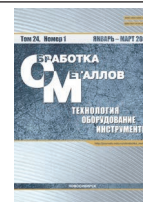




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)





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



Расчет температур при чистовом фрезеровании жаропрочного сплава марки ХН56ВМКЮ-ВД

Дмитрий Губин^а, Антон Кисель^{б, *}

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

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

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914.1

История статьи:

Поступила: 30 декабря 2021
Рецензирование: 10 января 2022
Принята к печати: 15 февраля 2022
Доступно онлайн: 15 марта 2022

Ключевые слова:

Теоретический расчет температур
Фрезерование
Жаропрочные сплавы на никелевой основе
Температура резания

Благодарности:

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из важнейших задач при резании металлов и сплавов является контроль температурного фактора, так как температура является одним из ограничений при определении режимов резания. Этот подход позволяет определять рациональные (в некоторых случаях и оптимальные) режимы фрезерования. Экспериментальные методы определения температуры трудоемки, экономически затратные и не всегда доступны. Трудоемкость заключается в необходимости постоянной настройки экспериментального оборудования в связи с меняющимися условиями резания, электроизоляции инструмента и заготовки, появлении паразитной термоЭДС (если речь идет о методах измерения температуры термодарами), постоянной калибровке приборов и подбору коэффициентов теплового излучения (если речь идет о бесконтактных методах измерения температуры). В связи с этим возникает необходимость в теоретическом определении температур при фрезеровании с минимальным использованием экспериментальных данных. **Цель работы.** Разработать методику теоретического расчета температур при фрезеровании (резании) жаропрочных материалов на никелевой основе (на примере сплава ХН56ВМКЮ-ВД (ЭП109-ВД)). **Методика исследования.** Для теоретического определения температур резания была сформирована математическая модель, учитывающая механические и теплофизические свойства обрабатываемого материала и их изменение в зависимости от изменения температуры при фрезеровании, геометрию режущего инструмента и особенности схематизации процесса фрезерования. Экспериментальная часть исследования проводилась на фрезерном станке КФПЭ-250 с системой ЧПУ Маяк-610. Обработывался материал ЭП109-ВД фрезой фирмы Seco JS513050D2C.0Z3-NXT с различными значениями скорости и подачи. Температура измерялась с помощью тепловизора модели Fluke Ti400. **Результаты и их обсуждение.** Разработана теоретическая модель расчета температуры (для группы сплавов ХН77ТЮР, ХН62МВТЮ, ХН73МБТЮ и ХН56ВМКЮ-ВД) при фрезеровании жаропрочных сплавов на никелевой основе, позволяющая при изменении условий резания (скорость, подача, глубина, геометрия режущего инструмента) спрогнозировать значение температуры на передней и задней поверхности режущего инструмента, а также температуру резания. Анализ экспериментальных и теоретически спрогнозированных значений температуры резания показал удовлетворительное совпадение соответствующих значений.

Для цитирования: Губин Д.С., Кисель А.Г. Расчет температур при чистовом фрезеровании жаропрочного сплава марки ХН56ВМКЮ-ВД // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 23–32. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-23-32.

Введение

Жаропрочные сплавы на никелевой основе широко используются в космической отрасли, авиационной и энергетической промышленности для проектирования деталей с большой механической нагрузкой и высокой рабочей тем-

пературой. Процессу обработки (фрезерование, точение и др.) жаропрочных сплавов всегда сопутствуют высокие температуры резания. Это вызвано большими значениями механических характеристик (предел прочности и действительный предел прочности), низкими коэффициентами теплопроводности и температуропроводности [1–4]. Исследование температурных явлений при резании материалов вызывает интерес в связи с тем, что температура может выступать как один из ограничивающих факторов, поэтому важно прогнозировать температуру для

*Адрес для переписки

Кисель Антон Геннадьевич, к.т.н., доцент
Омский государственный технический университет,
пр. Мира, 11,
644050, г. Омск, Россия
Тел.: +7 (999) 458-08-25, e-mail: kisel1988@mail.ru

оптимизации процесса резания и увеличения срока службы инструмента [5,6]. Так, при высоких значениях температуры наблюдается повышенный износ инструмента (пластическая деформация), потеря формоустойчивости и быстрый выход из строя [5,7,8]. По этой причине температуру связывают с таким фактором, как интенсивность изнашивания, и в дальнейшем

используют как ограничивающий фактор при определении рациональных (либо оптимальных) режимов резания [5] (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что минимальная интенсивность изнашивания инструмента для сплавов ХН70ВМТЮ и ХН70ВМТЮБ одинаковая и соответствует значению температуры около 750 °С при скорости резания 25 м/мин.

