

Научная статья
УДК 621.91
doi:10.30987/2223-4608-2023-2-26-31

Моделирование технологических параметров процесса фрезерования заготовок деталей из поликарбоната при различных режимах обработки

Александр Николаевич Унянин¹, д. т. н.,
Илназ Зеферович Димухаметов², аспирант
^{1, 2} ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» г. Ульяновск, Россия
¹ a_un@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5557-4197>
² iln-d@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Выполнено численное моделирование технологических параметров процесса фрезерования заготовок деталей из поликарбоната при различных режимах обработки. Параметры фиксировали в различные моменты времени контакта зуба фрезы с заготовкой. 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 элементов режима фрезерования. Установлено, что температуры в зоне контакта зуба с заготовкой выше, чем в зоне контакта зуба со стружкой. Выявлена закономерность распределения температур в поверхностном слое заготовки. Получены математические зависимости, описывающие взаимосвязь температур с элементами режима фрезерования.

Ключевые слова: режим обработки, моделирование, фрезерование, поликарбонат, температурное поле, температура, сила

Для цитирования: Унянин А.Н., Димухаметов И.З. Моделирование технологических параметров процесса фрезерования заготовок деталей из поликарбоната при различных режимах обработки // Научно-технологические технологии в машиностроении. – 2023. – № 2 (140). – С. 26-31. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-26-31.

Original article

Modeling of technological parameters in the milling process of polycarbonate workpieces under various processing modes

Alexander N. Unyanin¹, Dr.Sc.Tech.,
Ilnaz Z. Dimukhametov², postgraduate student
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia
¹ a_un@mail.ru, ² iln-d@yandex.ru

Abstract. Based on the conducted experimental studies regarding the comparative quality analysis for treated surfaces in abrupt and traditional grinding of polymer composite materials, the abrupt grinding performance criteria were determined and an advice list for abrasive processing of PCM was also made.

Keywords: abrupt grinding, abrasive processing of PCM, grinding, grinding temperature, surface roughness, delamination, blunting, cutting modes

For citation: Unyanin A.N., Dimukhametov I.Z. Modeling of technological parameters in the milling process of polycarbonate workpieces under various processing modes. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, no. 2 (140), pp. 26-31. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-26-31.

Поликарбонат является перспективным материалом, который, благодаря своим свойствам (самый прочный среди прозрачных пластиков, имеет высокую степень прозрачности и пожаробезопасный), все более широко используется для изготовления деталей машин и приборов, в частности, панелей приборов летательных аппаратов, судов и др. Однако низкая теплопроводность поликарбоната является причиной

малой интенсивности отвода теплоты из зоны механической обработки, а низкие температуры его разложения и плавления являются причиной появления тепловых дефектов обработанной поверхности. Поэтому после механической обработки заготовок из поликарбоната изменяются его оптические свойства, в том числе степень прозрачности.

Поликарбонат используется для изготовле-

ния деталей машин и приборов недавно, поэтому рекомендации, касающиеся его механической обработки, носят ориентировочный характер. Широко распространенным методом обработки заготовок деталей из поликарбоната является фрезерование цилиндрическими и концевыми фрезами. Влияние режима обработки на технологические параметры процесса фрезерования заготовок деталей из поликарбоната, в том числе теплосиловую напряженность процесса, не установлено. Это затрудняет разработку рекомендаций по выбору условий и режима фрезерования.

Для расчета технологических параметров процесса фрезерования, в том числе сил резания и трения и температур при обработке заготовок деталей из поликарбоната использованы физические и математические модели, методики и программное обеспечение [1 – 4].

Модели позволяют в комплексе учесть расположение и взаимное перемещение отдельных источников тепловыделения (в зоне деформирования и в зонах контакта зуба фрезы со стружкой и заготовкой), наложение тепловых импульсов от отдельных зубьев, зависимость теплофизических свойств контактирующих объектов и механических свойств заготовки из поликарбоната от температуры, а также изменение глубины внедрения зуба в заготовку на траектории их контакта. Теплообмен является нестационарным, поскольку зубья вступают в контакт с заготовкой периодически. Все источники тепловыделения считаются двумерными, что не вносит существенных погрешностей в результаты расчета [2]. Процессы теплообразования рассматривали в сечении фрезы, перпендикулярном ее оси. Уравнения теплопроводности решали, используя численный метод конечных элементов.

