

**WORKING OUT OF MATHEMATICAL MODELS OF APPOINTMENT
OF MODES OF CUTTING OF THERMOJET COMPOSITE MATERIALS**

Azat Gumerov, Ayrat Zagidullin, Denis Zharin, Lenar Shafigullin

Камская государственная инженерно-экономическая академия, 423810, Naberezhnyi Chelny

Abstract

In article mathematical models tailor type of appointment of modes of cutting of the thermojet composite materials, considering physicomechanical and technological properties of processed materials are presented. Target criteria of optimization of modes the processings considering technological and economic indicators edges of processing are developed. Optimization of modes of cutting is executed with application it is a lot of criteria methods. The algorithm of calculation of optimum modes of cutting of thermojet composite materials is developed.

Key words: composit materials, modes of cutting, optimization, physicomechanical properties

Благодаря уникальному комплексу эксплуатационных свойств композиционные материалы (КМ) на основе полимеров нашли широкое применение в машиностроении при производстве защитных покрытий, стеклопластиков, фасонных изделий, футеровочных плит для защиты металлических конструкций от воздействия агрессивных сред и ударных нагрузок, элементов станочной системы (станин, направляющих, подрезцовых пластин и державок токарных резцов), а также для восстановления и усиления конструкций и омоноличивания сборных элементов.

В процессе изготовления и применения полимерных композиционных материалов возникает необходимость их механической обработки: резки, фрезерования, сверления, развертывания, нарезания резьбы, шлифования, зачистки поверхности. Механическую обработку резанием используют для обеспечения повышенной точности геометрических размеров изделий, при их сложной конфигурации, а также при малых объемах производства, когда использование трудоемкой и дорогостоящей технологической оснастки (пресс-форм) экономически нецелесообразно.

Фрезерование и сверление деталей из композиционных материалов являются наиболее распространенными операциями, применяемыми при обработке плоских и фасонных поверхностей, пазов, уступов, фасок, выполнения технологических отверстий. Процесс резания полимерных материалов существенным образом отличается от процесса резания металлов в связи со специфическими свойствами обрабатываемых композиционных материалов, связанных с их анизотропией свойств и малой теплопроводностью. В процессе механической обработки под действием механических и термических нагрузок происходит деструкция композиционных материалов, негативно влияющая на качество получаемых изделий.

В соответствии с современными тенденциями развития производства изделий и деталей из композиционных материалов в машиностроении эффективным представляется их изготовление с использованием механической обработки.

Экспериментальные исследования проводили на эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых композитах.

В качестве исходных материалов в работе использовали: эпоксидную смолу ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), дибутилфталат (ДБФ) (ГОСТ 8728-88), полиэтиленполиамин (ПЭПА) ТУ 2413-357-00203447-99, полиэфирную смолу 540-М 888, пероксид №1 (раствор перекиси метилэтилкетона в диметилфталате), простой полиэфир (Сарэл А-04) и полиизоцианат (Сарэл Б-04). Наполнителями композиционных материалов служили: диабаз ($\rho_n=2900 \text{ кг/м}^3$, $S_{уд}=80 \div 780 \text{ м}^2/\text{кг}$), маршалит ($\rho_n=2650 \text{ кг/м}^3$, $S_{уд}=80 \div 780 \text{ м}^2/\text{кг}$), ПЦ 400 ДФ ($\rho_n=3100 \text{ кг/м}^3$, $S_{уд}=80 \div 780 \text{ м}^2/\text{кг}$), аэросил А 300 ($S_{уд}=80 \div 780 \text{ м}^2/\text{кг}$), гранитный порошок ($\rho_n=2650 \text{ кг/м}^3$, $S_{уд}=150 \text{ м}^2/\text{кг}$) и полиамидное волокно ($d_f=15 \text{ мкм}$, $l=6 \text{ мм}$) ($S_{уд}$ - удельная поверхность наполнителя; ϑ - объемное содержание наполнителя).

Оценку физико-механических свойств и коррозионной стойкости композиционных материалов в воде и в СОЖ (смазочно-охлаждающая жидкость) проводили по измеренным величинам динамического модуля упругости E_d , предела прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$, предела прочности при одноосном сжатии $R_{сж}$, твердости по Бринеллю $HB_{бр}$, твердости по Гепплеру HB_g , условно-мгновенного модуля упругости E_o , равновесного модуля упругости $E_{ув}$, ударной вязкости A , массопоглощению m_i , коэффициенту химической стойкости $K_{х.с.}$ согласно действующим ГОСТам и нормативным документам.