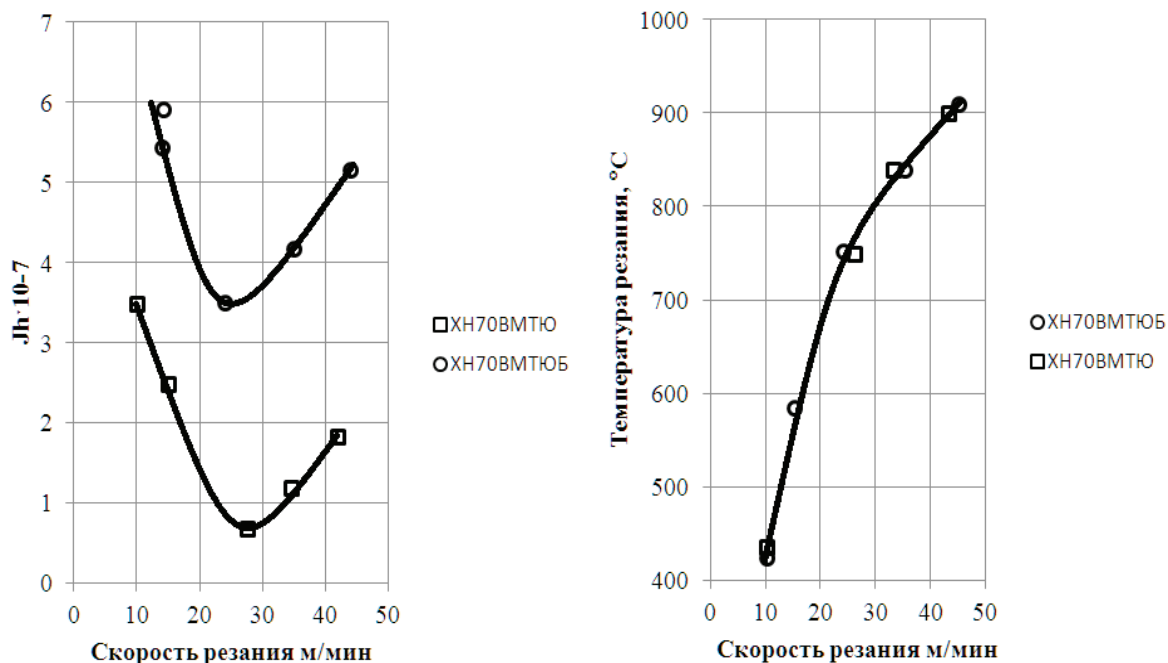


Рис. 1. Зависимость интенсивности износа резца и температуры резания от вида обрабатываемого материала и скорости резания [5]

Fig. 1. Dependence of the wear rate of the cutter and the cutting temperature on the type of workpiece and cutting speed [5]

Так, имеются рекомендации [5,9], согласно которым режимы резания целесообразно назначать, выдерживая рациональные (оптимальные) значения температуры. В работе А. Д. Макарова [5] было предложено учитывать влияние температуры на скорость резания. Был сформулирован принцип, когда при различных комбинациях скорости резания, подачи и глубины резания может быть найдена постоянная температура в зоне резания (оптимальная температура), соответствующая минимальным средним интенсивностям изнашивания.

В ряде работ, например [10–12], температура резания определялась либо экспериментально (методом естественной – искусственной термпары), либо теоретически [6,13]. Измерение температуры экспериментальными методами в производственных условиях неэффективно и

приводит к большим затруднениям. Они связаны прежде всего с настройкой дорогостоящего оборудования для постоянно меняющихся условий резания (например, изменился материал заготовки, изменилась геометрия режущего инструмента и др.) и калибровкой полученных сигналов термоЭДС (для термпар). Если измерение температуры производится бесконтактными методами (тепловизоры), то в данном случае возникает необходимость постоянно калибровать прибор при изменении обрабатываемого материала и производить постоянную фокусировку при движении режущего инструмента. Кроме того, бесконтактным методом невозможно измерить температуру при фрезеровании с использованием СОЖ либо, когда зону резания закрывает обрабатываемый материал либо стружка. Поэтому целесообразно применять программы (мето-

дики), позволяющие теоретически рассчитать (спрогнозировать) температуру для определенной группы обрабатываемых материалов с учетом влияния изменения механических характеристик в процессе резания, не прибегая при этом к большому количеству экспериментов.

Так, Эзель и др. [14] предложили теоретическую модель расчета температуры для высокоскоростного концевой фрезерования штамповых сталей, основанную на методе конечных элементов. На основе экспериментальных данных были получены коэффициенты модели, которые закладывались в программное обеспечение DEFORM-2D. Таким образом, численный метод был ограничен конкретным материалом и конкретными условиями обработки, а точность была нарушена при допущении независимости предела текучести материала от деформации, скорости деформации и температуры в процессе фрезерования.

Данная статья посвящена разработке теоретического метода расчета температуры при фрезеровании для группы сплавов на никелевой основе. Для достижения этой цели необходимо разработать математическую модель, учитывающую влияние деформации, скорости деформации и температуры на изменение предела текучести в процессе фрезерования. Кроме того, подтвердить результаты теоретического прогнозирования температуры резания экспериментально (бесконтактным методом измерения температуры). В качестве примера теоретические и экспериментальные исследования будут проводиться для жаропрочного сплава ХН56ВМКЮ-ВД.

Методика исследований

Первое, из чего нужно исходить при расчете температуры при резании, – это механические и физические свойства материала.

