УДК 621.923

А. Н. УНЯНИН, И. В. СЕМДЯНКИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ СКОРОСТЯМИ ПОДАЧ

Выполнено численное моделирование кинематических и силовых параметров и температурного поля, возникающего в процессе фрезерования заготовок тонкостенных деталей. Варьировали толщиной заготовки и скоростью подачи фрезы. Установлено влияние этих параметров на силу трения стружки о зуб фрезы и зуба фрезы о заготовку, главную составляющую силы резания, мощности источников тепловыделения, температуры на передней и задней поверхностях фрезы и температуры в поверхностных слоях заготовок. При увеличении скорости подачи увеличиваются силы трения и главная составляющая силы резания, мощности источников тепловыделения и температура на передней поверхности зуба фрезы и незначительно уменьшается температура в поверхностных слоях заготовки. Температура в поверхностном слое тонкостенной заготовки выше, чем в массивной.

Ключевые слова: моделирование, фрезерование, температурное поле, тонкостенная заготовка, скорость подачи.

Работоспособность инструмента и качество обработанных деталей при фрезеровании существенно зависят от тепловой напряжённости процесса.

Тепловые процессы, сопровождающие процесс фрезерования заготовок, имеющих значительную толщину, изучены достаточно полно. При фрезеровании заготовок тонкостенных деталей тепловые процессы отличаются от протекающих в массивных заготовках. К тонкостенным (с точки зрения тепловых процессов) относят заготовки, при обработке которых поверхность, расположенная напротив обрабатываемой поверхности, оказывает существенное влияние на температурное поле в заготовке. Это вызвано низким уровнем теплоотвода этой поверхности, поскольку теплоотвод в окружающую среду, в том числе смазочно-охлаждающую жидкость, существенно меньше, чем в нижележащие слои заготовки [1, 2].

Для расчёта температурного поля, возникающего в процессе фрезерования цилиндрическими фрезами и периферией концевых фрез, разработаны физические и математические модели, позволяющие учесть наличие трёх источников тепловыделения: в зоне деформирования и в зонах контакта зубьев со стружкой и заготовкой [3, 4]. Модели [4] учитывают наложение тепловых импульсов от отдельных зубьев, зависимость теплофизических свойств контактирующих объектов (фрезы, заготовки и стружки) и механических свойств материала заготовки (напряжения текучести) от температуры, распределение тепловых потоков между фрезой, заготовкой и стружкой, а также изменение параметров процесса в зависимости от положения зуба на поверхности контакта с заготовкой. Рассмотрена двумерная задача теплообразования в сечении фрезы, перпендикулярном её оси.

Для схемы встречного фрезерования (рис. 1) максимальная глубина внедрения зуба в заготовку

$$a_{m\max} = BC = S_z \cdot \sin\alpha_{\max},$$

где S_z – подача на зуб фрезы, мм/зуб.

$$\alpha_{\max} = \arccos\frac{D - 2 \cdot t}{D},$$

где D – диаметр фрезы, мм; t – глубина резания, мм.

Напряжение текучести обрабатываемого материала в области деформирования, являющееся аргументом зависимостей для расчёта сил резания и трения, определяли как [5]

© Унянин А. Н., Семдянкин И. В., 2021

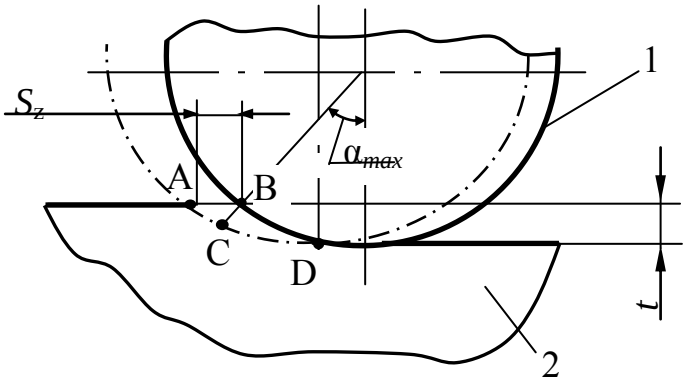


Рис. 1. Схема к расчёту глубины внедрения зуба в заготовку: 1 – фреза; 2 – заготовка

Таблица 1

Зависимость сил резания и мощностей источников тепловыделения от толщины заготовки h_u и скорости подачи V_S: время контакта зуба с заготовкой $\tau = 12{,}5 \cdot 10^{-4}$ с; коэффициент теплоотдачи от необрабатываемой поверхности заготовки $\alpha_6 = 40$ Вт/(м^2·К)