Численное моделирование температурного поля выполнили для случая встречного фрезерования заготовки фрезой, изготовленной из твердого сплава Т5К10 диаметром 20 мм и имеющей пять зубьев, высоту профиля зуба, равную 4 мм, и передний угол $\gamma = 10^\circ$ [5].

При выборе для моделирования механических и теплофизических характеристик обрабатываемого материала ориентировались на характеристики поликарбоната: 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 °С).

Напряжение текучести обрабатываемого

материала в области деформирования, определяющее силы резания и трения, определяли как [6]

$$\sigma_{st} = \sigma_s \left(1 - \frac{T_g}{T_p}\right), \quad (1)$$

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. При выборе для численного моделирования параметра T_p ориентировались на температуру размягчения поликарбоната. Используемое программное обеспечение позволяет определить температуру в любой точке заготовки, в том числе и в области деформирования T_g . Температура T_g , рассчитанная в какой-либо момент времени, используется для расчета параметра σ_{st} в последующий момент.

Предел прочности поликарбоната примерно в десять раз ниже предела прочности большинства металлов, что позволяет прогнозировать меньшие силы резания и трения, мощности и плотности источников тепловыделения. Можно предположить, что низкие значения плотности и коэффициента теплопроводности (коэффициент теплопроводности поликарбоната в десятки раз ниже, чем у металлов) не позволят прогреться заготовке на значительную глубину. Плотности, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости материалов заготовки и фрезы в зависимости от температуры определяли, ориентируясь на справочные данные.

Варьировали элементами режима фрезерования: скорость резания $v = 8...15$ м/с; подача на зуб фрезы $s_z = 0,12...0,21$ мм; глубина резания $t = 0,5...1,0$ мм. План численного моделирования составлен по принципу многофакторного планирования экспериментов и включает в себя различные комбинации элементов режима (табл. 1).

Установлены закономерности изменения технологических параметров процесса фрезерования, в том числе сил и температур, в зависимости от продолжительности контакта зуба фрезы с заготовкой. Выявлено, что температуры достигают значительных величин в первые моменты времени контакта зуба фрезы с заготовкой и увеличиваются в последующие моменты времени. Максимальные температуры возникают в заключительный период времени контакта зуба с заготовкой. Поэтому в процессе численного моделирования технологические параметры фиксировали в последний момент времени контакта зуба с заготовкой и в предыдущий момент.

1. План численного моделирования

| Номер эксперимента | Варьируемые параметры | | |
|--------------------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| | Подача на зуб фрезы s_z , мм/зуб | Скорость резания v , м/с | Глубина фрезерования t , мм |
| 1 | 0,12 | 8 | 0,5 |
| 2 | 0,21 | 8 | 0,5 |
| 3 | 0,12 | 15 | 0,5 |
| 4 | 0,21 | 15 | 0,5 |
| 5 | 0,12 | 8 | 1 |
| 6 | 0,21 | 8 | 1 |
| 7 | 0,12 | 15 | 1 |
| 8 | 0,21 | 15 | 1 |

Длина траектории контакта l_K зуба фрезы с заготовкой зависит лишь от глубины фрезерования t и с ее увеличением в два раза увеличивается на 42 % (табл. 2). Максимальная глубина

внедрения зуба в заготовку a_{max} зависит от параметров s_z и t и увеличивается с увеличением этих параметров. Скорость резания v на параметр a_{max} влияния не оказывает.

2. Технологические параметры процесса фрезерования

| Номер эксперимента по табл. 1 | Длина траектории контакта зуба с заготовкой l_K , мм | Максимальная глубина внедрения зуба в заготовку a_{max} , мкм | Максимальная длина контакта стружки с передней поверхностью зуба l , мкм | Время контакта зуба с заготовкой τ_K , с |
|-------------------------------|--|---|--|---|
| 1 | 3,18 | 37,6 | 121 | $37,4 \cdot 10^{-5}$ |
| 2 | 3,18 | 65,6 | 211 | $37,4 \cdot 10^{-5}$ |
| 3 | 3,18 | 37,6 | 121 | $20,7 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | 3,18 | 65,6 | 211 | $20,7 \cdot 10^{-5}$ |
| 5 | 4,5 | 52,5 | 169 | $52,7 \cdot 10^{-5}$ |
| 6 | 4,5 | 91,5 | 294 | $52,7 \cdot 10^{-5}$ |
| 7 | 4,5 | 52,5 | 169 | $30,5 \cdot 10^{-5}$ |
| 8 | 4,5 | 91,5 | 294 | $30,5 \cdot 10^{-5}$ |

