экспериментальных испытаний и теоретического моделирования был составлен график температур. Сопоставление экспериментальных исследований фрезерования алюминиевого сплава Д16Т при изменении условий резания (изменялась скорость резания) с теоретическими данными дало удовлетворительный результат. Средняя относительная погрешность при сравнении экспериментальных данных с теоретическими составляет 6,05 %. На основе экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что сопоставление экспериментальных данных измерения температур резания удовлетворительно согласуется с предложенной методикой теоретического расчета температур. Достоинством данной методики является то, что она позволяет без проведения трудоемких и затратных экспериментальных исследований теоретически рассчитать (спрогнозировать) температуры на передней и задней поверхностях режущего лезвия, а также температуру резания для тех узких условий фрезерования, где невозможен эффективный отвод тепла из зоны резания. Методику также можно применить для фрезерования алюминиевых сплавов, механические и теплофизические свойства которых различаются.

Для цитирования: Губин Д.С., Кисель А.Г. Особенности расчета температуры резания при высокоскоростном фрезеровании алюминиевых сплавов без применения СОЖ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 38–54. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-38-54.

Введение

Для процесса высокоскоростного фрезерования металлов характерна высокая интенсивность тепловыделения. Определение максимального значения температуры и ее распределения по режущим поверхностям инструмента имеет

большое значение, поскольку она влияет на выбор режимов резания, стойкость инструмента и качество обработанной поверхности детали [1–3]. Таким образом, максимальные значения температуры при определении стратегии обработки выступают как один из основных ограничивающих факторов резания. Механизм возникновения теплоты при резании достаточно сложен, однако можно выделить три основных фактора: пластическую деформацию материала, неоднородный сдвиг и трение стружки об переднюю поверхность инструмента, а также трение

*Адрес для переписки

Кисель Антон Геннадьевич, к.т.н., доцент
Калининградский государственный технический университет
Советский пр., 1,
236022, г. Калининград, Россия
Тел.: +7 999 458-08-25, e-mail: kisel1988@mail.ru

задней поверхности инструмента об обрабатываемый материал заготовки. Тепло, вызванное этими процессами, разогревает материал стружки до температуры 350–450 °С [4–7] (этот диапазон температур характерен для фрезерования алюминиевых сплавов). Образовавшееся тепло распространяется в заготовку и инструмент со скоростью, которая во многом зависит от физических характеристик обрабатываемого материала [8, 9].

Распределение тепла в зоне резания можно разделить на два участка: температуру на передней поверхности, зависящую от подачи и геометрии режущего лезвия (передний угол, угол наклона режущей кромки, угол в плане, угол подъема винтовой канавки и др.), и температуру на задней поверхности, зависящую от количества оборотов и ширины фаски износа.

Расчет контактных температур на передней и задней поверхностях инструмента, а также температуры резания режущего лезвия для фрезерования алюминиевых сплавов базируется:

- на изменении механических свойств (предел прочности, относительное удлинение) при повышенных температурах испытания;
- учете совместного воздействия таких процессов, как деформация и скорость деформации, на изменение значения предела текучести;
- учете теплофизических характеристик обрабатываемого материала (коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, теплоемкость), а также плотности материала.

Расчет температуры при высокоскоростном фрезеровании алюминиевых сплавов представляет интерес, поскольку температура является ограничивающим фактором при выборе стратегии обработки. Так, например, при фрезеровании вафельного профиля внутри топливного бака для ракетополетов нет возможности применять смазочно-охлаждающую жидкость (СОЖ). Толщина внешней стенки топливного бака составляет 2–3 мм [7, 10, 11].

При таком процессе фрезерования температура на поверхностях режущего лезвия выступает в качестве ограничивающего фактора, поскольку перегрев может привести к местному короблению конструкции [12–14]. Контроль температурного фактора в производственных условиях не представляется возможным, поэтому необходимо рассчитать рациональные режимы

фрезерования, при которых температура резания не превышает допустимых значений [9, 15].

В связи с вышеизложенным возникает необходимость в разработке математической модели для высокоскоростного фрезерования алюминиевых сплавов, которая в первом приближении учитывает совместное влияние температуры, скорости деформации и величины деформации на изменение значения предела текучести обрабатываемого алюминиевого сплава. Полученная модель позволит рассчитать температуры на различных поверхностях режущего инструмента, а также температуру резания в условиях высокоскоростного фрезерования для случаев, где нет возможности применять СОЖ.

Целью работы является разработка методики расчета температуры резания при высокоскоростном фрезеровании заготовок из алюминиевых сплавов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) составить определяющее уравнение для удельной работы деформации при резании;
- 2) решить определяющее уравнение и найти его точки экстремума, которые являются источниками тепла;
- 3) вывести теоретические зависимости, позволяющие расчетным путем определить температуру в зоне резания при высокоскоростном фрезеровании заготовок из алюминиевых сплавов;
- 4) провести экспериментальные исследования по определению температуры резания при заданных параметрах;
- 5) сравнить полученные теоретические и экспериментальные данные и сделать вывод о точности прогнозирования температуры резания расчетным способом.

Методика исследований

Определяющее уравнение для расчета температуры представляет собой зависимость изменения предела прочности обрабатываемого материала от трех составляющих факторов, возникающих при резании (фрезеровании): температуры, деформации и скорости деформации. Каждый из этих факторов будет рассмотрен отдельно и обоснован.

В условиях малых деформаций (например, при растяжении или сжатии) и незначительных

изменениях температуры и скорости деформации изменение предела текучести можно описать законом простого нагружения [16, 17]:

$$\sigma_T(\varepsilon) = \sigma_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m, \quad (1)$$

где ε_0 – деформация, соответствующая напряжению σ_0 ; ε – текущее значение деформации; m – коэффициент деформационного упрочнения, равный $0,3T'$ (где T' – гомологическая температура обрабатываемого материала).

Однако уравнение (1) не может быть использовано для определения предела текучести для высокодинамичных процессов резания (к которым относится высокоскоростное фрезерование) ввиду того, что оно не учитывает влияния изменений температуры деформации и скорости деформации на изменение величины предела текучести. Кроме того, температура деформации и скорость деформации оказывают совместное влияние на изменение величины предела текучести, а не являются свободными множителями, как это утверждается в ряде работ [18, 19].

Влияние температуры и скорости деформации в различных уравнениях по моделированию изменения предела текучести учитывается введением соответствующих множителей. В частности, в настоящее время наиболее популярная модель пластичности Джонсона – Кука, определяющая поведение материала при упрочнении, учитывает влияние скорости деформации на изменение предела текучести с помощью коэффициента динамичности K_ε [17, 20].

Однако в уравнении Джонсона – Кука коэффициент динамичности не зависит от изменения

температуры [21], в то время как экспериментальные данные, полученные рядом ученых [16, 22, 23], подтверждают совместное влияние скорости деформации и температуры на коэффициент динамичности (рис. 1).

На графике (рис. 1) представлены эмпирические результаты, описывающие влияние на значение коэффициента динамичности таких факторов, как скорость деформации и гомологическая температура, а также аппроксимированные для тех же условий значения для модели пластичности Джонсона – Кука [21]. В опытах скорость деформации изменялась в 1000 и 2000 раз, а изменение гомологической температуры достигалось за счет различных материалов обработки (медь, сталь, свинец, алюминий).

Для исследования была выбрана группа алюминиевых сплавов Д16Т, АМг6 и 2024-Т3, поскольку они обладают близкими физическими свойствами и могут применяться для изготовления топливных баков в авиаракетостроительной отрасли.

