

УДК 621.91

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗНОСА ФРЕЗЫ И РЕЖИМА НА ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИКАРБОНАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

© 2024 А.Н. Унянин, И.З. Димухаметов

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

Статья поступила в редакцию 23.04.2024

Исследования выполнены с целью установления влияния износа зубьев фрезы и элементов режима фрезерования заготовок из поликарбоната на технологические параметры процесса, в том числе теплосиловые, и определения элементов режима, обеспечивающих заданные параметры. Приведены результаты численного моделирования технологических параметров при различных комбинациях износа фрезы, глубины и скорости резания без применения и с применением ультразвуковых колебаний (УЗК). Установлены закономерности изменения параметров процесса фрезерования заготовок в зависимости от износа фрезы, глубины и скорости резания, в том числе с применением УЗК. Использование УЗК позволяет снизить главную составляющую силы резания, средние и максимальные значения температур в зоне контакта стружки с зубом и в зоне контакта зуба с заготовкой. Используя полученные уравнения, устанавливающие влияние износа и элементов режима на параметры процесса обработки без применения и с применением УЗК, возможно рассчитать элементы режима, обеспечивающие заданные параметры процесса фрезерования при увеличении износа зуба.

Ключевые слова: фрезерование, моделирование, поликарбонат, силы, температуры, ультразвуковые колебания, износ, режим фрезерования.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-3-54-62

EDN: CRNSBF

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00206, <https://rscf.ru/project/24-29-00206/>

Поликарбонат все более широко используется для изготовления деталей машин и приборов. Однако рекомендации, касающиеся выбора условий и режима механической обработки заготовок деталей из поликарбоната, носят ориентировочный характер.

Параметры процесса механической обработки, в том числе силы резания и температуры в зоне обработки и параметры качества обработанных деталей существенно изменяются с увеличением времени работы инструмента вследствие его износа. Поэтому исследованию процесса изнашивания инструмента и влияния износа на параметры механической обработки заготовок из поликарбоната уделяется значительное внимание.

Исследование [1] направлено на изучение износа инструмента и шероховатости поверхности при фрезеровании заготовок из поликарбоната твердосплавными инструментами без покрытия и с покрытием. Установлены элементы режима обработки, обеспечивающие мини-

мальную шероховатость обработанной поверхности и износ инструмента.

Выполнено исследование качества обработанной поверхности, в том числе процесса образования заусенцев при фрезеровании заготовок деталей из поликарбоната [2]. Установлено, что инструмент без покрытия с минимальным радиусом кромки (т.е. как можно более острый) обеспечивает минимальную шероховатость поверхности с небольшим количеством заусенцев или вообще без них, особенно при больших подачах.

Исследование [3] направлено на изучение влияния условий обработки, износа инструмента и состава покрытия инструмента на интенсивность образования заусенцев при механической обработке поликарбоната.

Одним из средств повышения эффективности механической обработки является использование энергии ультразвуковых колебаний (УЗК), позволяющих снизить силовую и тепловую напряженности процесса обработки. Однако влияние износа зубьев фрезы при различном режиме обработки на технологические параметры процесса фрезерования заготовок деталей из поликарбоната с использованием УЗК не установлено. Это затрудняет разработ-

*Унянин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные технологии в машиностроении». E-mail: a_un@mail.ru
Димухаметов Илназ Зеферович, аспирант.
E-mail: iln-d@yandex.ru*

ку рекомендаций по выбору условий и режима фрезерования.

При моделировании технологических параметров процесса встречного цилиндрического фрезерования с применением УЗК учитывали три источника тепловыделения: в зоне деформирования мощностью W_g и в зонах контакта зуба фрезы со стружкой (W_{1T}) и заготовкой (W_{2T}).

Мощности источников тепловыделения рассчитывали по формулам [4, 5]:

$$W_{1T} = F_1 \cdot V_1; W_{2T} = F_2 \cdot V;$$

$$W_g = P_z \cdot V - (W_{1T} + W_{2T}),$$

где F_1 и F_2 – сила трения на поверхности контакта зуба со стружкой и заготовкой соответственно, Н; V – скорость резания, м/с; P_z – главная составляющая силы резания, Н; V_1 – скорость перемещения стружки относительно передней поверхности зуба фрезы, м/с.

Расчет сил резания и трения выполняли по формулам, полученным преобразованием зависимостей [6, 7], аргументами которых является глубина внедрения зуба в заготовку a_m , изменяющаяся на траектории контакта зуба фрезы с заготовкой:

$$a_m = a + A_y \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot \tau + \varphi),$$

где A_y – амплитуда колебания в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, м; f – частота УЗК, Гц; φ – начальная фаза УЗК, рад.; τ – время контакта зуба с заготовкой, с; $a = S_z \cdot \sin \theta$, где S_z – подача на зуб фрезы, мм/зуб; θ – текущий угол контакта зуба фрезы с заготовкой, град.

Источник тепловыделения в зоне деформирования приняли равномерно распределенным; в зоне контакта стружки с передней поверхностью зуба – распределенным по комбинированному закону; в зоне контакта зуба с заготовкой – по несимметричному нормальному закону [4, 5].