Второе – нужно учитывать геометрию режущего инструмента (передний угол γ° , задний угол α° , угол в плане φ° , угол наклона режущей кромки λ°) и также схематизацию процесса фрезерования, а именно глубину врезания e , учитывать количество одновременно работающих зубьев, отношение ширины фрезерования к диаметру фрезы. Геометрия режущего инструмента учитывалась через критерий Пекле, который

определяет теплообмен между обрабатываемым материалом, окружающей средой и инструментом, и через коэффициент Пекле, учитывающий скорость отвода тепла [15]:

$$Pe = \frac{v}{60} \frac{a}{1000} \frac{1}{\omega}, \quad (1)$$

$$K_{Pe} = \left[1 + \frac{1 - \exp(Pe \cdot \operatorname{tg} \varphi_y)}{Pe \cdot \operatorname{tg} \varphi_y} \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$a = S_z \sin \varphi \cdot \cos \lambda, \quad (3)$$

$$\varphi_y = \operatorname{arctg} \frac{\cos \gamma}{\zeta - \sin \gamma}, \quad (4)$$

где a – толщина срезаемого слоя, мм; v – скорость резания, м/с; ω – коэффициент теплопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$ (справочное значение); S_z – подача на зуб, мм/зуб; φ – действительный главный угол в плане, град; λ – угол наклона режущей кромки, град; γ – передний угол, град; φ_y – угол наклона условной плоскости сдвига, град; ζ – усадка стружки.

Третье – нужно учитывать влияние самой температуры на изменение механических свойств материала. Высокие значения температуры в процессе резания могут приводить к значительному изменению механических свойств металлов и сплавов. Известно [16–18], что в процессе резания под влиянием высоких скоростей деформации обрабатываемый материал может существенно упрочняться, а под влиянием температуры – разупрочняться.

Для исследования была выбрана группа жаропрочных сплавов, которая подчиняется одному и тому же закону разупрочнения (рис. 2). В связи с этим изменение предела текучести вышеуказанных сплавов можно описать одним обобщающим уравнением и для исследований допустимо выбрать любой из них.

Для исследований был выбран сплав ХН56ВМКЮ-ВД. Физико-механические свойства данного материала представлены в табл. 1 [17, 18].

За основу расчетов были взяты зависимости изменения действительного предела прочности от температуры при высокотемпературных испытаниях жаропрочных сплавов на растяжение (см. рис. 2), а также сведения о влиянии дефор-

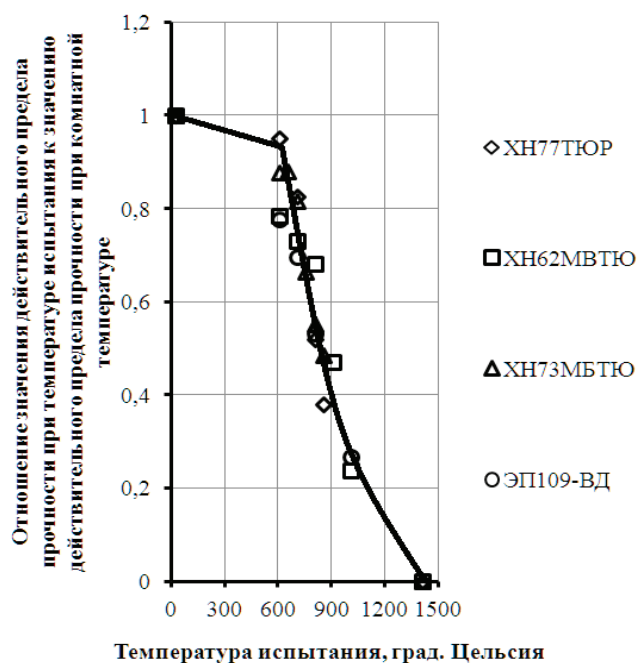


Рис. 2. Изменение механических свойств никелевых сплавов при статических испытаниях на растяжение [15, 16]

Fig. 2. Change in the mechanical properties of nickel based alloys during static tensile tests [15, 16]

мации, скорости деформации на изменение предела текучести выбранных сплавов [19]. По этим данным было построено определяющее уравнение для определения предела текучести, которое подходит для любого сплава, представленного на рис. 2:

$$\frac{\tau_p}{S_{b_0}} = A \varepsilon_p^m K_\varepsilon \exp(-B_q \Delta T'), \quad (5)$$

$$A = \left\{ \sqrt{3} \left[\sqrt{3} \ln(1 + \varepsilon_z) \right]^m \right\}^{-1}, \quad (6)$$

где $\frac{\tau_p}{S_{b_0}}$ – отношение значения действительного

предела прочности при температуре испытания к значению предела прочности при комнатной температуре; $A \varepsilon_p^m$ – уравнение упрочняемого материала (простое нагружение); m – коэффициент деформационного упрочнения; K_ε – эмпирическая константа, характеризующая влияние скорости деформации на предел текучести; B_q – эмпирическая константа, характеризующая влияние температурного разупрочнения материала; $\Delta T'$ – приращение гомологической температуры.