Проводимые в настоящем исследовании расчеты выполнялись на основе зависимостей изменения действительного предела прочности от температуры при высокотемпературных испытаниях алюминиевых сплавов (табл. 1) [18, 19].

На основании табл. 1 были построены графики зависимости изменения предела прочности от температуры испытания (рис. 2).

Полученные графики были аппроксимированы с помощью экспоненциальной кривой с точностью 0,9351 для сплава Д16Т и 0,9544 для сплава АМг6М, что дает удовлетворительные результаты. Экспоненциальная экстраполя-

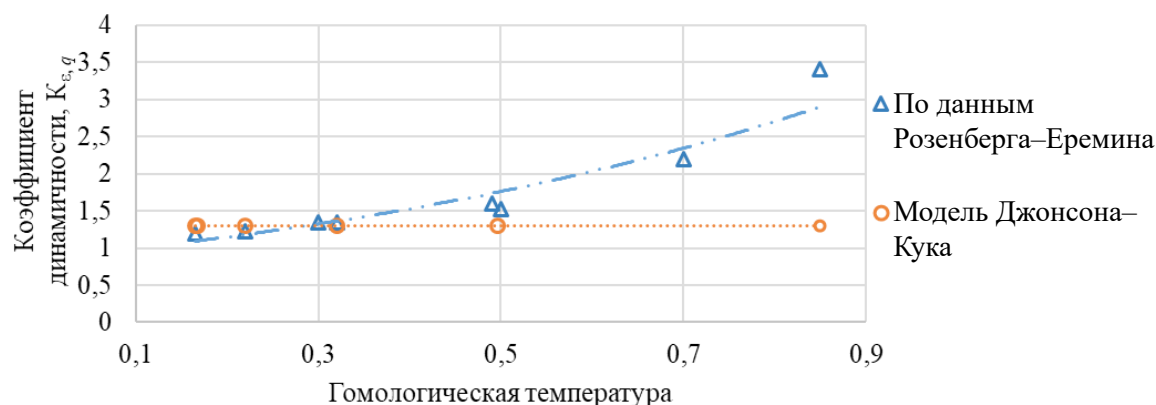


Рис. 1. Зависимость коэффициента динамичности от гомологической температуры [21, 24]

Fig. 1. Dependence of the dynamic factor on the homologous temperature [21, 24]

Таблица 1

Table 1

Прочностные и температурные характеристики, полученные при испытаниях на монотонное растяжение образцов из алюминиевых сплавов

Strength and temperature characteristics obtained during monotonic tensile tests of aluminum alloy specimens

Материал (алюминие- вый сплав)	Темпе- ратура испы- тания t , °C	Предел проч- ности σ_b , МПа	Относи- тельное удлинение δ , %	Действи- тельный предел прочности S_b , МПа	Прира- щение гомологической темпера- туры	Отношение действи- тельного предела прочности при ком- натной температуре к действительному пределу прочности при температурном испытании
Д16Т*	20	460	19	523,6	0,31	1
	150	380	19	452,2	0,45	0,86
	200	330	11	366,3	0,5	0,7
	250	220	13	248,6	0,56	0,47
	300	150	13	169,5	0,61	0,32
АМг6М*	20	320	0,24	396,8	0,32	1
	100	300	0,3	390	0,4	0,98
	150	250	0,37	342,5	0,46	0,97
	200	190	0,43	271,7	0,51	0,68
	250	160	0,45	232	0,57	0,58
	300	130	0,48	192,4	0,62	0,48
	20	320	0,24	396,8	0,32	1
	100	300	0,3	390	0,4	0,98

* Полуфабрикаты катаные (листы).

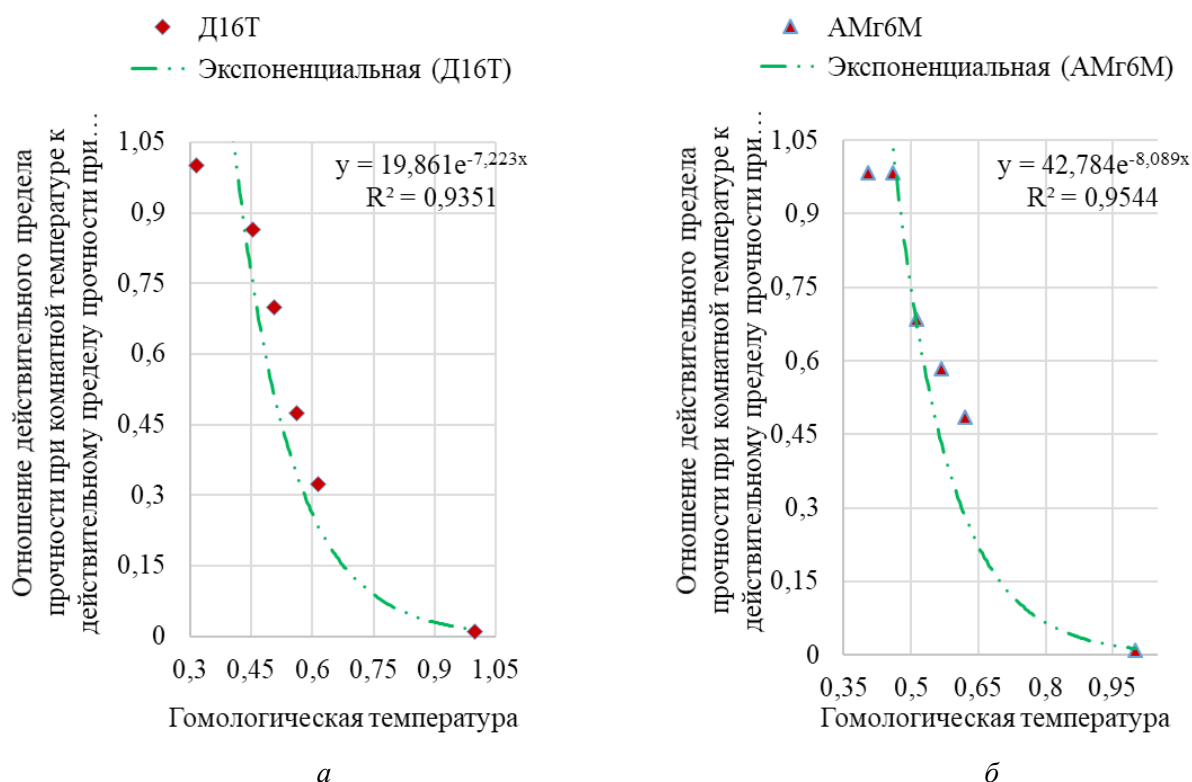


Рис. 2. Изменение механических свойств алюминиевых сплавов Д16Т (а) и АМг6М (б)

Fig. 2. Changes in the mechanical properties of aluminum alloys D16T (a) and AMg6M (b)

ция была выбрана в связи с тем, что уравнения с экспонентой проще интегрировать и дифференцировать, чем, например, уравнения с полиномиальной зависимостью (хотя полиномиальная интерполяция немного точнее), а линейная аппроксимация дает менее точные значения для сплава Д16Т и составляет 0,8971, а для сплава АМг6М практически не отличается от экспоненциальной и составляет 0,9318.

Для данных зависимостей можно составить уравнение влияния температуры на предел текучести:

$$\tau_p = S_{b20^\circ} e^{-h\Delta T'}, \quad (2)$$

где S_{b20° – значение действительного предела прочности при комнатной температуре; $\Delta T'$ – приращение гомологической температуры; h – эмпирический коэффициент температурного разупрочнения.