Условия взаимодействия зуба фрезы, обрабатываемой поверхности заготовки и стружки представлены граничными условиями 2-го рода. Например, в пределах зоны контакта зуба с заготовкой условие имеет вид:

$$\frac{\partial T_3}{\partial y} = -\frac{q'_{2T}}{\lambda_3}; \quad \frac{\partial T_2}{\partial y} = -\frac{q''_{2T}}{\lambda_2}; \quad T_3 = T_2;$$

$$q'_{2T} + q''_{2T} = q_{2T},$$

где T_3 и T_2 – температуры контактирующих поверхностей заготовки и задней поверхности зуба, К; q'_{2T} , q''_{2T} – тепловые потоки, направленные в заготовку и зуб фрезы, Вт/м²; q_{2T} – плотность источника тепловыделения в зоне контакта зуба с заготовкой, Вт/м²; λ_2 , λ_3 – коэффициент теплопроводности зуба и заготовки, Вт/(м · К).

На поверхностях фрезы, стружки и заготовки, контактирующих с окружающей средой

(СОЖ или воздухом), конвективный теплообмен задан в форме закона Ньютона-Рихмана (граничные условия 3-го рода):

$$-\lambda_z(T_z) \cdot \frac{\partial T_z}{\partial n} = \alpha_j \cdot (T_{jf} - T_w),$$

где z – номер объекта (заготовки, стружки, зуба или корпуса фрезы); T_z – температура z -го объекта, К; λ_z – коэффициент теплопроводности материала z -го объекта, Вт/(м · К); j – номер поверхности; α_j – коэффициент теплоотдачи от j -й поверхности, Вт/(м²·К); T_{jf} , T_w – температура соответственно j -й поверхности и окружающей среды, К.

Известные коэффициенты, характеризующие относительное распределение теплоты между контактирующими объектами, содержат в качестве аргументов теплофизические характеристики материалов, зависящие от температуры, которая заранее не известна, поэтому при расчете этих коэффициентов может быть получена погрешность.

Невозможность априорного определения плотностей распределения тепловых потоков между контактирующими объектами с достаточной точностью, изменение положения зон тепловыделения во времени, необходимость учета зависимости теплофизических свойств контактирующих объектов и предела текучести материала заготовки от температуры затрудняют решение задачи аналитическим методом. Поэтому использовали численный метод конечных элементов.

При построении дискретных аналогов дифференциальных уравнений теплопроводности использован универсальный метод баланса. Время, в течение которого происходит теплообмен, разбито на конечные малые промежутки Δt . Параметры температурного поля, определенные в какой-либо момент времени, используются для расчета теплофизических свойств контактирующих объектов и предела текучести материала заготовки в последующий момент времени.

Численное моделирование параметров процесса выполнили для встречного фрезерования заготовки фрезой диаметром 20 мм, изготовленной из твердого сплава Т5К10 и имеющей 5 зубьев (шаг зубьев $t_z = 12,6$ мм) и передний угол $\gamma = 10^\circ$ [8]. Варьировали элементами режима фрезерования: скоростью резания ($V = 6$ и 12 м/с); глубиной резания ($t = 0,5$ и 1 мм); размером площадки износа $l_{ин}$ на задней поверхности зуба, принимая ее равной 20 и 60 мкм. План численного моделирования включает различные комбинации элементов режима и износа зуба (табл. 1), при этом подача на зуб фрезы является неизменной и равной $S_z = 0,12$ мм/зуб.

При моделировании принимали во внимание, что поликарбонат имеет следующие харак-

Таблица 1. План численного моделирования

№ эксперимента	Размер площадки износа на зубе $l_{из}$, мм	Глубина резания t , мм	Скорость резания V , м/с	Скорость подачи V_s , м/мин
1	20	0,5	6	3,44
2	60	0,5	6	3,44
3	20	1	6	3,44
4	60	1	6	3,44
5	20	0,5	12	6,88
6	60	0,5	12	6,88
7	20	1	12	6,88
8	60	1	12	6,88

теристики: температура размягчения 220 ... 230 °С; предел прочности при растяжении – 65 ... 70 МПа; предел прочности при изгибе – 95 МПа; удельная теплоемкость – 1090 ... 1255 Дж/(кг·К); теплопроводность – 0,20 Вт/(м·К); плотность – 1,20 г/см³(при 20 °) [9, 10]. При обработке без применения СОЖ коэффициент трения в зоне контакта поликарбоната с зубом фрезы приняли равным $\mu = 0,4$ [9].

При моделировании использовали УЗК частотой $f = 18600$ Гц и амплитудой колебания в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, равной $A_y = 10$ мкм. Частота колебаний $f = 18600$ Гц широко используется в промышленных ультразвуковых установках. При такой частоте и всех используемых режимах фрезерования время контакта зуба с заготовкой в несколько раз превышает четверть периода колебаний, поэтому под влиянием УЗК достигаются качественные изменения процесса резания [11].

При увеличении амплитуды колебаний, как показали предварительные экспериментальные исследования и результаты моделирования, уменьшается теплосиловая напряженность процесса, но увеличивается микрогеометрия обработанной поверхности. При наложении УЗК относительные колебания инструмента и заготовки увеличиваются на величину A_y и зависимость для расчёта шероховатости, предложенная в работе [12], примет вид: $Ra = 0,2 \cdot (h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + A_y)$, где h_1, h_2, h_3, h_4 – составляющие профиля шероховатости, обусловленные геометрией и кинематикой рабочей части режущего инструмента (фрезы) (h_1), относительными колебаниями инструмента и заготовки (h_2), пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки (h_3), шероховатостью рабочих поверхностей инструмента (h_4) соответственно. Расчеты показали, что при амплитуде УЗК A_y свыше 10 мкм параметр Ra увеличивается более, чем на 2 мкм в сравнении с обработкой без применения колебаний.