Размер (толщина) заготовки h_3, мм	Скорость подачи V_S, м/мин	Глубина внедрения зуба в заготовку, $a_{m\,max}$, мкм	Температура деформируемого слоя заготовки T_g, К	Сила трения, Н		Составляющая силы резания P_z, Н	Мощности источников тепловыделения, Вт		
				стружки о переднюю поверхность зуба F_1	стружки о заднюю поверхность зуба F_2		в зоне контакта стружки с зубом W_1	в зоне деформирования W_g	в зоне контакта зуба с заготовкой W_2
10	0,8	24,4	414	29,4	50,4	84,5	44,1	58,1	151,2
10	1	30,5	413	36,5	50,5	92,8	54,8	72,3	151,3
10	1,2	36,6	407	43,1	50,6	100,7	64,8	85,6	151,8
1	0,8	24,4	451	28,7	49,2	82,4	43,1	56,7	147,5
1	1	30,5	450	35,6	49,2	90,6	53,5	70,5	147,7
1	1,2	36,6	443	42,2	49,5	98,5	63,3	83,7	148,3

Таблица 2

Зависимость температур от толщины заготовки h_u и скорости подачи V_S: время контакта зуба с заготовкой $\tau = 12{,}5 \cdot 10^{-4}$ с; коэффициент теплоотдачи от необрабатываемой поверхности заготовки $\alpha_6 = 40$ Вт/(м^2·К)

Размер (толщина) заготовки h_3, мм	Скорость подачи V_S, м/мин	Температура на вершине зуба T_E, К	Средняя температура, К на площадках контакта		Максимальная температура, К на площадках контакта		Температура заготовки, К, на глубине	
			стружки с зубом, T_1	зуба с заготовкой, T_2	стружки с зубом, T_{1max}	зуба с заготовкой, T_{2max}	25 мкм	500 мкм
10	0,8	988	851	902	882	1245	578	463
10	1	993	871	991	1092	1285	578	465
10	1,2	986	877	884	1122	1279	568	430
1	0,8	1001	867	927	899	1264	635	547
1	1	1006	889	948	1109	1305	633	539
1	1,2	999	898	910	1156	1300	620	528

$$\sigma_{St} = \sigma_S\left(1 - \frac{T_g}{T_p}\right),$$

где σ_S – напряжение текучести материала заготовки при температуре 20°С, Па; T_g – температура в области деформирования, °С; T_p – температура плавления обрабатываемого материала, °С.

Силы трения и главную составляющую силы резания рассчитывали как приходящиеся на 1 мм высоты зуба фрезы.

Численное моделирование температурного поля выполнили при следующих исходных данных: диаметр фрезы – 20 мм; материал зуба фрезы – твёрдый сплав Т5К10; высота профиля зуба – 4 мм; число зубьев – 5; передний угол фрезы $\gamma = 10°$; скорость резания $V = 3$ м/с; скоростью подачи варьировали в пределах $V_S = 0{,}8 \ldots 1{,}2$ м/мин; глубина резания $t = 1$ мм [6]. Теплофизические характеристики материала заготовки (сталь 40Х) и фрезы (плотности, коэффициенты теплопроводности и теплоёмкости) в зависимости от температуры определяли по справочным данным. Параметры процесса фрезерования фиксировали при работе 35-го зуба, когда поверхностные слои заготовки в достаточной степени прогреты при работе предшествующих зубьев [4].

Варьировали толщиной заготовки в пределах 0,7 … 10 мм. Заготовка толщиной 10 мм относится (с точки зрения тепловых процессов) к массивным заготовкам, при обработке которых наличие поверхности, расположенной напротив обрабатываемой, не оказывает влияния на температурное поле в заготовке.

При обработке заготовок толщиной 3 и 2 мм силовые параметры процесса и температурное поле незначительно отличаются от соответствующих параметров, зафиксированных при обработке заготовок толщиной 10 мм.

Значительная разница с массивной заготовкой получена при обработке заготовки толщиной 1 мм: температура деформируемого слоя увеличивается в среднем на 7%, что приводит к снижению сил и мощностей источников тепловыделения (табл. 1, 2). При этом увеличиваются как средние, так и максимальные температуры в зонах контакта зуба со стружкой и заготовкой и температура заготовки. В большей степени увеличивается температура заготовки: на 7 и 13% на глубине 25 и 500 мкм соответственно. При обработке заготовок толщиной 0,7 мм разница всех параметров в сравнении с массивной заготовкой более значительная.

При обработке тонкостенной заготовки её температуры выше не только на значительном расстоянии от обрабатываемой поверхности, но и вблизи от неё.

Увеличение скорости подачи с 0,8 до 1,2 м/мин приводит к увеличению максимальной глубины внедрения зуба фрезы в заготовку $a_{m\,max}$ на 50%. Однако температура деформируемого слоя заготовки T_g незначительно уменьшается. Причина этого заключается в том, что при увеличении подачи зуб фрезы контактирует с материалом заготовки, в меньшей степени прогретым в результате работы предшествующих зубьев. В результате уменьшения T_g увеличивается напряжение текучести обрабатываемого материала и силы F_1 и P_z. Сила трения стружки о заднюю поверхность зуба F_2 незначительно изменяется с увеличением подачи. Мощности источников тепловыделения W_1 и W_g увеличиваются в среднем на 48%; мощность источника в зоне контакта зуба с заготовкой W_2 с увеличением подачи изменяется несущественно.