С учетом опыта других исследователей и основываясь на экспериментальных данных (рис. 1), можно записать уравнение для коэффициента динамичности с учетом температуры и скорости деформации в виде

$$K_{\dot{\varepsilon}} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{k\Delta T'}, \quad (3)$$

где $\dot{\varepsilon}$ – текущее значение скорости деформации; $\dot{\varepsilon}_0$ – минимальное значение скорости деформации; k – эмпирическая константа.

Из вышеизложенного можно составить определяющее уравнение изменения предела текучести с учетом влияния деформации, скорости деформации и температуры:

$$\frac{\tau_p}{S_b} = A \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{k\Delta T'} e^{-h\Delta T'}; \quad (4)$$

$$\frac{\tau_p}{S_b} = A \varepsilon_p^m K_{\varepsilon} e^{-h\Delta T'}, \quad (5)$$

где ε_p^m – множитель, отвечающий за деформационное упрочнение материала; K_{ε} – коэффициент динамичности; $e^{-h\Delta T'}$ – множитель, отвечающий за температурное разупрочнение материала; A – деформационный коэффициент; S_b – действительный предел прочности.

Однако в уравнении (5) деформация, скорость деформации и температура выступают как

три независимых фактора [21]. Так, например, изменения гомологической температуры можно достичь подогревом обрабатываемого материала, а изменения деформации – изменением геометрии режущего лезвия (передний угол). Поэтому использование такой формулы приведет к ошибкам, в связи с чем необходимо перейти от определяющего уравнения (5) к удельной работе.

Удельная работа для процесса резания материалов вообще и для фрезерования алюминиевых сплавов в частности является наиболее удобным параметром, поскольку она объединяет зависимость предела текучести и приращение гомологической температуры [19, 25]:

$$A_W = \int_0^{\varepsilon_u} \tau_p \varepsilon_p, \quad (6)$$

где τ_p – текущее значение предела текучести; ε_p – текущее значение деформации; ε_u – конечное значение деформации.

В математическом аппарате для приближения вычислений наиболее удобно пользоваться дифференциальными уравнениями, в связи с чем необходимо заменить в уравнении (5) предел текучести на производную удельной работы по деформации:

$$\frac{\tau_p}{S_b} = \frac{dA_W}{d\varepsilon_p}. \quad (7)$$

Для упрощения расчетов примем, что в зоне стружкообразования имеются условия теплообмена, близкие к адиабатическим. Тогда с учетом данного приближения удельную работу деформации можно записать в виде

$$A_W = \Delta T' c_v, \quad (8)$$

где c_v – удельная теплоемкость обрабатываемого материала.

В силу формулы (8) часть уравнения (5), которая отвечает за температурный фактор, является функцией удельной работы деформации. Для нее справедливо равенство

$$F(A_W) = e^{-hA_1 A_W}, \quad (9)$$

где $A_1 = \frac{S_b}{C_V T_{пл}}$ – безразмерный комплекс.

Теперь, когда определены все параметры, отвечающие за изменение предела текучести при

фрезеровании алюминиевых сплавов, можно записать определяющее уравнение в дифференциальном виде для определения удельной работы деформации:

$$\frac{dA_W}{d\varepsilon_p} = AK_{\varepsilon_p}^m e^{-hA_1 A_W}. \quad (10)$$

Зависимость удельной работы от деформации при фрезеровании алюминиевых сплавов позволяет получить аналитическое выражение для построения кривой течения данных сплавов:

$$A_W = AK_{\varepsilon_p}^m e^{-hA_1 A_W} d\varepsilon_p. \quad (11)$$

Однако поскольку алюминиевые сплавы (в частности, Д16Т, АМг6М, 2024-Т3) практически не упрочняются при фрезеровании ввиду действия такого разупрочняющего фактора, как температура [19], то и построение аналитической кривой течения не имеет смысла. Тем не менее имеет смысл определить максимальные значения предела текучести, который достигается при фрезеровании [16, 17, 20, 21].

Для передней поверхности при высокоскоростном фрезеровании характерны гомологические температуры выше 0,5, в связи с чем графически (рис. 1, по данным Розенберга – Еремина) был определен коэффициент $K_q = 1,8$. Для задней поверхности (вблизи режущей кромки) характерны гомологические температуры от 0,3 до 0,35, в связи с этим также графически (рис. 1, по данным Розенберга – Еремина) был определен коэффициент динамичности $K_{\varepsilon} = 1,25$.

После составления определяющего уравнения для моделирования изменения свойств обрабатываемого материала в условиях высокоскоростного фрезерования можно перейти к расчету температур. Однако в настоящей работе термин «температура» нужно применять к той поверхности режущего лезвия (зуба), на которой эта температура возникает. В связи с этим нужно различать температуру, возникающую на различных участках режущего лезвия, в частности на передней и задней поверхностях, а также температуру, которая является следствием этих температур, – температуру резания [26]. Температура резания является результатом средних значений температур, возникающих на передней и задней поверхностях режущего лезвия, отнесенных к значению координат, на которых распределены эти температуры.

Следует отметить, что при фрезеровании измерение температуры на передней и задней поверхности режущего лезвия весьма затруднено, поскольку зона резания спереди закрыта стружкой, а сзади – обрабатываемым материалом (заготовкой). Поэтому все измерения температуры будут сравниваться с температурой резания, т. е. с той температурой, которую замеряет тепловизор, для наблюдения за распределением температуры на исследуемой поверхности.

Для расчета температуры резания нужно учесть достаточно большое количество факторов. Их можно разделить на факторы, которые относятся к обрабатываемому материалу, факторы, которые относятся к инструменту, и факторы, которые характерны для самого процесса резания (точения, фрезерования, сверления и др.).

Необходимым и обязательным условием для расчета температуры при резании является введение в модель механических и физических свойств обрабатываемого материала. Эти свойства и характеристики для группы алюминиевых сплавов представлены в табл. 2 [18, 19].

Кроме того, для моделирования расчета температуры необходимо учесть геометрию режущего инструмента (передний угол γ , задний угол α , угол подъема винтовой канавки λ , периферийный угол φ). Не менее важно определиться со схематизацией процесса фрезерования (концевое, цилиндрическое, торцевое), а также учесть такие параметры, как глубина врезания e , отношение ширины фрезерования к диаметру фрезы и количество одновременно работающих зубьев.

Так, например, изменение переднего угла γ приводит к изменению наклона условной плоскости сдвига, изменению отношения длины контакта к толщине срезаемого слоя и изменению деформации, что в конечном счете сказывается на изменении сил резания [24].

Изменение угла наклона режущей кромки (угла подъема винтовой канавки) и угла в плане (периферийного угла) приводит к изменению толщины и ширины срезаемого слоя, что тоже сказывается на силах резания:

$$b = \frac{t}{\sin \varphi \cdot \cos \lambda}; \quad (12)$$

$$a = S_z \sin \theta_M \cdot \cos \lambda, \quad (13)$$

**Механические и физические свойства алюминиевых сплавов, необходимые
для расчета температуры**

Mechanical and physical properties of aluminum alloys required for temperature calculations

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	Объемная теплоемкость C_V , МДж/м ³ ·К	Коэффициент температуропроводности ω , м ² /с	Плотность ρ , кг/м ³
Д16Т*	460	16	120	2,56	$4,95 \cdot 10^{-5}$	2800
АМг6М*	320	24	122	2,43	$5,44 \cdot 10^{-5}$	2640
2024-Т3*	435	15	121	2,43	$5,68 \cdot 10^{-5}$	2780

* Листы катаные.