Моделирование технологических параметров выполнили полагая, что под влиянием УЗК коэффициент трения в зонах контакта зуба фре-

зы с заготовкой и со стружкой снижается в 1,5 раза [13], а предел текучести поликарбоната на 15 % [14, 15].

Разработанное программное обеспечение позволяет рассчитать параметры процесса для различных моментов времени контакта зуба фрезы с заготовкой. Температуры достигают значительных величин в первые моменты времени контакта и увеличиваются в последующие моменты времени. В последний момент времени контакта температура деформируемого слоя несколько ниже, чем в предпоследний, т.к. в последний момент зуб вступает в контакт с материалом заготовки, в меньшей степени нагретым в результате работы предшествующих зубьев. Поэтому в последний момент времени выше предел текучести материала заготовки (поликарбоната) σ_{st} , а, следовательно, силы резания и трения, мощности и плотности источников тепловыделения. В этот момент времени значения средней и максимальной температур в зонах контакта зуба фрезы со стружкой и заготовкой выше, чем в предыдущий (предпоследний) (табл. 2, 3).

Поэтому параметры процесса фрезерования фиксировали в момент времени перед выходом зуба фрезы из контакта с заготовкой и в предпоследний, меньший последнего на 8×10^{-5} с. Результаты, зафиксированные в последний момент времени, в таблицах представлены в числителе, в предпоследний момент времени – в знаменателе.

Силы трения и резания и мощности источников тепловыделения при фрезеровании заготовок из поликарбоната на порядок ниже, чем при фрезеровании заготовок из металлов [4, 5, 16], что объясняется более низким пределом прочности этого материала и низкой температурой размягчения.

При увеличении размера площадки износа $l_{из}$ с 20 до 60 мкм в предпоследний момент времени контакта зуба с заготовкой увеличивается на 15 ... 20 % температура деформируемого слоя материала заготовки T_d . Увеличение значения T_d приводит к уменьшению предела текучести материала заготовки σ_{st} , соответствующего этой температуре, на 2 и более МПа. Вследствие

Таблица 2. Параметры процесса фрезерования при различных элементах режима и значениях площадки износа

№ эксперимента по табл. 1	Максимальная глубина внедрения зуба в заготовку a_{max} , мкм	Длина траектории контакта зуба фрезы с заготовкой l_k , мм	Максимальная длина контакта стружки с передней поверхностью зуба l , мкм	Текущая глубина внедрения зуба в заготовку a_m , мкм	Температура деформируемого слоя материала заготовки T_d , К	Предел текучести материала заготовки σ_{st} , МПа (при температуре T_d)
1	37,6	3,17	120,9	35/30,5	297/347	59,5/53,5
2	37,6	3,17	120,9	35/30,5	297/333,5	59,5/55,1
3	52,5	4,51	168,7	49,2/40,4	297/344	59,5/53,9
4	52,5	4,51	168,7	49,2/40,4	297/360,3	59,5/51,9
5	37,6	3,17	120,9	35/30,5	297,5/347,5	59,45/53,45
6	37,6	3,17	120,9	35/30,5	297,6/368,6	59,5/50,9
7	52,5	4,51	168,7	49,2/40,4	296/344	59,6/53,9
8	52,5	4,51	168,7	49,2/40,4	296,1/363	59,6/51,6

Таблица 3. Параметры процесса фрезерования при различных элементах режима и значениях площадки износа

№ эксперимента	Сила трения стружки о переднюю поверхность зуба F_1 , Н	Сила трения зуба о заготовку F_2 , Н	Главная составляющая силы резания P_z , Н	Температура в зоне контакта стружки с зубом T_1 , К		Температура в зоне контакта зуба с заготовкой T_2 , К		Температура заготовки на расстоянии 25 мкм от обрабатываемой поверхности T_3 , К
				средняя	максимальная	средняя	максимальная	
1	6,9/5,4	0,69/0,62	6,11/4,86	530/515	709/681	514/501	560/542	306,4/304
2	6,7/5,38	2,06/1,91	7,31/6,12	553/537	753/728	519/508	575/560	302/300
3	9,7/7,2	0,69/0,62	8,3/6,3	596/573	826/792	587/567	654/624	312/310
4	9,53/6,8	2,06/1,8	9,55/7,13	604/574	844/797	571/547	664/624	310/307
5	6,96/4,25	0,69/0,62	6,14/3,94	716/656	1056/972	748/703	864/807	295/294
6	6,7/3,84	2,05/1,76	7,32/4,76	730/656	1072/961	692/630	890/808	303/296
7	10/5,9	0,69/0,62	8,55/5,2	800/723	1235/1059	822/766	961/892	310/305
8	9,54/5,25	2,07/1,78	9,56/5,9	803/713	1249/1094	768/692	971/880	307/303

Примечание: F_1, F_2, P_z – силы, приходящиеся на 1 мм высоты зуба фрезы

меньшего значения σ_{st} при большем значении износа несколько ниже значение силы трения F_1 . Однако сила трения F_2 увеличивается в среднем в 3 раза при увеличении l_n с 20 до 60 мкм, а главная составляющая силы резания P_z также увеличивается, но в меньшей степени – на 13 ... 19 %, причем в большей степени при скорости резания $V = 6$ м/с (табл. 3).