В литературе имеются похожие модели изменения предела текучести в зависимости от деформации, скорости деформации и температуры, например, модель Джонсона – Кука [20]:

$$\sigma = (A + B \varepsilon^{p^n}) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}) (1 - T^m). \quad (7)$$

Однако как определяющее уравнение (5), так и модель Джонсона – Кука (7) имеют недостатки. Например, в обоих уравнениях температура выступает как независимый фактор, т. е. можно изменить температуру, просто подогрев материал. Для того чтобы учесть зависимость совместного влияния температуры, деформации, скорости деформации в процессе фрезеро-

Таблица 1

Table 1

Механические характеристики и физические свойства жаропрочных сплавов, необходимые для расчета температуры

Mechanical characteristics and physical properties of heat-resistant alloys required for temperature calculation

Марка материала / Material grade	Предел прочности, σ_b , МПа / Ultimate strength σ_u , MPa	Относительное удлинение, δ , % / Percentage elongation %EL, %	Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/м·К / Thermal-conductivity coefficient λ , W/m·K	Объемная теплоемкость, C_V , кДж/м ³ ·К / Volumetric heat capacity C_V , kJ/ m ³ ·K	Коэффициент температуропроводности, ω , м ² /с / Thermal diffusivity coefficient ω , m ² /s	Плотность ρ , кг/м ³ / Density ρ , kg/m ³
ЭП109ВД (ХН56ВМКЮ-ВД)/ 56% Ni–Cr–W–Mo– Co–Al	1050	17	10,53	4,39	$2,858 \cdot 10^{-6}$	8400

вания, нужно заменить в определяющем уравнении (5) отношение действительного предела прочности при температуре испытания к значению действительного предела прочности при комнатной температуре на удельную работу деформации [15]:

$$\frac{\tau_p}{S_{b0}} = \frac{dA_w}{d\varepsilon_p}, \quad (8)$$

$$A_w = \int_0^{\varepsilon_u} \frac{\tau_p}{S_{b0}} d\varepsilon. \quad (9)$$

В связи с тем что при фрезеровании условия являются квазиadiaбатическими (происходит обмен с окружающей средой и обрабатываемым материалом), температуру можно определить следующим образом:

$$\Delta T' = K_{Pe} A_w A_l, \quad (10)$$

$$A_l = \frac{S_b}{C_V T_{пл}}. \quad (11)$$

Тогда определяющее уравнение примет следующий вид:

$$A_w = A \varepsilon_p^m K_\varepsilon \exp(-B_q A_l A_w K_{Pe}) d\varepsilon. \quad (12)$$

После интегрирования уравнения (12), а затем дифференцирования, были найдены точки, в которых достигаются наибольшие значения предела прочности при резании на передней поверхности:

$$\frac{\tilde{\tau}_p}{S_{b0}} = \frac{m \exp\left(\frac{-m}{m+1}\right)}{B_{q1} \left(1 - \frac{S_{b0}}{S_{b00}}\right) A_l K_{Pe} \tilde{\varepsilon}_{\tau n}}, \quad (13)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{\tau n} = \left[\frac{m}{AK_{\varepsilon n} B_{q1} A_l K_{Pe} \left(1 - \frac{S_{b0}}{S_{b00}}\right)} \right]^{\frac{1}{m+1}}. \quad (14)$$

Для расчета температур на задней поверхности инструмента использовались те же формулы, но с другими значениями коэффициентов:

$$\frac{\tilde{\tau}_p}{S_{b0}} = \frac{m \exp\left(\frac{-m}{m+1}\right)}{B_{q2} \left(1 - \frac{S_{b0}}{S_{b00}}\right) A_l K_{Pe} \tilde{\varepsilon}_{\tau z}}, \quad (15)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{\tau n} = \left[\frac{m}{AK_{\varepsilon n} B_{q2} A_l K_{Pe} \left(1 - \frac{S_{b0}}{S_{b00}}\right)} \right]^{\frac{1}{m+1}}. \quad (16)$$

В силу уравнений (10–12) зависимости (13 и 15) являются источниками тепла на передней и задней поверхности соответственно. Далее с помощью метода итераций в программной среде Excel рассчитывались температуры на передней и задней поверхности и строились графики. Ниже представлены графики теоретического расчета температур на передней поверхности режущего лезвия (рис. 3) и задней поверхности режущего лезвия (рис. 4) на примере фрезерования сплава ХН56ВМКЮ твердосплавной фрезой Seco JS513050D2C.0Z3-NXT (диаметр 5 мм, количе-

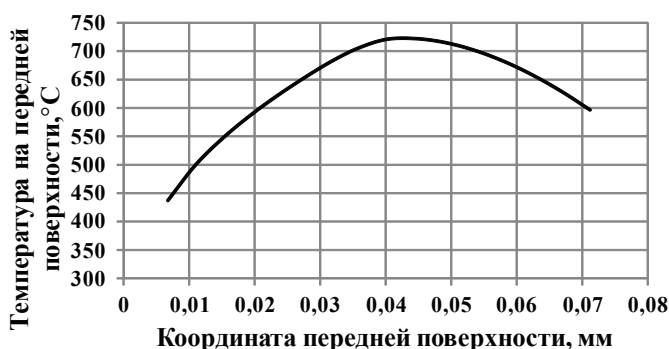


Рис. 3. Распределение температуры по передней поверхности при фрезеровании никелевого сплава ЭП109ВД (ХН56ВМКЮ-ВД) – теоретический метод

Fig. 3. Temperature distribution over the face surface during milling of nickel based alloy 56% Ni–Cr–W–Mo–Co–Al – theoretical method