где a и b – толщина и ширина срезаемого слоя соответственно; t – глубина фрезерования; S_z – подача на зуб; θ_m – угол контакта зуба фрезы с обрабатываемым материалом.

Для повышения точности расчетов в модель вводились такие характеристики, как критерий Пекле (Pe), характеризующий скорость передвижения источника тепла, и коэффициент Пекле (K_{pe}), учитывающий теплообмен с окружающей средой [16, 17, 27]. Были также учтены изменения свойств обрабатываемого материала в зависимости от изменения температуры резания (рис. 3, 4).

Для учета теплообмена между системой «заготовка – окружающая среда – инструмент» процесс фрезерования стоит считать квазиadiaбатическим. Следовательно, показатель степени в уравнении (11) можно записать в виде

$$\Delta T' = K_{pe} A_W A_1, \quad (14)$$

$$A_1 = \frac{S_b}{C_V T_{пл}}. \quad (15)$$

С учетом формул (14, 15) можно записать определяющее уравнение удельной работы для квазиadiaбатического процесса:

$$A_W = A \varepsilon_p^m K_\varepsilon \exp(-B_q A_1 A_W K_{pe}) d\varepsilon. \quad (16)$$

Теперь имеет смысл определить максимально достижимые при высокоскоростном фрезеровании алюминиевых сплавов значения предела текучести для удельной работы деформации. Его можно определить после дифференцирования и интегрирования уравнения (16) удельной работы деформации:

$$\tau_{q \max} = \frac{S_{b0} B A K_q \tilde{\varepsilon}_q^m}{m+1}; \quad (17)$$

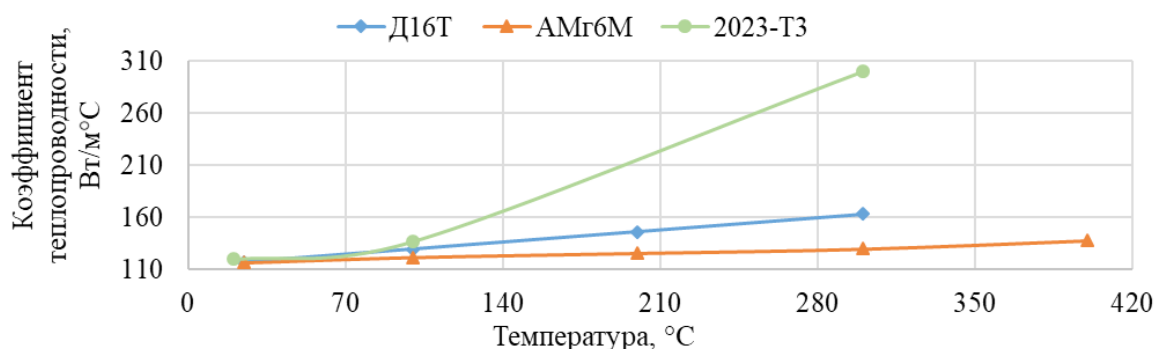


Рис. 3. Изменение коэффициента теплопроводности исследуемой группы материалов в зависимости от изменения температуры

Fig. 3. Changes in the heat conductivity coefficient of the studied group of materials depending on temperature changes

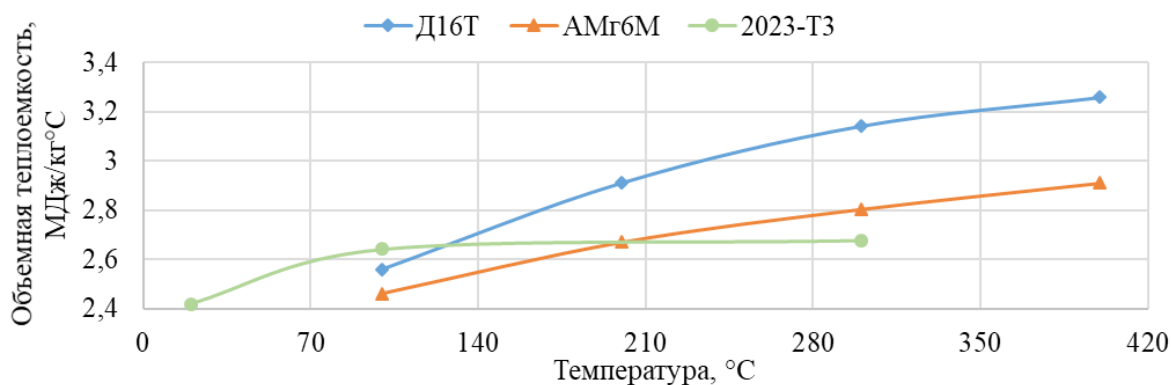


Рис. 4. Изменение объемной теплоемкости исследуемой группы материалов в зависимости от изменения температуры

Fig. 4. Changes in Volumetric specific heat of the studied group of materials depending on temperature changes

$$\varepsilon_{q \max} = \left(\frac{m(m+1)}{J B A A_l K_q K_{Pe}} \right)^{\frac{1}{m+1}}. \quad (18)$$

Формулы (17) и (18) являются общими как для передней, так и для задней поверхности режущего лезвия. Отличие заключается в разных значениях коэффициента динамичности ввиду различных значений гомологических температур на контактных поверхностях зуба. Для передней поверхности коэффициент динамичности принят $K_q = 1,8$, а для задней поверхности принят $K_\varepsilon = 1,25$.

Учитывая уравнения (7, 8), зависимости (17, 18) можно считать источниками теплоты на передней и задней поверхностях режущего лезвия [20, 27]. От этих отличающихся источников теплоты для задней и передней поверхностей режущего лезвия в программной среде

MS Excel численным методом были рассчитаны максимальные значения контактных температур на передней и задней поверхностях режущего лезвия.

Поскольку исследуемая группа алюминиевых сплавов подчиняется общему для данной группы закону разупрочнения (рис. 2) и может быть аппроксимирована экспоненциальной кривой с достаточно большой точностью (выше 0,93), то для расчета температуры можно выбрать любой из этих сплавов. Так, например, расчет производился для фрезерования алюминиевого сплава Д16Т. Параметры фрезерования были следующие: фреза твердосплавная диаметром 10 мм с двумя зубьями, угол в плане $\varphi = 90^\circ$; угол наклона режущей кромки $\lambda = 30^\circ$; действительный задний угол $\alpha = 8^\circ$. Режимы фрезерования были следующие: $V = 471$ м/мин; $S_m = 5490$ мм/мин; $S_z = 0,183$ мм/зуб; $n = 15\,000$ об/мин; $t = 0,5$ мм (рис. 5, 6).