Среднее значение температуры в зоне контакта стружки с передней поверхностью зуба T_1 незначительно увеличивается с увеличением износа при всех комбинациях элементов режима. Среднее значение температуры в зоне контакта задней поверхности зуба с заготовкой T_2 увеличивается с увеличением износа при глубине резания $t = 0,5$ мм и скорости резания $V = 6$ м/с; при остальных режимах снижается, причем в большей степени – при $V = 12$ м/с – на 7 %.

Максимальные значения температур T_1 и T_2 увеличиваются с увеличением износа, причем в большей степени – при меньших значениях глубины и скорости резания.

Температура в поверхностном слое заготовки на глубине 25 мкм незначительно снижается с увеличением износа, что является следствием уменьшения средней температуры T_2 .

При увеличении глубины резания t увеличиваются: длина траектории контакта зуба с заготовкой l_k на 40 %; максимальная глубина внедрения зуба в заготовку a_{max} на 30 %; максимальная длина контакта стружки с передней поверхностью зуба l на 42 %. На 30 ... 40 % увеличивается также текущая глубина внедрения зуба в заготовку a_m , при которой зафиксированы параметра процесса фрезерования в процессе расчета. Поэтому при глубине резания $t = 1$ мм

главная составляющая силы резания P_z выше на 36 ... 39 %, среднее значение температуры T_1 – на 10 ... 12 %, среднее значение температуры T_2 – на 10 ... 14 %, чем при $t = 0,5$ мм. На силу трения F_2 изменение глубины резания влияния не оказывает. При $t = 1$ мм зафиксированы более высокие значения максимальных температур T_1 и T_2 , а также температуры заготовки T_3 на глубине 25 мкм, причем параметр T_3 в большей степени увеличивается при скорости резания $V = 12$ м/с.

Увеличение скорости резания приводит к снижению значения силы трения F_1 и силы P_z (на 17 ... 18 %) в предпоследний момент времени контакта зуба. Однако вследствие увеличения мощностей источников тепловыделения

с повышением скорости температуры в зонах контакта зуба со стружкой и заготовкой увеличиваются: средние температуры T_1 и T_2 на 33 ... 35 и 38 ... 45 % соответственно; максимальные температуры T_1 и T_2 – на 16 ... 17 и 46 ... 54 % соответственно. Скорость резания оказывает большее влияние на среднее и максимальное значение температуры T_2 .

Температура в поверхностном слое заготовки снижается с увеличением скорости V . Это можно объяснить тем, что для обеспечения равной подачи на зуб $S_z = 0,12$ мм с увеличением V увеличивается и скорость подачи V_s (см. табл. 1). Следовательно, источники тепловыделения перемещаются относительно поверхности заго-

Таблица 4. Параметры процесса фрезерования при различных элементах режима и значениях площадки износа при обработке с применением УЗК

№ эксперимента по табл. 1	Максимальная глубина внедрения зуба в заготовку a_{max} , МКМ	Длина траектории контакта зуба фрезы с заготовкой l_k , мм	Максимальная длина контакта стружки с передней поверхностью зуба l , МКМ	Текущая глубина внедрения зуба в заготовку a_m , МКМ	Температура деформируемого слоя материала заготовки T_d , К	Предел текучести материала заготовки σ_{st} , МПа (при температуре T_d)
1	37,6	3,17	120,9	43,4/29	297,5/327,2	49,5/46,5
2	37,6	3,17	120,9	26,3/20,4	297,5/316	49,5/47,7
3	52,5	4,51	168,7	52,3/30,4	297/326	49,6/46,7
4	52,5	4,51	168,7	53,4/35,6	297/337	49,6/45,6
5	37,6	3,17	120,9	29,1/31,4	298,3/331	49,4/46,2
6	37,6	3,17	120,9	37,3/20,5	298/339	49,4/45,3
7	52,5	4,51	168,7	40,7/39,7	296,5/328	49,6/46,5
8	52,5	4,51	168,7	53,4/35,6	297/337,2	49,6/45,6

Таблица 5. Параметры процесса фрезерования при различных элементах режима и значениях площадки износа при обработке с применением УЗК

№ эксперимента	Сила трения стружки о переднюю поверхность зуба F_1 , Н	Сила трения зуба о заготовку F_2 , Н	Главная составляющая силы резания P_z , Н	Температура в зоне контакта стружки с зубом T_1 , К		Температура в зоне контакта зуба с заготовкой T_2 , К		Температура заготовки на расстоянии 25 мкм от обрабатываемой поверхности T_3 , К
				средняя	максимальная	средняя	максимальная	
1	4,28/2,68	0,34/0,32	5,33/3,44	424/418	515/505	432/427	464/456	301,8/300
2	2,6/1,94	1,03/0,99	4,03/3,23	435/427	536/527	423/418	471/464	298/297
3	5,16/2,82	0,34/0,32	6,37/3,61	454/443	571/557	462/452	501/488	308/306
4	5,3/3,23	1,03/0,95	7,2/4,7	552/504	775/702	546/503	664/622	304/303
5	2,87/2,9	0,34/0,32	3,67/3,67	514/485	686/645	544/521	610/583	296/294
6	3,67/1,85	1,03/0,94	5,3/3,01	519/483	701/645	508/473	619/585	299/294
7	4,02/3,67	0,34/0,32	5,03/4,6	555/512	675/715	583/528	662/629	306/304
8	5,3/3,22	1,03/0,95	7,2/4,7	553/504,4	775/702	545/503	664/622	305/303