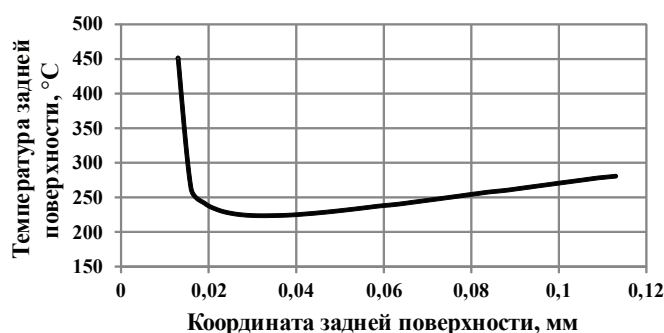


Рис. 4. Распределение температуры по задней поверхности при фрезеровании никелевого сплава ЭП109ВД (ХН56ВМКЮ-ВД) – теоретический метод

Fig. 4. Temperature distribution over the flank surface during milling of nickel based alloy 56% Ni–Cr–W–Mo–Co–Al – theoretical method

ство зубьев 3, угол подъема спирали 46° , угол в плане $\varphi = 90^\circ$, угол наклона режущей кромки $\lambda = 0^\circ$, действительный передний угол $\gamma = 8^\circ$ со следующими режимами фрезерования: $V = 15,7$ м/мин; $S_m = 52$ мм/мин; $S_z = 0,0175$ мм/зуб; $n = 1000$ об/мин; $t = 0,1$ мм.

Данные графики помогают оценить и контролировать температурный процесс при фрезеровании, так как изменение температуры непосредственно связано с изменениями режимов фрезерования (резания).

Результаты и их обсуждение

Теоретические расчеты температуры резания были подтверждены рядом экспериментальных исследований. Исследования температуры резания проводились на фрезерном станке КФПЭ-250 с системой ЧПУ Маяк-610 при симметричном фрезеровании сплава ЭП109ВД (ХН56ВМКЮ-ВД) твердосплавной фрезой фирмы Seco JS513050D2C.0Z3-NXT. Глубина фрезерования для всех опытов составляла 0,1 мм. Для измерения температуры резания использовался тепловизор модели Fluke Ti400 с погрешностью измерения нестационарного температурного поля 5 %. Фрезерование проводили с различными подачами и скоростями резания (табл. 2).

Температура резания рассчитывалась исходя из средних температур на задней и передней поверхности по формуле (рис. 5):

$$T_p = \frac{T_{\text{ПП}_{\text{ср}}} c + T_{\text{ЗП}_{\text{ср}}} h_3}{(c + h_3)}, \quad (17)$$

где $T_{\text{ПП}_{\text{ср}}}$ и $T_{\text{ЗП}_{\text{ср}}}$ – средние значения температуры на передней и задней поверхностях режущего лезвия; c и h_3 – координаты передней и задней поверхности режущего лезвия, по которым распределена температура.

Выводы

В результате исследований было выявлено, что максимальное значение температуры при фрезеровании сплава ХН56ВМКЮ-ВД со скоростью резания $V = 15,7$ м/мин, глубиной фрезерования $t = 0,1$ мм и подачей $S_z = 0,0175$ мм/зуб достигалось на передней поверхности инструмента и составляло 730°C , в то время как на задней поверхности инструмента температуры достигали значений 450°C . При этом температура резания составляла 327°C . Сопоставление экспериментальных исследований фрезерования жаропрочного сплава ХН56ВМКЮ-ВД при изменении условий резания (изменялась подача на зуб и скорость резания) с теоретическими данными дало удовлетворительный результат с доверительным интервалом 5 %. На основании экспериментальных данных можно сделать вывод, что эта методика позволяет без проведения трудоемких и затратных экспериментальных исследований теоретически рассчитать (спрог-

Таблица 2

Table 2

Результаты измерения температуры и соответствующие им теоретические расчеты для фрезерования

Temperature measurement results and corresponding theoretical calculations for milling

Номер эксперимента / Experiment No	1	2	3	4	5	6	7
$T_{\text{экс}}, ^\circ\text{C} / T_{\text{экс}}, ^\circ\text{C}$	327	280	294	374	206	273	237
$T_p, ^\circ\text{C} / T_{\text{calc}}, ^\circ\text{C}$	342	276	316	349	216	264	231
$V, \text{м/мин} / V, \text{m/min}$	15,7	15,7	15,7	22	7,9	22	15,7
$S_z, \text{мм/зуб} / S_z, \text{mm/tooth}$	0,0175	0,0095	0,0135	0,0095	0,0055	0,0055	0,0015