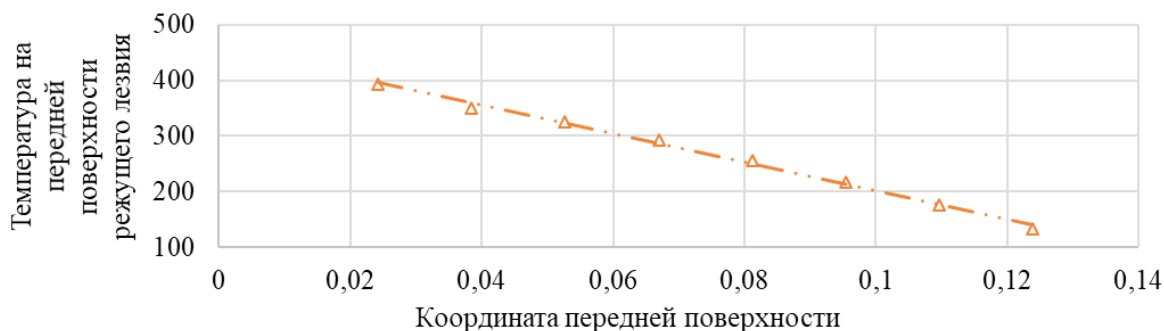


Рис. 5. Теоретическое моделирование распределения температуры на передней поверхности режущего лезвия

Fig. 5. Theoretical modeling of the temperature distribution on the front surface of the cutting blade

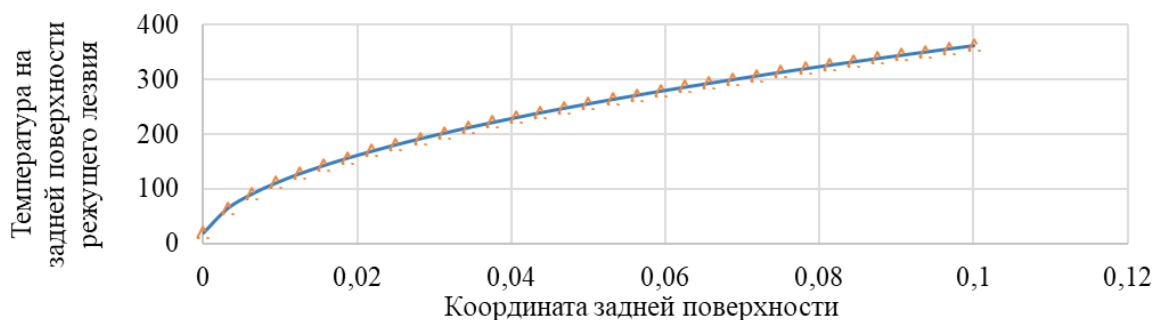


Рис. 6. Теоретическое моделирование распределения температуры на задней поверхности режущего лезвия

Fig. 6. Theoretical modeling of the temperature distribution on the front surface of the cutting blade

В момент врезания фрезы в заготовку, поскольку производилась обработка кармана, она работала обеими сторонами, поэтому реализовывалось с разных сторон попутное и встречное фрезерование. На последующих проходах выполнялось встречное фрезерование с целью устранения люфтов станка и повышения качества обработки.

Температура резания рассчитывалась на основе средней температуры на передней поверхности, умноженной на длину контакта этой поверхности, и средней температуры на задней поверхности, умноженной на ширину фаски износа:

$$T_p = \frac{T_{ПП_{ср}} c + T_{ЗП_{ср}} h_3}{c + h_3}. \quad (19)$$

Этот метод расчета температур позволяет наглядно показать распределение температур на передней и задней поверхностях режущего лезвия.

Результаты и их обсуждение

Для проверки теоретического расчета температур была проведена серия опытов по фрезерованию заготовок размером 250×40×120 мм

из алюминиевого сплава Д16Т. Механические характеристики и физические свойства этого сплава представлены в табл. 3.

В испытаниях использовалась концевая фреза без покрытия модели Hanita 4002 диаметром 10 мм с плоским торцом, двумя зубьями и углом подъема винтовой канавки 60° (рис. 7).

Все испытания проводились без применения СОЖ. Экспериментальным фактором была скорость резания, т. е. проводился однофакторный эксперимент с пятью уровнями варьирования фактора. Для регистрации температуры при фрезеровании был использован бесконтактный метод, позволяющий на определенном расстоянии непрерывно снимать показания. Регистрация измерений проводилась при помощи тепловизора модели Fluke Ti400 с погрешностью измерения температурного поля 2 %. В настройках тепловизора был выбран коэффициент излучения, характерный для алюминиевых сплавов, равный 0,25.

Все испытания механической обработки проводились на координатно-расточном станке 2431СФ10 с УЦИ с модернизированным шпинделем, позволяющим достигать частоты вращения 18 000 об/мин. Опыты проводились

Таблица 3

Table 3

Механические и физические свойства обрабатываемого сплава Д16Т

Mechanical and physical properties of the processed alloy D16T

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	Объемная теплоемкость C_V , МДж/м ³ ·К	Коэффициент температуропроводности ω , м ² /с	Плотность ρ , кг/м ³
Д16Т	460	10	120	2,43	$5,44 \cdot 10^{-5}$	2800

ТИП 4002



Рис. 7. Твердосплавная двузубая фреза Hanita 4002

Fig. 7. Hanita 4002 carbide 2-tooth milling cutter



Рис. 8. Экспериментальная система для измерения температуры

Fig. 8. Experimental system for temperature measurement

с фиксированными значениями подачи на зуб и различными значениями скорости резания.

Экспериментальная система «инструмент – заготовка – тепловизор» представлена на рис. 8.

На рис. 9 показан пример измерения температуры бесконтактным методом для следующих режимов резания: а) $n = 8000$ об/мин;

$V = 251,2$ м/мин; $S_z = 0,183$ мм/зуб; б) $n = 10\,000$ об/мин; $V = 314$ м/мин; $S_z = 0,183$ мм/зуб.

По результатам экспериментальных данных был составлен график зависимости температуры от изменения фактора (в данном случае скорости резания) на всех пяти уровнях варьирования (рис. 10).



а



б

Рис. 9. Пример измерения температуры для 8000 об/мин (а) и 10 000 об/мин (б) тепловизором Fluke Ti400

Fig. 9. An example of temperature measurement for 8,000 rpm (a) and 10,000 rpm (b) with a Fluke Ti400 thermal imager

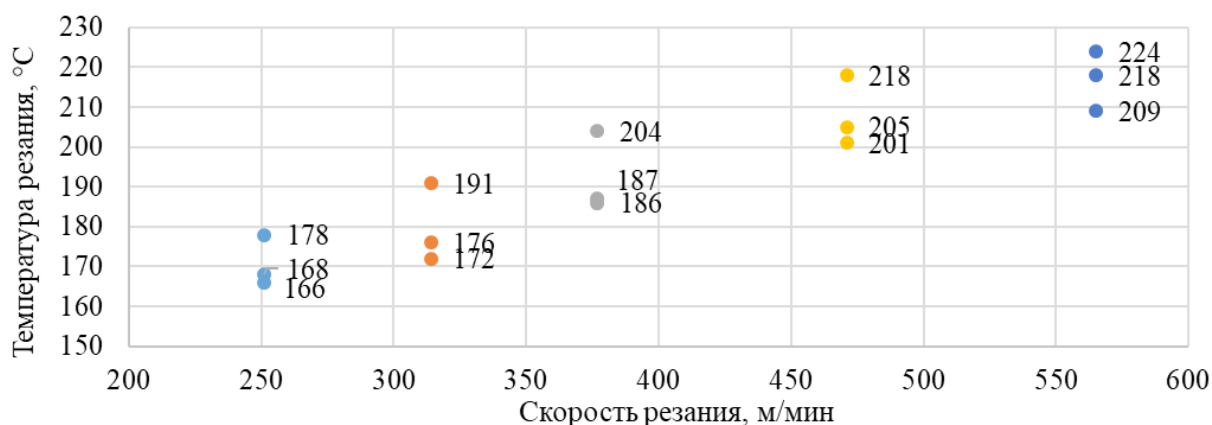


Рис. 10. Экспериментальные значения температуры резания

Fig. 10. Experimental values of the cutting temperature

Для повышения точности расчетов температуры резания был учтен и тот факт, что свойства обрабатываемого материала меняются с изменением температуры деформации.