Примечание: F_1, F_2, P_z – силы, приходящиеся на 1 мм высоты зуба фрезы

товки с большей скоростью, поэтому на расстоянии 25 мкм от обрабатываемой поверхности она нагревается в меньшей степени.

При обработке с применением УЗК сила трения F_2 увеличивается в среднем в 3 раза при увеличении $l_{\text{н}}$ с 20 до 60 мкм. Сила трения F_1 и составляющая силы резания P_z увеличиваются с увеличением износа, кроме эксперимента, проведенного на режиме $t = 0,5$ мм и $V = 6$ м/с (табл. 4, 5).

Среднее значение температуры T_1 увеличивается с увеличением износа незначительно, не более, чем на 10 %; при $t = 1$ мм и $V = 6$ м/с увеличивается на 15 %; при $t = 1$ мм и $V = 12$ м/с не изменяется при увеличении износа. Максимальное значение температуры T_1 с увеличением износа увеличивается значительно: при $t = 1$ мм и $V = 6$ м/с – на 36 %, при $t = 1$ мм и $V = 12$ м/с – на 15 %, т. е. влияние износа на максимальную температуру T_1 в большей степени проявляется при большем значении глубины резания. Среднее значение температуры T_2 увеличивается с увеличением износа при глубине резания $t = 1$ мм и $V = 6$ м/с и снижается в других экспериментах. Максимальные значения температуры T_2 увеличиваются с увеличением износа, причем в большей степени при $t = 1$ мм и $V = 6$ м/с – на 33 %.

Также, как при обработке без применения УЗК, температура в поверхностном слое заготовки на глубине 25 мкм незначительно снижается с увеличением износа, за исключением режима $t = 0,5$ мм и $V = 12$ м/с.

Таким образом, при обработке с применением УЗК влияние износа зубьев фрезы и элементов режима на параметры процесса незначительно отличается от соответствующего влияния при обработке без применения колебаний. Однако, при обработке с применением колебаний существенно ниже параметры, характеризующие теплосиловую напряженность процесса.

При обработке с УЗК сила трения F_1 снижается на 30 ... 60 %; сила трения F_2 меньше в среднем в 2 раза; сила P_z меньше на 20 ... 40 %. Средние температуры T_1 и T_2 при обработке с УЗК снижаются на 10 ... 30 %, причем в меньшей степени – при $t = 1$ мм и $V = 6$ м/с. Максимальная температура T_1 при обработке с УЗК снижается на 8 % при $t = 1$ мм и скорости $V = 6$ м/с; при остальных режимах – в большей степени, например при $V = 6$ м/с – на 27 ... 30 %, при $V = 12$ м/с – на 35 ... 45 %.

Максимальная температура T_2 при обработке с УЗК практически не изменяется при режиме $t = 1$ мм и $V = 6$ м/с; при остальных режимах снижается: при $V = 6$ м/с – на 14 ... 18 %, при $V = 12$ м/с – на 29 ... 31 %. Следовательно, при использовании колебаний в большей степени снижается максимальная температура T_1 .

Температура заготовки T_3 при фрезеровании с наложением колебаний ниже на несколько градусов.

План численного моделирования (см. табл. 1) включает все возможные комбинации исследуемых независимых параметров $l_{\text{н}}$, t и V , каждый из которых варьируется на двух уровнях. Следовательно, план позволяет реализовать полный факторный (трехфакторный) вычислительный эксперимент. Для нахождения уравнения регрессии, позволяющего рассчитать значения изучаемых параметров процесса (силы и температур) в зависимости от независимых параметров ($l_{\text{н}}$, t и V), выполнена математическая обработка в соответствии с рекомендациями [17, 18].

В качестве математической модели принята функция вида:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot l_{\text{н}} + b_2 \cdot t + b_3 \cdot V + b_4 \cdot l_{\text{н}} \cdot t + b_5 \cdot l_{\text{н}} \cdot V + b_6 \cdot t \cdot V + b_7 \cdot l_{\text{н}} \cdot t \cdot V,$$

где Y – изучаемый параметр; b_0, b_1, \dots, b_7 – коэффициенты уравнения регрессии.

В процессе обработки результатов численного эксперимента рассчитывали коэффициенты регрессии, для оценки значимости коэффициентов регрессии для каждого из них определяли критерий Стьюдента. Адекватность модели проверяли по результатам расчета критерия Фишера.

Обработка результатов численного моделирования позволила получить зависимости (1 – 10) для расчета параметров процесса в зависимости от величины площадки износа $l_{\text{н}}$, скорости и глубины фрезерования.