Длина контакта стружки с передней поверхностью зуба l увеличивается с увеличением s_z с 0,12 до 0,21 мм на 74 %; при повышении глубины резания t в два раза параметр l возрастает на 40 %; скорость резания v на этот параметр влияния не оказывает.

При увеличении скорости резания v с 8 до 15 м/с время контакта зуба с заготовкой τ_K уменьшается на 38 % при $t = 0,5$ мм и на 42...47 % при $t = 1$ мм. Варьирование параметром t в пределах 0,5...1 мм приводит к росту τ_K на 41...47 %.

Результаты расчета технологических параметров процесса фрезерования при различных режимах обработки и в различные моменты времени контакта зуба фрезы с заготовкой представлены в табл. 3 – 5. В процессе численного моделирования число фиксированных моментов времени контакта округляется до целого числа, поэтому между последним моментом времени контакта зуба с заготовкой τ по табл. 3 – 5 и параметром τ_K по табл. 2 имеются незначительные расхождения вследствие этого округления.

3. Параметры процесса фрезерования при различных элементах режима

| Номер эксперимента | Время контакта зуба с заготовкой τ , с | Глубина внедрения зуба в заготовку a_m , мкм | Длина контакта стружки с передней поверхностью зуба l_1 , мкм | 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 |
|--------------------|---|--|---|---|--|---|
| 1 | $30,3 \cdot 10^{-5}$ | 28,8 | 82,2 | 3,69 | 0,45 | 4,73 |
| | $37,4 \cdot 10^{-5}$ | 35,6 | 101,5 | 4,89 | 0,48 | 6,17 |
| 2 | $23,7 \cdot 10^{-5}$ | 32,1 | 91,6 | 4,06 | 0,44 | 5,16 |
| | $36,3 \cdot 10^{-5}$ | 49,2 | 140,0 | 6,80 | 0,48 | 8,39 |
| 3 | $12,4 \cdot 10^{-5}$ | 22,1 | 63,2 | 2,79 | 0,44 | 3,67 |
| | $20,1 \cdot 10^{-5}$ | 35,7 | 102,0 | 4,92 | 0,48 | 6,21 |
| 4 | $9,2 \cdot 10^{-5}$ | 28,5 | 81,3 | 3,65 | 0,45 | 4,69 |
| | $20,7 \cdot 10^{-5}$ | 64,1 | 182,9 | 8,87 | 0,48 | 10,87 |
| 5 | $40,3 \cdot 10^{-5}$ | 37,7 | 107,7 | 4,76 | 0,44 | 5,97 |
| | $52,7 \cdot 10^{-5}$ | 49,4 | 140,9 | 6,81 | 0,48 | 8,42 |
| 6 | $31,6 \cdot 10^{-5}$ | 42,1 | 120,0 | 5,37 | 0,44 | 6,70 |
| | $52,6 \cdot 10^{-5}$ | 70,1 | 200,1 | 9,70 | 0,48 | 11,86 |
| 7 | $14,9 \cdot 10^{-5}$ | 26,1 | 74,6 | 3,30 | 0,44 | 4,26 |
| | $28,2 \cdot 10^{-5}$ | 49,4 | 140,9 | 6,82 | 0,48 | 8,44 |
| 8 | $13 \cdot 10^{-5}$ | 39,6 | 113,2 | 5,16 | 0,45 | 6,46 |
| | $30,5 \cdot 10^{-5}$ | 92,5 | 264,1 | 12,85 | 0,48 | 15,64 |