В результате увеличиваются как средние, так и максимальные температуры на площадках контакта зуба со стружкой, причём в большей степени увеличиваются максимальные температуры – в среднем на 28%. Средние и максимальные температуры на площадках контакта зуба с заготовкой при увеличении V_S до 1 м/мин увеличиваются; при дальнейшем увеличении V_S до 1,2 м/мин – снижаются. Мощность источника тепловыделения W_2 на этой площадке, как было отмечено выше, от скорости подачи мало зависит, но при $V_S = 1{,}2$ м/мин ниже температура заготовки, с которой контактирует зуб фрезы. Очевидно, этими факторами и объясняется нелинейный характер зависимости температур T_2 и $T_{2\max}$ от скорости подачи.

Температура в поверхностных слоях заготовки с увеличением V_S незначительно снижается.

В результате исследования установлено, что при увеличении скорости подачи значительно увеличивается температура на передней поверхности зуба фрезы и незначительно уменьшается температура в поверхностных слоях заготовки. Температура в поверхностном слое тонкостенной заготовки выше, чем у массивной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Худобин Л. В., Хусаинов А. Ш. Шлифование заготовок клиновидных изделий / Под общ. ред. Л. В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 249 с.

2. Shigeki O., Tokuhiko N., Shinsaki H. Study on the geometrical accuracy in surface grinding. Thermal deformation of workpiece in traverse grinding // International journal Japanese society precision engineering. – 1994. − Vol. 28. – №4. – pp. 305–310.

3. Резников А. Н., Резников Л. А.Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

4. Унянин А. Н. Аналитическое исследование температурного поля при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний // Вестник РГАТУ им. П. А. Соловьева. – 2017. − №2 (41). – С. 220–235.

5. Васин С. А., Верещака А. С., Кушнер В. С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник для технических вузов. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 448 с.

6. Справочник инструментальщика / И. А. Ординарцев, Г. В. Филиппов, А. Н. Шевченко и др.; Под общ. ред. И. А. Ординарцева. – Л. : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1987. – 846 с.

REFERENCES

1. Khudobin L. V., Khusainov A. Sh. *Shlifovanie zagotovok klinovidnyh izdelij* [Grinding of blanks of wedge-shaped products] *Pod obshch. red. L. V. Hudobina* Ed. ed. L. V. Khudobin. Ulyanovsk, UlSTU, 2007, 249 p.

2. Shigeki O., Tokuhiko N., Shinsaki H. Study on the geometrical accuracy in surface grinding. Thermal deformation of workpiece in traverse grinding. International journal Japanese society precision engineering, 1994, Vol. 28, No. 4, pp. 305–310.

3. Reznikov A. N., Reznikov L. A. *Teplovye processy v tekhnologicheskih sistemah* [Thermal processes in technological systems]. [Moscow, Mashinostroenie], 1990, 288 p.

4. Unyanin A. N. *Analiticheskoe issledovanie temperaturnogo polya pri frezerovanii s nalozheniem ul'trazvukovyh kolebanij* [Analytical study of the temperature field during milling with the imposition of ultrasonic vibrations] *Vestnik RGATU im. P. A. Solov'eva* [Bulletin of the RGATU im. P. A. Solovyov], 2017, No. 2 (41), pp. 220–235.

5. Vasin S. A., Vereshchaka A. S, Kushner V. S. *Rezanie materialov: Termomekhanicheskij podhod k sisteme vzaimosvyazej pri rezanii: uchebnik dlya tekhnicheskih vuzov* [Cutting of materials: Thermomechanical approach to the system of interconnections during cutting: a textbook for technical universities] *Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Baumana* [Moscow, Publishing house of MSTU im. N. E. Bauman], 2001, 448 p.

6. *Spravochnik instrumental'shchika* [Handbook of the toolmaker] *Pod obshch. red. I. A. Ordinarceva.* [I. A. Ordinartsev, G. V. Filippov, A. N. Shevchenko and others; Under total. ed. I. A. Ordinartseva]. *L., Mashinostroenie, Leningradskoe otdelenie,* [L., Mechanical engineering, Leningrad branch], 1987, 846 p.

• • • • • • • • • • • • • • • • • • •

Унянин Александр Николаевич*, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные технологии в машиностроении» УлГТУ.*

Семдянкин Илья Викторович*, аспирант кафедры «Информационные технологии в машиностроении» УлГТУ первого года обучения.*

Поступила 12.03.2021 г.