Результаты испытаний можно свести и представить в табличной форме, где рассчитаны

средние значения экспериментальной температуры резания, полученной по результатам трех испытаний для каждого из пяти уровней варьирования скорости резания. Рассчитаны также относительные погрешности при сравнении значений температур (табл. 4).

Таблица 4

Table 4

Результаты экспериментальных исследований по расчету температуры резания при фрезеровании сплава Д16Т и соответствующие им теоретические расчеты

The results of experimental studies on the calculation of the cutting temperature when milling the D16T alloy and the corresponding theoretical calculations

№ опыта	Скорость, м/мин	T_3 , °C	T_3 ср. зн., °C	$T_{расч}$, °C	Относительная погрешность, %
1	251,2	166	170,7	160	6,268307
	251,2	168			
	251,2	178			
2	314	191	179,7	170	5,397885
	314	172			
	314	176			
3	376,8	204	192,3	180	6,396256
	376,8	186			
	376,8	187			
4	471	218	208	196	5,769231
	471	205			
	471	201			
5	565,2	209	217	203	6,451613
	565,2	218			
	565,2	224			
Среднее значение					6,056658

Средняя температура резания сравнивалась со средней температурой контактных поверхностей режущего лезвия (формула (19)), полученный результат можно представить в виде графика (рис. 10).

По результатам экспериментальных испытаний и теоретического моделирования был составлен график температур (рис. 11).

В результате проделанной работы была разработана математическая модель расчета температуры для высокоскоростного фрезерования исследуемой группы алюминиевых сплавов. Эта модель базируется на справочных данных по высокотемпературному деформированию алюминиевых сплавов, данных о механических и теплофизических свойствах обрабатываемых материалов, а также на экспериментальных результатах по изучению влияния деформации и скорости деформации на изменение предела текучести материалов при резании. Представленная модель в первом приближении позволяет спрогнозировать значения температуры при довольно широком диапазоне изменения параметров фрезерования. В нашем случае скорость резания изменялась в пределах от 251,2 до 562,2 м/мин, а частота вращения – от 8000 до 18 000 об/мин.

Предложенное решение прогнозирования температуры резания дает возможность в производственных условиях, без использования трудоемких и затратных методов измерения

температуры, теоретически рассчитать значение температуры, используя компьютер и программную среду MS Excel.

Выводы

Оценка полученных результатов позволила сделать следующие выводы.

1. Выведены теоретические зависимости, позволяющие расчетным путем определить температуру в зоне резания при высокоскоростном фрезеровании заготовок из алюминиевых сплавов.

2. Проведены экспериментальные исследования по определению температуры резания при заданных параметрах фрезерования.

3. Экспериментальные данные измерения температур резания удовлетворительно согласуются с предложенной методикой теоретического расчета температур. Относительная погрешность сопоставления экспериментальных данных с теоретическими составляет 6,05 %.

Полученные результаты подтверждают правильность расчетных формул и то, что предложенная методика позволяет без проведения трудоемких и затратных экспериментальных исследований теоретически рассчитать (спрогнозировать) температуру на передней и задней поверхности режущего лезвия, а также температуру резания для тех узких условий фрезерования, где невозможен эффективный отвод тепла из зоны резания.

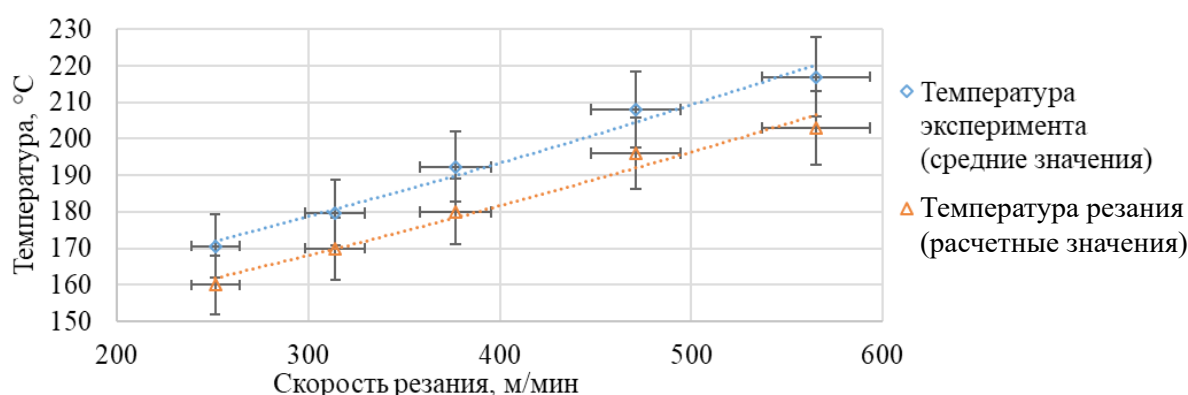


Рис. 11. Сопоставление экспериментальных и теоретических значений температуры резания при фрезеровании алюминиевого сплава Д16Т

Fig. 11. Comparison of experimental and theoretical values of cutting temperature when milling aluminum alloy D16T