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

4. Параметры процесса фрезерования при различных элементах режима

| Номер эксперимента | Время контакта зуба с заготовкой τ , с | Температура деформируемого слоя материала заготовки T_g , К | Предел прочности материала заготовки σ_{s_b} , МПа | Плотность источника тепловыделения, Вт/м ² | | |
|--------------------|---|---|---|---|---------------------------------------|---|
| | | | | в зоне деформирования g_g | в зоне контакта стружки с зубом g_1 | в зоне контакта зуба с заготовкой g_2 |
| 1 | $30,3 \cdot 10^{-5}$ | 340 | 54,4 | $3,21 \cdot 10^8$ | $4,37 \cdot 10^8$ | $8,64 \cdot 10^8$ |
| | $37,4 \cdot 10^{-5}$ | 300 | 59,1 | $3,46 \cdot 10^8$ | $4,69 \cdot 10^8$ | $9,28 \cdot 10^8$ |
| 2 | $23,7 \cdot 10^{-5}$ | 347 | 53,6 | $3,18 \cdot 10^8$ | $4,31 \cdot 10^8$ | $8,54 \cdot 10^8$ |
| | $36,3 \cdot 10^{-5}$ | 299 | 59,2 | $3,49 \cdot 10^8$ | $4,07 \cdot 10^8$ | $9,30 \cdot 10^8$ |
| 3 | $12,4 \cdot 10^{-5}$ | 349 | 53,3 | $5,90 \cdot 10^8$ | $8,06 \cdot 10^8$ | $15,94 \cdot 10^8$ |
| | $20,1 \cdot 10^{-5}$ | 300 | 59,1 | $6,05 \cdot 10^8$ | $8,80 \cdot 10^8$ | $17,40 \cdot 10^8$ |
| 4 | $9,2 \cdot 10^{-5}$ | 339 | 54,5 | $6,03 \cdot 10^8$ | $8,20 \cdot 10^8$ | $16,20 \cdot 10^8$ |
| | $20,7 \cdot 10^{-5}$ | 297 | 59,5 | $6,60 \cdot 10^8$ | $8,85 \cdot 10^8$ | $17,05 \cdot 10^8$ |
| 5 | $40,3 \cdot 10^{-5}$ | 349 | 53,3 | $3,17 \cdot 10^8$ | $4,30 \cdot 10^8$ | $8,50 \cdot 10^8$ |
| | $52,7 \cdot 10^{-5}$ | 299 | 59,3 | $3,50 \cdot 10^8$ | $4,70 \cdot 10^8$ | $9,30 \cdot 10^8$ |
| 6 | $31,6 \cdot 10^{-5}$ | 342 | 54,0 | $3,20 \cdot 10^8$ | $4,35 \cdot 10^8$ | $8,60 \cdot 10^8$ |
| | $52,6 \cdot 10^{-5}$ | 297 | 59,0 | $3,53 \cdot 10^8$ | $4,07 \cdot 10^8$ | $9,30 \cdot 10^8$ |
| 7 | $14,9 \cdot 10^{-5}$ | 348 | 53,4 | $5,90 \cdot 10^8$ | $8,07 \cdot 10^8$ | $15,60 \cdot 10^8$ |
| | $28,2 \cdot 10^{-5}$ | 297 | 59,5 | $6,60 \cdot 10^8$ | $8,84 \cdot 10^8$ | $17,50 \cdot 10^8$ |
| 8 | $13,0 \cdot 10^{-5}$ | 332 | 55,4 | $6,14 \cdot 10^8$ | $8,32 \cdot 10^8$ | $16,50 \cdot 10^8$ |
| | $30,5 \cdot 10^{-5}$ | 295 | 59,8 | $6,71 \cdot 10^8$ | $8,88 \cdot 10^8$ | $17,57 \cdot 10^8$ |