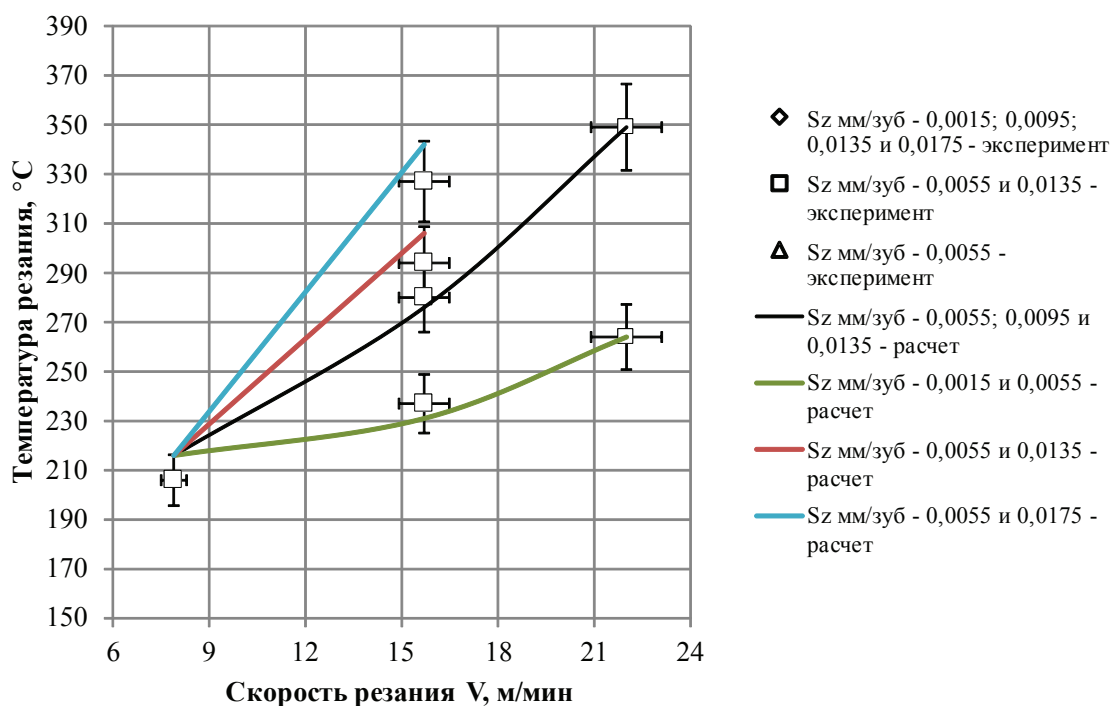


Рис. 5. Зависимость температуры резания от скорости резания и подачи при фрезеровании жаропрочного сплава ЭП109ВД (XN56BMKYU-ВД)

Fig. 5. Dependence of the cutting temperature on the cutting speed and feed during milling of nickel based alloy 56% Ni–Cr–W–Mo–Co–Al

нозировать) температуры на передней и задней поверхности режущего лезвия, а также температуру резания. Эту же методику можно распространить и на другие марки жаропрочных сплавов (XN62MBTЮ, XN73MBTЮ, XN77TЮP), поскольку определяющее уравнение для них одно и то же, при расчете необходимо лишь изменить значения их физико-механических характеристик. В дальнейшем эту методику теоретического расчета температуры можно использовать при определении минимальной (целесообразной) интенсивности изнашивания режущего инструмента.

Список литературы

1. Wear behavior of solid SiAlON milling tools during high speed milling of Inconel 718 / A. Celik, M.S. Alagac, S. Turan, A. Kara, F. Kara // *Wear*. – 2017. – Vol. 378–379. – P. 58–67. – DOI: 10.1016/j.wear.2017.02.025.
2. Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718 / J.L. Cantero, J. Diaz-Alvarez, M.H. Miguelez, N.C. Marin // *Wear*. – 2013. – Vol. 297, iss. 1–2. – P. 885–894. – DOI: 10.1016/j.wear.2012.11.004.
3. Augspurger T., Bergs T., Döbbeler B. Measurement and modeling of heat partitions and temperature fields in the workpiece for cutting Inconel 718, AISI 1045, Ti6Al4V, and AlMgSi0.5 // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 141 (6). – P. 061007. – DOI: 10.1115/1.4043311.
4. The effect of feed rate on durability and wear of exchangeable cutting inserts during cutting Ni-625 / J. Petru, T. Zlamal, R. Cep, D. Stancekova // *Tehnicki Vjesnik*. – 2017. – Vol. 24, suppl. 1. – P. 1–6. – DOI: 10.17559/TV-20131221170237.
5. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
6. Modeling and optimization of temperature in end milling operations / J.C. Baralić, N.G. Dučić, A.M. Mitrović, P.P. Kovač, M.V. Lučić // *Thermal Science*. – 2019. – Vol. 23, iss. 6A. – P. 3651–3660. – DOI: 10.2298/TSCI190328244B.
7. Liao Y.S., Lin H.M., Wang J.H. Behaviors of end milling Inconel 718 superalloy by cemented carbide tools // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – Vol. 201, iss. 1–3. – P. 460–465 – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.176.
8. Федоров С.В., Мин Х.С. Влияние комплексной поверхностной обработки на изнашивание фрезерных твердосплавных пластин при резании никелевого сплава // *Известия вузов. Физика*. – 2018. – Т. 61, № 8-2. – С. 93–97.
9. Tanaka H., Sugihara T., Enomoto T. High speed machining of Inconel 718 focusing on wear behaviors of