Список литературы

1. Effect of cutting parameters on heat generation in ultra-precision milling of aluminum alloy 6061 / S.J. Wang, X. Chen, S. To, X.B. Ouyang, Q. Liu, J.W. Liu, W.B. Lee // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 80. – P. 1265–1275. – DOI: 10.1007/s00170-015-7072-8.
2. Effects of SiO₂-Al₂O₃-ZrO₂ tri-hybrid nanofluids on surface roughness and cutting temperature in end milling process of aluminum alloy 6061-T6 using uncoated and coated cutting inserts with minimal quantity lubricant method / W. Safiei, M.M. Rahman, A.R. Yusoff, M.N. Arifin, W. Tasnim // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 46. – P. 7699–7718. – DOI: 10.1007/s13369-021-05533-7.
3. Meng X.X., Lin Y.X. Chip morphology and cutting temperature of ADC12 aluminum alloy during high-speed milling // *Rare Metals*. – 2021. – Vol. 40. – P. 1915–1923. – DOI: 10.1007/s12598-020-01486-2.
4. Machining of aluminum alloys: a review / M.C. Santos, A.R. Machado, W.F. Sales, M.A.S. Barrozo, E.O. Ezugwu // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 86. – P. 3067–3080. – DOI: 10.1007/s00170-016-8431-9.
5. Cyclic solid-state transformations during ball milling of aluminum zirconium powder and the effect of milling speed / M.S. El-Eskandarany, K. Aoki, K. Sumiyama, K. Suzuki // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 1999. – Vol. 30. – P. 1877–1880. – DOI: 10.1007/s11661-999-0185-7.
6. Luo H., Wang Yq., Zhang P. Simulation and experimental study of 7A09 aluminum alloy milling under double liquid quenching // *Journal of Central South University*. – 2020. – Vol. 27. – P. 372–380. – DOI: 10.1007/s11771-020-4302-5.
7. Грубый С.В., Зайцев А.М. Обоснование условий фрезерования карманов в корпусных деталях из алюминиевых сплавов // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. – 2014. – № 5. – С. 12–30. – DOI: 10.7463/0514.0709770.
8. CIRP encyclopedia of production engineering / ed. by S. Chatti, L. Laperrière, G. Reinhart, T. Tollo. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2019. – 1832 p. – DOI: 10.1007/978-3-662-53120-4.
9. An experimental investigation of the influence of cutting parameters on workpiece internal temperature during Al2024-T3 milling / A. Il, J.F. Chatelain, J.F. Lalonde, M. Balazinski, X. Rimpault // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 97. – P. 413–426. – DOI: 10.1007/s00170-018-1948-3.
10. Грубый С.В., Зайцев А.М. Исследование концевых фрез при фрезеровании корпусных деталей из алюминиевых сплавов // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. – 2013. – № 12. – С. 31–54. – DOI: 10.7463/1213.0634375.
11. Modelling of the temperature distribution based on equivalent heat transfer theory and anisotropic characteristics of honeycomb core during milling of aluminum honeycomb core / W. Ming, W. Yu, K. Qiu, Q. An, M. Chen // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – Vol. 115. – P. 2097–2110. – DOI: 10.1007/s00170-021-06943-5.
12. Milling force model for aviation aluminum alloy: academic insight and perspective analysis / Z. Duan, C. Li, W. Ding, Y. Zhang, M. Yang, T. Gao, H. Cao, X. Xu, D. Wang, C. Mao, H.N. Li, G.M. Kumar, Z. Said, S. Debnath, M. Jamil, H.M. Ali // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2021. – Vol. 34. – P. 18. – DOI: 10.1186/s10033-021-00536-9.
13. Bugdayci B., Lazoglu I. Temperature and wear analysis in milling of aerospace grade aluminum alloy Al-7050 // *Production Engineering*. – 2015. – Vol. 9. – P. 487–494. – DOI: 10.1007/s11740-015-0623-x.
14. Кузультинов С.Д., Щенятский А.В., Жильев А.С. Численный анализ влияния условий механической обработки на напряженно-деформированное состояние крупногабаритных тонкостенных деталей сложной формы // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2018. – Т. 16, № 3. – С. 17–21. – DOI: 10.22213/2410-9304-2018-3-17-21.
15. Трусов В.Н., Законов О.И., Шикин В.В. Исследование параметров процесса фрезерования алюминиевого сплава Д16Т // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. – 2012. – № 3 (35). – С. 155–162. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_18955077_35295693.pdf (дата обращения: 09.02.2024).
16. Разработка математической модели кривой течения сплавов при адиабатических условиях деформирования / В.С. Кушнер, М.Г. Сторчак, О.Ю. Бургонова, Д.С. Губин // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2017. – Т. 83 (5) – С. 45–49. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_29197671_73184792.pdf (дата обращения: 09.02.2024).
17. Бургонова О.Ю., Кушнер В.С. Повышение эффективности обработки конструкционных материалов фрезерованием. – Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2013. – 140 с. – ISBN 978-5-8149-1640-2.
18. Gabrian International (H.K.) Ltd.: сайт. – URL: <https://www.gabrian.com/2024-aluminum-properties/> (accessed: 09.02.2024).
19. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. – ISBN 5-283-04013-5.
20. Kushner V., Storchak M. Determining mechanical characteristics of material resistance to de-

formation in machining // *Production Engineering*. – 2014. – Vol. 8 (5). – P. 679–688. – DOI: 10.1007/s11740-014-0573-8.

21. Finite element modeling of high-speed milling 7050-T7451 alloys / X. Huang, J. Xu, M. Chen, F. Ren // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – Vol. 43. – P. 471–478. – DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.186.

22. Воробьев А.А., Крутько А.А., Седых Д.А. Разработка модели для оценки напряженно-деформированного состояния твердосплавного инструмента при восстановительной обработке железнодорожных колес // *Научные технологии в машиностроении*. – 2022. – № 12 (138). – С. 9–15. – DOI: 10.30987/2223-4608-2022-12-9-15.

23. Развитие науки о резании металлов / редкол.: Н.Н. Зорев (пред.) [и др.]. – М.: Машиностроение, 1967. – 415 с.

24. Розенберг А.М., Еремин А.Н. Элементы теории процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 318 с.

25. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. Т. 3. Теория пластической обработки металлов. – М.: Металлургиздат, 1961. – 306 с.

26. Жилев А.С., Кугультинов С.Д. Математическое моделирование тепловых процессов при фрезеровании сложнопрофильных деталей из алюминиевых сплавов // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. – 2019. – № 2 (29). – С. 65–70. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_41273368_56283700.pdf (дата обращения: 09.02.2024).

27. Вережак А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. – М.: Высшая школа, 2009. – 535 с. – ISBN 978-5-06-004415-7.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Features of calculating the cutting temperature during high-speed milling of aluminum alloys without the use of cutting fluid

Dmitry Gubin^{1, a}, Anton Kisel'^{2, b, *}

¹ Omsk State Technical University, 11 Prospekt Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

² Kaliningrad State Technical University, 1 Sovetsky Prospekt, Kaliningrad, 236022, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-1825-1310>, gubin.89@list.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-8014-0550>, kisel1988@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 19 October 2023

Revised: 16 November 2023

Accepted: 22 January 2024

Available online: 15 March 2024

Keywords:

Cutting temperature

High-speed milling

Aluminum alloy

Homologous temperature

Thermal imager

Forecasting

Specific work

Yield strength

ABSTRACT

Introduction. The calculation of temperature during high-speed milling of aluminum alloys is of interest, since temperature can act as one of the main limiting factors in choosing rational milling modes. This is especially important when milling thin-walled products used in aircraft construction, since its high values can lead to local warping of the structure. It is not possible to control the temperature factor in production conditions, which makes it necessary to develop a mathematical model for calculating temperature. **The purpose of the work** is to develop a methodology for predicting the cutting temperature during high-speed milling of aluminum alloy workpieces for cutting conditions, in which it is not possible to use cutting fluid. **Methods.** This paper presents experimental studies of the cutting temperature during high-speed milling of aluminum alloy workpieces without the use of cutting fluid using non-contact temperature measurement methods. The results obtained were used to determine the coefficients substituted into formulas for calculating temperatures on the front and back surfaces of the cutting blade. **Results and discussions.** Based on the results of experimental tests and theoretical modeling, a temperature graph is drawn up. A comparison of experimental studies of milling of aluminum alloy D16T, with changing cutting conditions (the cutting speed changed) with theoretical data, gave a satisfactory result. The average relative error when comparing experimental data with theoretical one is 6.05 %. Based on experimental data, it can be concluded that the comparison of experimental data for measuring cutting temperatures is in satisfactory agreement with the proposed method of theoretical calculation of temperatures. The advantage of this technique is that it allows, without time-consuming and costly experimental studies, theoretically calculate (forecast) the temperatures on the front and back surfaces of the cutting blade, as well as the cutting temperature, for those narrow milling conditions, where effective heat removal from the cutting zone is impossible. It can also be used for milling aluminum alloys, the mechanical and thermophysical properties of which differ.

For citation: Gubin D.S., Kisel' A.G. Features of calculating the cutting temperature during high-speed milling of aluminum alloys without the use of cutting fluid. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 1, pp. 38–54. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-38-54. (In Russian).