5. Температуры при различных элементах режима

| Номер эксперимента | Время контакта зуба с заготовкой τ , с | Средняя температура в зоне контакта зуба с заготовкой T_2 , К | Средняя температура в зоне контакта стружки с зубом T_1 , К | Температура на вершине зуба фрезы T_E , К | Температура заготовки T_3 , К на расстоянии от обрабатываемой поверхности, мкм | |
|--------------------|---|---|---|---|--|-------|
| | | | | | 25 | 50 |
| 1 | $30,3 \cdot 10^{-5}$ | 514 | 503 | 563 | 300,0 | 293,8 |
| | $37,4 \cdot 10^{-5}$ | 529 | 519 | 586 | 303,5 | 293,9 |
| 2 | $23,7 \cdot 10^{-5}$ | 535 | 505 | 602 | 293,9 | 293,4 |
| | $36,3 \cdot 10^{-5}$ | 566 | 544 | 638 | 295,8 | 293,5 |
| 3 | $12,4 \cdot 10^{-5}$ | 655 | 591 | 758 | 294,5 | 293,3 |
| | $20,1 \cdot 10^{-5}$ | 702 | 652 | 814 | 302,0 | 293,4 |
| 4 | $9,2 \cdot 10^{-5}$ | 699 | 598 | 905 | 296,0 | 293,6 |
| | $20,7 \cdot 10^{-5}$ | 824 | 713 | 1021 | 298,0 | 293,1 |
| 5 | $40,3 \cdot 10^{-5}$ | 554 | 541 | 614 | 296,1 | 293,3 |
| | $52,7 \cdot 10^{-5}$ | 576 | 567 | 644 | 299,0 | 293,4 |
| 6 | $31,6 \cdot 10^{-5}$ | 595 | 532 | 653 | 294,1 | 293,1 |
| | $52,6 \cdot 10^{-5}$ | 602 | 581 | 690 | 295,0 | 293,2 |
| 7 | $14,9 \cdot 10^{-5}$ | 737 | 639 | 885 | 293,1 | 293,1 |
| | $28,2 \cdot 10^{-5}$ | 814 | 736 | 969 | 297,7 | 293,1 |
| 8 | $13,0 \cdot 10^{-5}$ | 913 | 679 | 1163 | 293,1 | 293,0 |
| | $30,5 \cdot 10^{-5}$ | 1057 | 825 | 1287 | 294,0 | 293,0 |

Рассчитывали силы трения и силу резания, приходящиеся на 1 мм высоты зуба фрезы. Сила трения стружки о переднюю поверхность зуба фрезы F_1 увеличивается с увеличением S_z на 39...80 % при $t = 0,5$ мм и на 42...88 % при $t = 1$ мм, т.е. при большем значении глубины t параметр F_1 изменяется в большей степени. Параметр s_z не оказывает влияния на силу трения зуба о заготовку F_2 .

Главная составляющая силы резания P_z увеличивается с ростом s_z на 36...75 % при $t = 0,5$ мм и на 41...85 % при $t = 1$ мм, т.е. так же, как и сила трения F_1 , изменяется в большей степени при большей глубине фрезерования. При увеличении скорости резания v сила трения F_1 увеличивается в последний и снижается

в предпоследний момент времени контакта зуба с заготовкой.

Сила резания P_z при увеличении скорости резания v также, как и сила трения F_1 снижается в предпоследний момент времени контакта зуба с заготовкой и увеличивается в последний момент, причем в большей степени – при подаче $s_z = 0,21$ мм/зуб.

Увеличение глубины фрезерования t приводит к увеличению сил F_1 и P_z . Все вышеперечисленные параметры (a_{max} , l_1 , F_1 , F_2 и P_z) увеличиваются с увеличением времени τ контакта зуба с заготовкой.

Повышение значения подачи на зуб фрезы s_z приводит к незначительному уменьшению значения температуры деформируемого слоя

материала заготовки T_g , что можно объяснить тем, что при увеличении скорости перемещения теплового источника теплота не успевает распространиться вглубь заготовки из поликарбоната, имеющего низкий коэффициент теплопроводности. При увеличении скорости резания v температура деформируемого слоя также незначительно снижается. Температура T_g несколько снижается и при увеличении глубины резания, что объясняется тем, что материал заготовки на большей глубине нагревается незначительно вследствие малого значения коэффициента теплопроводности поликарбоната.

Значение предела текучести материала заготовки σ_{St} изменяется противоположно изменению температуры T_g . При варьировании режимом этот параметр изменяется незначительно, поэтому на силы трения и силу резания его изменение существенного влияния не оказывает, что следует из табл. 4.

Температура T_g в последний момент работы зуба непосредственно перед выходом его из зоны контакта с заготовкой значительно ниже, чем в предшествующий момент времени. Причиной этого является то, что перед выходом зуба из зоны контакта он деформирует материал заготовки, прогретый в результате работы предшествующих зубьев в меньшей степени. Интервал изменения температуры T_g в предпоследний момент времени работы зуба шире, чем в последний момент, поэтому при изменении элементов режима σ_{St} в большей степени изменяется в этот момент времени.