При обработке без применения УЗК:

$$P_z = 3,64 + 0,024 \cdot l_{\text{н}} + 3,67 \cdot t - 0,05 \cdot V + 0,014 \cdot l_{\text{н}} \cdot t + 0,0008 \cdot l_{\text{н}} \cdot V + 0,1 \cdot t \cdot V; \quad (1)$$

$$T_{1\text{cp}} = 270,5 + 1,28 \cdot l_{\text{н}} + 115 \cdot t + 29,1 \cdot V - 0,95 \cdot l_{\text{н}} \cdot t - 0,054 \cdot l_{\text{н}} \cdot V + 5,3 \cdot t \cdot V; \quad (2)$$

$$T_{2\text{cp}} = 153 + 2,8 \cdot l_{\text{н}} + 188 \cdot t + 45,8 \cdot V - 2,2 \cdot l_{\text{н}} \cdot t - 0,35 \cdot l_{\text{н}} \cdot V - 3,5 \cdot t \cdot V; \quad (3)$$

$$T_{2\text{max}} = -3,5 + 2,78 \cdot l_{\text{н}} + 515 \cdot t + 74,1 \cdot V - 5,4 \cdot l_{\text{н}} \cdot t - 0,34 \cdot l_{\text{н}} \cdot V - 48,7 \cdot t \cdot V; \quad (4)$$

$$T_3 = 338 - 0,82 \cdot l_{\text{н}} - 23,4 \cdot t - 5,62 \cdot V + 0,8 \cdot l_{\text{н}} \cdot t + 0,1 \cdot l_{\text{н}} \cdot V + 5,4 \cdot t \cdot V; \quad (5)$$

где $T_{1\text{cp}}$ – среднее значение температуры T_1 ; $T_{2\text{cp}}$ – среднее значение температуры T_2 ; $T_{2\text{max}}$ – максимальное значение температуры T_2 , К.

При обработке с применением УЗК:

$$P_z = 10,25 - 0,2 \cdot l_{\text{н}} - 2,3 \cdot t - 0,71 \cdot V + 0,19 \cdot l_{\text{н}} \cdot t + 0,02 \cdot l_{\text{н}} \cdot V + 0,37 \cdot t \cdot V; \quad (6)$$

$$T_{1\text{cp}} = 397 - 4,1 \cdot l_{\text{н}} - 143 \cdot t + 5,8 \cdot V + 9,1 \cdot l_{\text{н}} \cdot t + 0,37 \cdot l_{\text{н}} \cdot V + 19,3 \cdot t \cdot V; \quad (7)$$

$$T_{2_{\text{cp}}} = 384 - 4,25 \cdot l_{\text{н}} - 146 \cdot t + 11,5 \cdot V + 9,4 \cdot l_{\text{н}} \cdot t + 0,28 \cdot l_{\text{н}} \cdot V + 18,8 \cdot t \cdot V; \quad (8)$$

$$T_{2_{\text{max}}} = 453 - 7,85 \cdot l_{\text{н}} - 275 \cdot t - 8,1 \cdot V + 16 \cdot l_{\text{н}} \cdot t + 0,7 \cdot l_{\text{н}} \cdot V + 32,2 \cdot t \cdot V; \quad (9)$$

$$T_3 = 298,5 - 0,125 \cdot l_{\text{н}} + 30 \cdot t - 0,08 \cdot V - 0,3 \cdot l_{\text{н}} \cdot t + 0,004 \cdot l_{\text{н}} \cdot V - 3 \cdot t \cdot V. \quad (10)$$

По этим зависимостям можно рассчитать условия и режим обработки, при котором технологические параметры не превысят допустимых значений.

При увеличении износа большинство параметров, характеризующих теплосиловую напряженность процесса, увеличиваются, что может негативно отразиться на работоспособности инструмента и качестве деталей. Уменьшить значения сил и температур можно, изменяя значения элементов режима. Например, если при обработке без применения УЗК необходимо уменьшить значение максимальной температуры T_2 на величину $\Delta T_{2_{\text{max}}}$, а в качестве регулирующего воздействия использовать скорость резания, то интервал ее изменения можно получить путем преобразования вышеприведенной зависимости (4):

$$\Delta V(T_{2_{\text{max}}}) = \frac{\Delta T_{2_{\text{max}}} + 3,5 - 2,78 \cdot l_{\text{н}} - 515 \cdot t + 5,4 \cdot l_{\text{н}} \cdot t}{74,1 - 0,34 \cdot l_{\text{н}} \cdot V - 48,7 \cdot t}. \quad (11)$$

где $\Delta V(T_{2_{\text{max}}})$ – интервал варьирования скоростью, позволяющий снизить значение максимальной температуры $T_{2_{\text{max}}}$ на необходимую величину.

Силы и температуры могут быть снижены также за счет применения УЗК (см. табл. 5).

ВЫВОДЫ

1. Установлены закономерности изменения параметров процесса фрезерования, в том числе сил и температур в зонах контакта стружки с зубом фрезы и зуба с заготовкой, в зависимости от износа зубьев и элементов режима фрезерования.

2. Увеличение износа зубьев приводит к увеличению на 13 ... 19 % главной составляющей силы резания и максимальных значений контактных температур, которые увеличиваются в большей степени при меньших значениях глубины и скорости резания.

3. При увеличении глубины резания увеличиваются: на 36 ... 39 % главная составляющая сила резания; на 10 ... 14 % средние значения контактных температур; температура поверхностного слоя заготовки.