References

1. Wang S.J., Chen X., To S., Ouyang X.B., Liu Q., Liu J.W., Lee W.B. Effect of cutting parameters on heat generation in ultra-precision milling of aluminum alloy 6061. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 80, pp. 1265–1275. DOI: 10.1007/s00170-015-7072-8.
2. Safiei W., Rahman M.M., Yusoff A.R., Arifin M.N., Tasnim W. Effects of SiO₂-Al₂O₃-ZrO₂ tri-hybrid nanofluids on surface roughness and cutting temperature in end milling process of aluminum alloy 6061-T6 using uncoated and coated cutting inserts with minimal quantity lubricant method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, vol. 46, pp. 7699–7718. DOI: 10.1007/s13369-021-05533-7.

* Corresponding author

Kisel' Anton G., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Kaliningrad State Technical University,
1 Sovetsky Prospekt,
236022, Kaliningrad, Russian Federation
Tel.: +7 999 458-08-25, e-mail: kisel1988@mail.ru

3. Meng X.X., Lin Y.X. Chip morphology and cutting temperature of ADC12 aluminum alloy during high-speed milling. *Rare Metals*, 2021, vol. 40, pp. 1915–1923. DOI: 10.1007/s12598-020-01486-2.
4. Santos M.C., Machado A.R., Sales W.F., Barrozo M.A.S., Ezugwu E.O. Machining of aluminum alloys: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 86, pp. 3067–3080. DOI: 10.1007/s00170-016-8431-9.
5. El-Eskandarany M.S., Aoki K., Sumiyama K., Suzuki K. Cyclic solid-state transformations during ball milling of aluminum zirconium powder and the effect of milling speed. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, vol. 30, pp. 1877–1880. DOI: 10.1007/s11661-999-0185-7.
6. Luo H., Wang Yq., Zhang P. Simulation and experimental study of 7A09 aluminum alloy milling under double liquid quenching. *Journal of Central South University*, 2020, vol. 27, pp. 372–380. DOI: 10.1007/s11771-020-4302-5.
7. Grubyy S.V., Zaicev A.M. Obosnovanie uslovii frezerovaniya karmanov v korpusnykh detalyakh iz alyuminievykh splavov [The provement of the conditions of end mill operation in external panels of the aluminum alloys]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education: scientific periodical of the Bauman MSTU*, 2014, no. 5, pp. 12–30. DOI: 10.7463/0514.0709770.
8. Chatti S., Laperrière L., Reinhart G., Tolio T., eds. *CIRP encyclopedia of production engineering*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2019. 1832 p. DOI: 10.1007/978-3-662-53120-4.
9. Il A., Chatelain J.F., Lalonde J.F., Balazinski M., Rimpault X. An experimental investigation of the influence of cutting parameters on workpiece internal temperature during Al2024-T3 milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, pp. 413–426. DOI: 10.1007/s00170-018-1948-3.
10. Grubyy S.V., Zaicev A.M. Issledovanie kontsevykh frez pri frezerovanii korpusnykh detalei iz alyuminievykh splavov [Research of end mills during milling of body parts made of aluminum alloys]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education: scientific periodical of the Bauman MSTU*, 2013, no. 12, pp. 31–54. DOI: 10.7463/1213.0634375.
11. Ming W., Yu W., Qiu K., An Q., Chen M. Modelling of the temperature distribution based on equivalent heat transfer theory and anisotropic characteristics of honeycomb core during milling of aluminum honeycomb core. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 115, pp. 2097–2110. DOI: 10.1007/s00170-021-06943-5.
12. Duan Z., Li C., Ding W., Zhang Y., Yang M., Gao T., Cao H., Xu X., Wang D., Mao C., Li H.N., Kumar G.M., Said Z., Debnath S., Jamil M., Ali H.M. Milling force model for aviation aluminum alloy: academic insight and perspective analysis. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, vol. 34, p. 18. DOI: 10.1186/s10033-021-00536-9.
13. Bugdayci B., Lazoglu I. Temperature and wear analysis in milling of aerospace grade aluminum alloy Al-7050. *Production Engineering*, 2015, vol. 9, pp. 487–494. DOI: 10.1007/s11740-015-0623-x.
14. Kugultinov S.D., Shchenyatskii A.V., Zhilyaev A.S. Chislennyy analiz vliyaniya uslovii mekhanicheskoi obrabotki na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie krupnogabaritnykh tonkostennykh detalei slozhnoi formy [Numerical analysis of influence of mechanical processing conditions on stress-deformed state of large-size thin-wall complex parts]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve = Intelligent Systems in Manufacturing*, 2018, vol. 16 (3), pp. 17–21. DOI: 10.22213/2410-9304-2018-3-17-21.
15. Trusov V.N., Zakonov O.I., Shikin V.V. Issledovanie parametrov protsessa frezerovaniya alyuminieвого сплава D16T [Research on milling parameters for the D16T aluminium alloy]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2012, no. 3 (35), pp. 155–162. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_18955077_35295693.pdf (accessed 09.02.2024).
16. Kushner V.S., Storchak M.G., Burgonova O.Yu., Gubin D.S. Razrabotka matematicheskoi modeli krivoi techeniya splavov pri adiabaticheskikh usloviyakh deformirovaniya [Mathematical modeling of the alloy flow curve in adiabatic conditions of deformation]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2017, vol. 83 (5), pp. 45–49. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_29197671_73184792.pdf (accessed 09.02.2024).
17. Burgonova O.Yu., Kushner V.S. *Povyshenie effektivnosti obrabotki konstruksionnykh materialov frezerovaniem* [Improving the efficiency of processing structural materials by milling]. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2013. 140 p. ISBN 978-5-8149-1640-2.
18. Gabrian International (H.K.) Ltd. Available at: <https://www.gabrian.com/2024-aluminum-properties/> (accessed 09.02.2024).
19. Grigor'ev I.S., Meilikhov E.Z., eds. *Fizicheskie velichiny: spravochnik* [Physical quantities: reference]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p. ISBN 5-283-04013-5.

20. Kushner V., Storchak M. Determining mechanical characteristics of material resistance to deformation in machining. *Production Engineering*, 2014, vol. 8 (5), pp. 679–688. DOI: 10.1007/s11740-014-0573-8.
21. Huang X., Xu J., Chen M., Ren F. Finite element modeling of high-speed milling 7050-T7451 alloys. *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 43, pp. 471–478. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.186.
22. Vorob'ev A.A., Krutko A.A., Sedykh D.A. Razrabotka modeli dlya otsenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tverdosplavnogo instrumenta pri vosstanovitel'noi obrabotke zheleznodorozhnykh koles [Investigation of the stressed state of a carbide tool during turning of railway wheels]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2022, no. 12 (138), pp. 9–15. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-12-9-15.
23. Zorev N.N., ed. *Razvitie nauki o rezanii metallov* [Development of metal cutting science]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 415 p.
24. Rozenberg A.M., Eremin A.N. *Elementy teorii protsessa rezaniya metallov* [Elements of the theory of the metal cutting process]. Moscow, Mashgiz Publ., 1956. 318 p.
25. Gubkin S.I. *Plasticheskaya deformatsiya metallov*. T. 3. *Teoriya plasticheskoi obrabotki metallov* [Plastic deformation of metals. Vol. 3. Theory of plastic processing of metals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1961. 306 p.
26. Zhiliaev A.S., Kugultinov S.D. Matematicheskoe modelirovanie teplovykh protsessov pri frezerovanii slozhnoprofil'nykh detalei iz alyuminievykh splavov [Mathematical simulation of thermal processes when milling aluminum alloy formed parts]. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antei»*, 2019, no. 2 (29), pp. 65–70. (In Russian). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_41273368_35941140.pdf (accessed 09.02.2024).
27. Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezanie materialov* [Cutting materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2009. 535 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).