Плотности всех источников тепловыделения незначительно увеличиваются с ростом подачи и глубины резания. Выше было отмечено, что силы F_1 и P_z существенно увеличиваются с увеличением этих параметров. Однако при увеличении параметров s_z и t увеличиваются и площади зоны деформирования и зоны контакта стружки с передней поверхностью зуба. Поскольку плотности тепловыделений обратно пропорциональны площадям, то изменение параметров s_z и t влияет на изменения плотностей

тепловыделения незначительно.

Скорость резания v оказывает существенное влияние на плотности всех источников тепловыделения. В частности, при увеличении v параметр q_g увеличивается на 88...89 %, т.е. примерно пропорционально степени увеличения v . Средние температуры в зоне контакта стружки с передней поверхностью зуба T_1 , зуба с заготовкой T_2 и температура на вершине зуба фрезы T_E увеличиваются с ростом всех трех варьируемых элементов режима – v , s_z и t . Температура в зоне контакта зуба с заготовкой T_2 на 2...8 % выше, чем температура в зоне контакта зуба со стружкой T_1 . Значительные температуры (1021...1287 К) возникают на вершине зуба при $v = 15$ м/с и $s_z = 0,21$ мм. Эти температуры близки к температуре теплостойкости твердого сплава Т5К10.

Силы трения и резания и мощности источников тепловыделения при обработке заготовок из поликарбоната на порядок ниже, чем при фрезеровании заготовок из металлов [1, 2, 7], что объясняется более низким пределом прочности этого материала и низкой температурой размягчения.

Вследствие низкого коэффициента теплопроводности поликарбоната, как и следовало ожидать, материал заготовки прогревается на незначительную глубину. Максимальная температура заготовки на глубине 25 мкм имеет место при режиме, соответствующем эксперименту №1 по табл. 1 в заключительный момент времени контакта зуба с заготовкой $\tau = 37,4 \cdot 10^{-5}$ с и составляет 303,5 К (30,5 °С). В табл. 6 представлены результаты расчета температур заготовки на глубине 15 мкм при этом режиме в различные моменты времени контакта зуба с заготовкой. В заключительный момент времени контакта ($\tau = 37,4 \cdot 10^{-5}$ с) температура составляет 314,7 К (41,7 °С), что значительно ниже температуры размягчения поликарбоната. Следовательно, вследствие низкой теплопроводности поликарбоната тепловой поток не проникает в глубинные слои заготовки.

6. Температура заготовки на расстоянии 15 мкм от обрабатываемой поверхности

| Время контакта зуба с заготовкой τ , с | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| $0,89 \cdot 10^{-5}$ | $4,45 \cdot 10^{-5}$ | $8,90 \cdot 10^{-5}$ | $18,69 \cdot 10^{-5}$ | $30,3 \cdot 10^{-5}$ | $37,4 \cdot 10^{-5}$ |
| 298,7 | 298,8 | 299,0 | 299,5 | 312,5 | 314,7 |

Ниже представлены зависимости, позволяющие рассчитать температуры в заключи-

тельный момент времени контакта зуба с заготовкой:

$$T_1 = 299,1 + 639,68 \cdot s_z + 18,571 \cdot v + 216,57 \cdot t - 61,9 \cdot s_z \cdot v - 1362 \cdot s_z \cdot t - 13,9 \cdot v \cdot t + 139,68 \cdot s_z \cdot v \cdot t; \quad (2)$$

$$T_2 = 223,9 + 1141,3 \cdot s_z + 31,095 \cdot v + 272 \cdot t - 141,3 \cdot s_z \cdot v - 2400 \cdot s_z \cdot t - 30,68 \cdot v \cdot t + 355,56 \cdot s_z \cdot v \cdot t; \quad (3)$$

$$T_E = 288,95 + 725,4 \cdot s_z + 21,381 \cdot v + 327,52 \cdot t - 36,51 \cdot s_z \cdot v - 3327 \cdot s_z \cdot t - 28,19 \cdot v \cdot t + 415,87 \cdot s_z \cdot v \cdot t. \quad (4)$$