4. Изменение скорости резания с 6 до 12 м/с приводит к уменьшению главной составляющей

силы резания на 17 ... 18 %, увеличению средних контактных температур на 33 ... 45 % и уменьшению температуры в поверхностном слое заготовки.

5. При обработке с применением УЗК влияние износа зубьев фрезы и элементов режима на параметры процесса незначительно отличается от соответствующего влияния при обработке без применения колебаний: максимальные значения контактных температур увеличиваются с повышением износа в большей степени при больших значениях глубины резания.

6. Установлено, что использование УЗК позволяет снизить: главную составляющую силы резания на 20 ... 40 %; средние значения контактных температур на 20 ... 30 %; максимальное значения температуры в зоне контакта стружки с зубом на 27 ... 45 %, в зоне контакта зуба с заготовкой – на 14 ... 31 %, причем максимальные температуры снижаются в большей степени при большем значении скорости резания.

7. Получены математические зависимости, описывающие взаимосвязь главной составляющей силы резания и температур с износом зубьев фрезы и элементами режима фрезерования; зависимости позволяют рассчитать интервал изменения элементов режима, обеспечивающий заданные параметры процесса при увеличении износа зуба.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jahan, M.P., Ma, J., Hanson, C., Arbuckle, G.K. Tool wear and resulting surface finish during micro slot milling of polycarbonates using uncoated and coated carbide tools // Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture. – 2020. – Vol. 234 (1-2). P. 52–65.
2. Adeniji, D., Schoop, J., Gunawardan, S., Hanson, C., Jahan, M. Characterization and Modeling of Surface Roughness and Burr Formation in Slot Milling of Polycarbonate // J. Manuf. Mater. Process. – 2020. – 4(2) P. 59;
3. Hanson, C., Hiwase, P., Chen, X., Jahan, M.P., Ma, J., Arbuckle, G.K. Experimental investigation and numerical simulation of burr formation in micro-milling of polycarbonates // Procedia Manufacturing. – Volume 34, 2019 – Pages 293-304.
4. Унянин, А.Н. Аналитическое исследование температурного поля при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний / А.Н. Унянин // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 220 – 235.
5. Резников, А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
6. Воронцов, А.Л. Разработка новой теории резания. Математическое описание образования стружки разных видов, пульсации сил резания и параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью резца / А. Л. Воронцов, Н. М. Султан-Заде, А. Ю. Албагачиев // Вестник машиностроения. – 2008. – № 7. – С. 56 – 61.

7. *Воронцов, А. Л.* Разработка новой теории резания. Практические расчеты параметров резания при точении / А. Л. Воронцов, Н. М. Султан-Заде, А. Ю. Албагачиев // Вестник машиностроения. – 2008. – № 9. – С. 67 – 70.
8. *Ординарцев, И.А.* 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.
9. *Смирнова, О.В.* Поликарбонаты / О. В. Смирнова, С. Б. Ерофеева. – Москва: Химия, 1975. – 288 с.
10. *Крыжановский, В.К.* Технические свойства полимерных материалов / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов. С-Пб: Профессия, 2005. – 235 с.
11. *Подураев, В.Н.* Обработка резанием с вибрациями / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1970. – 350 с.
12. *Суслов, А.Г.* Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов и др. [под ред. А.Г. Суслова]. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
13. *Сундуков, С.К.* Применение ультразвуковых технологий при получении прессовых соединений / С. К. Сундуков // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2023. – № 5 (143). – С. 40 – 48.
14. *Кириш, И.А.* Исследование влияния ультразвука на реологические свойства полимеров различной химической природы для создания нового способа переработки полимерных композиций / И. А. Кириш, Т. И. Чалых, В. В. Ананьев, Г. Е. Заиков // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 4. – С. 182 – 185.
15. *Волков, С.С.* Исследование термомодеформационных циклов в процессе ультразвуковой резки полимерных материалов / С.С. Волков, А.Л. Ремизов, Л.А. Шестель // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 11 (652). – С. 60 – 67.
16. *Унянин, А.Н.* Исследование параметров процесса при обработке фрезами с различным шагом между зубьями / А.Н. Унянин, А.В. Чуднов // Научно-технические технологии в машиностроении. – № 12 (38). – 2022. – С. 21 – 26.
17. *Дрейпер, Н.* Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Вильямс, Диалектика, 2007. – 912 с.
18. РДМУ 109 – 77. Методические указания. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 64 с.

STUDY OF THE INFLUENCE OF CUTTER WEAR AND MODE ON THE PARAMETERS OF THE PROCESS OF MILLING BLANKS OF POLYCARBONATE PARTS USING ULTRASONIC VIBRATIONS

© 2024 A.N. Unyanin, I.Z. Dimukhametov

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

The research was carried out in order to establish the effect of wear of the milling cutter teeth and the elements of the milling mode of polycarbonate workpieces on the technological parameters of the process, including thermal power, and to determine the elements of the mode that provide the specified parameters. The results of numerical modeling of technological parameters for various combinations of milling cutter wear, depth and cutting speed without and with the using of ultrasonic vibrations (USV) are presented. The patterns of changes of parameters of the milling process of workpieces depending on the wear of the milling cutter, depth and cutting speed, including with the using of USV. The using of USV allows to reduce the main component of the cutting force, the average and maximum temperatures in the chip-tooth contact zone and in the tooth-workpiece contact zone. Using the obtained equations, which establish the effect of wear and mode elements on the parameters of the processing process without and with the use of USV, it is possible to calculate the mode elements that provide the specified parameters of the milling process with an increase in tooth wear.