- PCBN cutting tool // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 46. – P. 545–548. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.120.
10. Identification of temperatures in cutting zone when dry machining of nickel alloy Inconel 718 / A. Czan, M. Sajgalik, J. Holubjak, L. Zauskova, T. Czanova, P. Martikan // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – Vol. 14. – P. 66–75. – DOI: 10.1016/j.promfg.2017.11.008.
11. Cutting zone temperature identification during machining of nickel alloy Inconel 718 / A. Czan, I. Danis, J. Holubjak, L. Zauskova, T. Czánová, M. Mikloš, P. Martikán // *Technological Engineering*. – 2017. – Vol. 14. – P. 24–29. – DOI: 10.1515/teen-2017-0017.
12. Coz G.L., Dudzinski D. Temperature variation in the work piece and in the cutting tool when dry milling Inconel 718 // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 74, iss. 5–8. – P. 1133–1139. – DOI: 10.1007/s00170-014-6006-1.
13. Sato M., Tamura N., Tanaka H. Temperature variation in the cutting tool in end milling // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2011. – Vol. 133, iss. 2. – P. 021005. – DOI: 10.1115/1.4003615.
14. Ozela T., Altan T. Process simulation using finite element method – prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in high-speed flat end milling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2000. – Vol. 40, iss. 5. – P. 713–738. – DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00080-2.
15. Heisel U., Kushner V., Storchak M. Effect of machining conditions on specific tangential forces // *Production Engineering*. – 2012. – Vol. 6, iss. 6. – P. 621–629. – DOI: 10.1007/s11740-012-0417-3.
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://www.zldm.ru/jour/article/view/477/478> (дата обращения: 27.01.2022).
17. High speed turning of Inconel 718 using PVD-coated PCBN tools / S.L. Soo, S.A. Khan, D.K. Aspinwall, P. Harden, A.L. Mantle, G. Kappmeyer, D. Pearson, R. M'Saoubi // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 65, iss. 1. – P. 89–92. – DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.044.
18. Analytical modelling methods for temperature fields in metal cutting based on panel method of fluid mechanics / F. Klocke, M. Brockmann, S. Gierlings, D. Veselovac, D. Kever, B. Roidl, G. Schmidt, U. Semmler // *Procedia CIRP*. – 2015. – Vol. 31. – P. 352–356. – DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.067.
19. Experimental studies for verification of thermal effects in cutting / U. Heisel, M. Storchak, P. Eberhard, T. Gaugele // *Production Engineering*. – 2011. – Vol. 5. – P. 507–515. – DOI: 10.1007/s11740-011-0312-3.
20. Shrot A., Baker M. Determination of Johnson–Cook parameters from machining simulations // *Computational Materials Science*. – 2012. – Vol. 52, iss. 1. – P. 298–304. – DOI: 10.1016/j.commatsci.2011.07.035.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

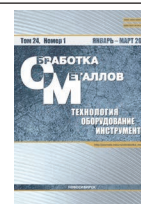
© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

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



Calculation of temperatures during finishing milling of a nickel based alloys

Dmitry Gubin^a, Anton Kisel^{b, *}

Omsk State Technical University, 11 Prospekt Mira, Omsk, 644050, 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: 30 December 2021

Revised: 10 January 2022

Accepted: 15 February 2022

Available online: 15 March 2022

Keywords:

Theoretical calculation of temperatures

Milling

Nickel based alloys

Cutting temperature

Acknowledgements

Research were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. One of the most important tasks in cutting metals and alloys is the control of the temperature factor, since temperature is one of the limitations in determining cutting conditions. This approach makes it possible to determine rational (in some cases, optimal) milling modes. Experimental methods for determining the temperature are labor-consuming, costly and not always available. The labor-consuming nature lies in the need for constant adjustment of experimental equipment due to changing cutting conditions, electrical insulation of the tool and workpiece, the appearance of parasitic electrical micro-voltage (if we are talking about temperature measurement methods with thermocouples), constant calibration of instruments and selection of thermal radiation coefficients (if we are talking about non-contact measurement methods). In this regard, there is a need for a theoretical determination of temperatures during milling with minimal use of experimental data. **The purpose of the work:** to develop a method for theoretical calculation of temperature during milling (cutting) of nickel-based heat-resistant materials on the example of 56% Ni - Cr-W Mo-Co-Al alloy (56% Ni, 0.1% C, 10% Cr, 6.5% W, 6% Al, 6.5% Mo, 0.6% Si, 13% Co, 1% Fe). **Research methodology.** To determine theoretically the cutting temperatures, a mathematical model is formed that takes into account the mechanical and thermophysical properties of the material being processed and its change depending on the temperature variations during milling, the geometry of the cutting tool and the features of the schematization of the milling process. The experimental part of the study is carried out on a console milling machine KFPE-250 with a CNC system Mayak-610. The 56% Ni - Cr-W Mo-Co-Al material is processed with a Seco JS513050D2C.0Z3-NXT cutter with different speeds and feeds. The temperature is measured using a Fluke Ti400 thermal imager. **Results and discussion.** A theoretical model for calculating the temperature (for the group of 77% Ni - Cr - Ti - Al - B, 66% Ni - Cr - Mo - W - Ti - Al, 73% Ni-Cr-Mo-Nb-Ti-Al and 56% Ni - Cr-W Mo-Co-Al alloys) during milling of heat-resistant nickel-based alloys is developed, which makes it possible to predict the temperature value at the face and flank of the tool when changing cutting conditions (speed, feed, depth, cutting tool geometry), as well as the cutting temperature. An analysis of the experimental and theoretically predicted values of the cutting temperature showed a satisfactory agreement between the corresponding values.