Зависимости, позволяющие рассчитать температуры в момент времени контакта, | предшествующий заключительному:

$$T_{1-1} = 307,57 + 438,1 \cdot s_z + 14,429 \cdot v + 161,9 \cdot t - 4,762 \cdot s_z \cdot v - 1235 \cdot S_z \cdot t - 4,571 \cdot v \cdot t + 123,81 \cdot s_z \cdot v \cdot t; \quad (5)$$

$$T_{2-1} = 222,95 + 1130,2 \cdot s_z + 24,381 \cdot v + 377,05 \cdot t - 74,6 \cdot s_z \cdot v - 3597 \cdot s_z \cdot t - 31,71 \cdot v \cdot t + 419,05 \cdot s_z \cdot v \cdot t; \quad (6)$$

$$T_{E-1} = 358,86 + 161,9 \cdot s_z + 11,476 \cdot v + 266,86 \cdot t - 60,317 \cdot s_z \cdot v - 3105 \cdot s_z \cdot t - 16,86 \cdot v \cdot t + 371,43 \cdot s_z \cdot v \cdot t. \quad (7)$$

Используя эти уравнения, можно рассчитать режим обработки, при котором температуры в зонах контакта зуба со стружкой и заготовкой не превысят допустимое значение.

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 элементов режима фрезерования.

2. Установлено, что температуры в зоне контакта зуба с заготовкой выше, чем в зоне контакта зуба со стружкой.

3. Выявлена закономерность распределения температур в поверхностном слое заготовки.

4. Получены математические зависимости, описывающие взаимосвязь температур с элементами режима фрезерования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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.

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

3. Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории резания. Математическое описание образования стружки разных видов, пульсации сил резания и параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью резца // Вестник машиностроения. 2008. № 7. С. 56–61.

4. Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории резания. Практические расчеты параметров резания при точении // Вестник машиностроения. 2008. № 9. С. 67–70.

5. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др. / Под общ. ред. И.А. Ординарцева. Л.: Машиностроение, Ленин

градское отделение, 1987. 846 с.

6. 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.

7. Унянин А.Н., Семдянкин И.В. Моделирование температурного поля при фрезеровании заготовок тонкостенных деталей // Инновации в машиностроении: сборник трудов 12-й междунар. научно-практ. конф. Новосибирск: Из-во НГТУ, 2021. С. 59–66.

REFERENCES

1. Unyanin, A.N. Analytical study of the temperature field during milling with the imposition of ultrasonic vibrations / A.N. Unyanin // Vestnik RGATU im. P.A. Solovyov. – 2017. – No. 2 (41). – S. 220 – 235.

2. Reznikov, A.N. Thermal processes in technological systems / A.N. Reznikov, L.A. Reznikov. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 288 p.

3. Vorontsov, A.L. Development of a new theory of cutting. Mathematical description of the formation of chips of various types, pulsations of cutting forces and parameters of contact between the machined surface of the workpiece and the rear surface of the cutter / A.L. Vorontsov, N.M. Sultan-Zade, A.Yu. Albagachiev // Bulletin of Mechanical Engineering. – 2008. – No. 7. – P. 56 – 61.

4. Vorontsov, A.L. Development of a new theory of cutting. Practical calculations of cutting parameters during turning / A.L. Vorontsov, N.M. Sultan-Zade, A. Yu. Albagachiev // Vestnik mashinostroeniya. – 2008. – No. 9. – P. 67 – 70.

5. Toolmaker's Handbook / I.A. Ordinarcev, G.V. Filippov, A. N. Shevchenko and others / Ed. ed. I.A. Ordinarceva. – L.: Mashinostroenie, Leningrad branch, 1987. – 846 p.

6. Vasin, S.A. Cutting materials: Thermomechanical approach to the system of interconnections during cutting: a textbook for technical universities / S.A. Vasin, A.S. Vereshchak, V.S. Kushner. – M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2001. – 448 p.

7. Unyanin, A.N. Modeling of the temperature field during milling blanks of thin-walled parts / A.N. Unyanin, I.V. Semdyankin. – Innovations in mechanical engineering: collection of works of the 12th int. scientific and practical. conf. – Novosibirsk: Iz-vo NSTU, 2021. – P. 59 – 66.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.12.2022; одобрена после рецензирования 29.12.2022; принята к публикации 11.01.2023.

The article was submitted 20.12.2022; approved after reviewing 29.12.2022; assepted for publication 11.01.2023.