Keywords: milling, modelling, polycarbonate, forces, temperature, ultrasonic vibrations, wear, milling mode.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-3-54-62

EDN: CRNSBF

REFERENCES

1. *Jahan, M.P., Ma, J., Hanson, C., Arbuckle, G.K.* Tool wear and resulting surface finish during micro slot milling of polycarbonates using uncoated and coated carbide tools // Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture. – 2020. – Vol. 234 (1-2). P. 52–65.
2. *Adeniji, D., Schoop, J., Gunawardan, S., Hanson, C., Jahan, M.* Characterization and Modeling of Surface Roughness and Burr Formation in Slot Milling of Polycarbonate // J. Manuf. Mater. Process. – 2020. – 4(2) P. 59;
3. *Hanson, C., Hiwase, P., Chen, X., Jahan, M.P., Ma, J., Arbuckle, G.K.* Experimental investigation and numerical simulation of burr formation in micro-milling of polycarbonates // Procedia Manufacturing. – Volume 34, 2019 – Pages 293-304.
4. *Unyanin, A.N.* Аналитическое исследование температурного поля при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний / А.Н. Унянин // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 220 – 235.
5. *Reznikov, A.N.* Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Реznиков, Л.А. Реznиков. – М.:

- Mashinostroenie, 1990. – 288 s.
6. *Voroncov, A.L.* Razrabotka novej teorii rezaniya. Matematicheskoe opisaniye obrazovaniya struzhki raznyh vidov, pul'sacii sil rezaniya i parametrov kontakta obrabotannoy poverhnosti zagotovki s zadney poverhnost'yu rezca / A. L. Voroncov, N. M. Sultan-Zade, A. YU. Albagachiev // Vestnik mashinostroeniya. – 2008. – № 7. – S. 56 – 61.
 7. *Voroncov, A.L.* Razrabotka novej teorii rezaniya. Prakticheskie raschety parametrov rezaniya pri tochenii / A. L. Voroncov, N. M. Sultan-Zade, A. Yu. Albagachiev // Vestnik mashinostroeniya. – 2008. – № 9. – S. 67 – 70.
 8. *Ordinarcev, I.A.* Spravochnik instrumental'shchika / I.A. Ordinarcev, G.V. Filippov, A. N. Shevchenko i dr. [pod obshch. red. I.A. Ordinarceva]. – L.: Mashinostroenie, Leningradskoe otdeleniye, 1987. – 846 s.
 9. *Smirnova, O. V.* Polikarbonaty / O. V. Smirnova, S. B. Erofeeva. – Moskva: Himiya, 1975. – 288 s.
 10. *Kryzhanovskij, V.K.* Tekhnicheskie svoystva polimernyh materialov / V.K. Kryzhanovskij, V.V. Burlov. S-Pb: Professiya, 2005. – 235 s.
 11. *Poduraev, V.N.* Obrabotka rezaniem s vibraciyami / V.N. Poduraev. – M.: Mashinostroenie, 1970. – 350 s.
 12. *Suslov, A.G.* Inzheneriya poverhnosti detalej / A.G. Suslov, V.F. Bez"yazychnyj, YU.V. Panfilov i dr. [pod red. A.G. Suslova]. – M.: Mashinostroenie, 2008. – 320 s.
 13. *Sundukov, S.K.* Primeneniye ul'trazvukovyh tekhnologij pri poluchenii pressovyh soedinenij / S. K. Sundukov // Naukoymkie tekhnologii v mashinostroenii. – 2023. – № 5 (143). – S. 40 – 48.
 14. *Kirsh, I.A.* Issledovaniye vliyaniya ul'trazvuka na reologicheskie svoystva polimerov razlichnoj himicheskoy prirody dlya sozdaniya novogo sposoba pererabotki polimernyh kompozicij / I. A. Kirsh, T. I. Chalyh, V. V. Anan'ev, G. E. Zaikov // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. – 2015. – T. 18. – № 4. – S. 182 – 185.
 15. *Volkov, S.S.* Issledovaniye termodeformacionnyh ciklov v processe ul'trazvukovoy rezki polimernyh materialov / S.S. Volkov, A.L. Remizov, L.A. SHestel' // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie. – 2017. – № 11 (652). – S. 60 – 67.
 16. *Unyanin, A.N.* Issledovaniye parametrov processa pri obrabotke frezami s razlichnym shagom mezhdub'nyami / A.N. Unyanin, A.V. CHudnov // Naukoymkie tekhnologii v mashinostroenii. – № 12 (38). – 2022. – S. 21 – 26.
 17. *Drejper, N.* Prikladnoj regressionnyj analiz / N. Drejper, G. Smit. – M.: Vil'yams, Dialektika, 2007. – 912 s.
 18. RDMU 109 – 77. Metodicheskie ukazaniya. Metodika vybora i optimizacii kontroliruemyh parametrov tekhnologicheskikh processov. – M.: Izd-vo standartov, 1978. – 64 s.