For citation: Gubin D.S., Kisel' A.G. Calculation of temperatures during finishing milling of a nickel based alloys. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 23–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-23-32. (In Russian).

References

1. Celik A., Alagac M.S., Turan S., Kara A., Kara F. Wear behavior of solid SiAlON milling tools during high speed milling of Inconel 718. *Wear*, 2017, vol. 378–379, pp. 58–67. DOI: 10.1016/j.wear.2017.02.025.
2. Cantero J.L., Díaz-Álvarez J., Miguélez M.H., Marín N.C. Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718. *Wear*, 2013, vol. 297, iss. 1–2, pp. 885–894. DOI: 10.1016/j.wear.2012.11.004.
3. Augspurger T., Bergs T., Döbbeler B. Measurement and modeling of heat partitions and temperature fields in the workpiece for cutting Inconel 718, AISI 1045, Ti6Al4V, and AlMgSi0.5. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019, vol. 141 (6), p. 061007. DOI: 10.1115/1.4043311.

* Corresponding author

Kisel' Anton G., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Omsk State Technical University
 11 Prospekt Mira,
 644050, Omsk, Russian Federation
 Tel.: +7 (999) 458-08-25, e-mail: kisel1988@mail.ru

4. Petru J., Zlámál T., Čep R., Sadílek M., Stančková D. The effect of feed rate on durability and wear of exchangeable cutting inserts during cutting Ni-625. *Tehnicki Vjesnik = Technical Gazette*, 2017, vol. 24, suppl. 1, pp. 1–6. DOI: 10.17559/TV-20131221170237.
5. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Cutting process optimization]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.
6. Baralić J.C., Dučić N.G., Mitrović A.M., Kovač P.P., Lučić M.V. Modeling and optimization of temperature in end milling operations. *Thermal Science*, 2019, vol. 23, iss. 6A, pp. 3651–3660. DOI: 10.2298/TSCI190328244B.
7. Liao Y.S., Lin H.M., Wang J.H. Behaviors of end milling Inconel 718 superalloy by cemented carbide tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 201, iss. 1–3, pp. 460–465. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.176.
8. Fedorov S.V., Min Kh.S. Vliyanie kompleksnoi poverkhnostnoi obrabotki na iznashivanie frezernykh tverdosplavnykh plastin pri rezanii nikelovogo splava [The influence of complex surface treatment on wear of milling carbide inserts when machining of nickel alloy]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika = Russian Physics Journal*, 2018, vol. 61, no. 8-2, pp. 93–97. (In Russian).
9. Tanaka H., Sugihara T., Enomoto T. High speed machining of Inconel 718 focusing on wear behaviors of PCBN cutting tool. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 545–548. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.120.
10. Czan A., Sajgalik M., Holubjak J., Zauskova L., Czanova T., Martikan P. Identification of temperatures in cutting zone when dry machining of nickel alloy Inconel 718. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 14, pp. 66–75. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.11.008.
11. Czan A., Danis I., Holubjak J., Zauskova L., Czánová T., Mikloš M., Martikán P. Cutting zone temperature identification during machining of nickel alloy Inconel 718. *Technological Engineering*, 2017, vol. 14, pp. 24–29. DOI: 10.1515/teen-2017-0017.
12. Coz G.L., Dudzinski D. Temperature variation in the work piece and in the cutting tool when dry milling Inconel 718. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, iss. 5–8, pp. 1133–1139. DOI: 10.1007/s00170-014-6006-1.
13. Sato M., Tamura N., Tanaka H. Temperature variation in the cutting tool in end milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, vol. 133, iss. 2, p. 021005. DOI: 10.1115/1.4003615.
14. Ozela T., Altan T. Process simulation using finite element method – prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in high-speed flat end milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, vol. 40, iss. 5, pp. 713–738. DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00080-2.
15. Heisel U., Kushner V., Storchak M. Effect of machining conditions on specific tangential forces. *Production Engineering*, 2012, vol. 6, iss. 6, pp. 621–629. DOI: 10.1007/s11740-012-0417-3.
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, no. 5, pp. 45–49. Available at: <https://www.zldm.ru/jour/article/view/477/478> (accessed 27.01.2022).
17. Soo S.L., Khan S.A., Aspinwall D.K., Harden P., Mantle A.L., Kappmeyer G., Pearson D., M'Saoubi R. High speed turning of Inconel 718 using PVD-coated PCBN tools. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2016, vol. 65, iss. 1, pp. 89–92. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.044.
18. Klocke F., Brockmann M., Gierlings S., Veselovac D., Kever D., Roidl B., Schmidt G., Semmler U. Analytical modelling methods for temperature fields in metal cutting based on panel method of fluid mechanics. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 31, pp. 352–356. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.067.
19. Heisel U., Storchak M., Eberhard P., Gaugele T. Experimental studies for verification of thermal effects in cutting. *Production Engineering*, 2011, vol. 5, pp. 507–515. DOI: 10.1007/s11740-011-0312-3.
20. Shrot A., Baker M. Determination of Johnson–Cook parameters from machining simulations. *Computational Materials Science*, 2012, vol. 52, iss. 1, pp. 298–304. DOI: 10.1016/j.commatsci.2011.07.035.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.