Исследования режимов механической обработки образцов из композиционных материалов при фрезеровании и сверлении проводили на вертикально-фрезерном станке модели 6Р11Ф3, с применением цилиндрических фрез Р18 Ø 15-32 мм, и на вертикально-сверлильном станке модели 2С132, с применением сверл Р6М5 Ø 5-20 мм (ГОСТ 11902-77) (n - частота вращения шпинделя, S - подача, S_z - подача на зуб фрезы, R_a - средняя величина микронеровностей).

На рисунках 1-2 представлены результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров механической обработки сверлением и фрезерованием на качество матричных композиционных материалов [1].

Введение наполнителей приводит к изменению качества композитов полученных механической обработкой (рисунок 3).

В процессе исследований установлено, что введение высокомодульных (маршалит, диабаз, портландцемент) и низко модульного (аэросил) наполнителей в полиэфирную, эпоксидную и эпоксиполиуретановую матрицу приводит к существенному повышению качества обработанных поверхностей (снижение R_a на 10-20%).

Установлено, что механическая обработка композиционных материалов осевыми инструментами при фрезеровании и сверлении возможна при ϑ до 0,4. При ϑ более 0,4 происходит разрушение композита вследствие процессов, связанных с механодеструкцией.

В процессе обработки наполненных полимерных композитов под действием больших локальных механических напряжений, высокой температуры, превышающей теплостойкость органических составляющих материала, и интенсивных окислительных процессов происходит деструкция полимера, приводящая к ухудшению эксплуатационных свойств поверхностного слоя материала.

Для расчета режимов обработки при сверлении и фрезеровании эпоксидных, полиэфирных и эпоксиполиуретановых КМ в настоящее время используют стойкостные модели тейлоровского типа:

- для операции сверления:

$$V = \frac{C_v \cdot D^{x_v} \cdot K_v}{T^m \cdot S^{y_v}}, \quad (1)$$

где V – скорость резания; C_v - коэффициент факторов, не входящих в уравнение в явном виде (физико-технические свойства обрабатываемого материала и осевого инструмента); D - диаметр инструмента; K_v - коэффициент, учитывающий отличие конкретных условий работы инструмента от принятых за основу; T - лимитируемое время работы инструмента; x_v, y_v, m - коэффициенты технологических параметров обработки).

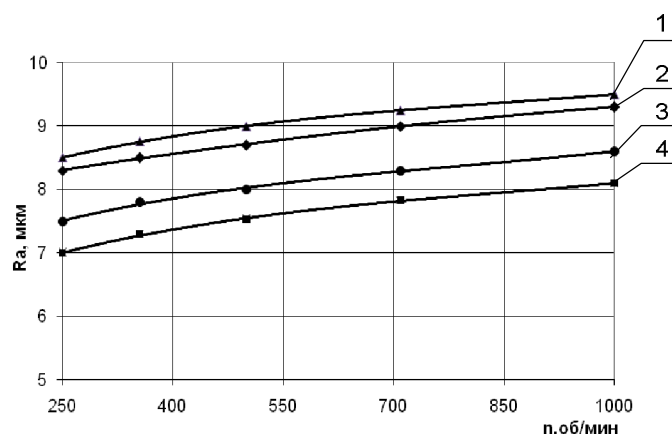
- для операции фрезерования:

$$V = \frac{C_v \cdot D^{w_v} \cdot K_v}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v}}, \quad (2)$$

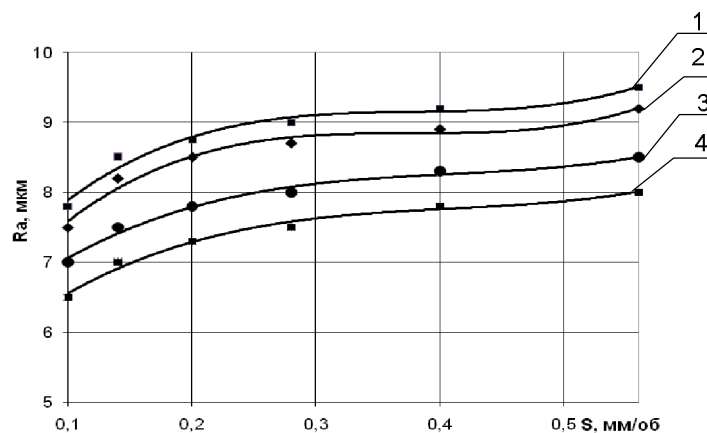
где B - ширина срезаемого слоя; z - количество режущих кромок инструмента; w_v, g_v, n_v - коэффициенты технологических параметров обработки.

Технологические параметры обработки КМ, полученные по тейлоровской модели, плохо коррелируют с экспериментальными данными в области низких подач (рисунок 5) Данный эффект наблюдается при различных операциях механической обработки осевыми инструментами, в том числе при фрезеровании.

а)



б)



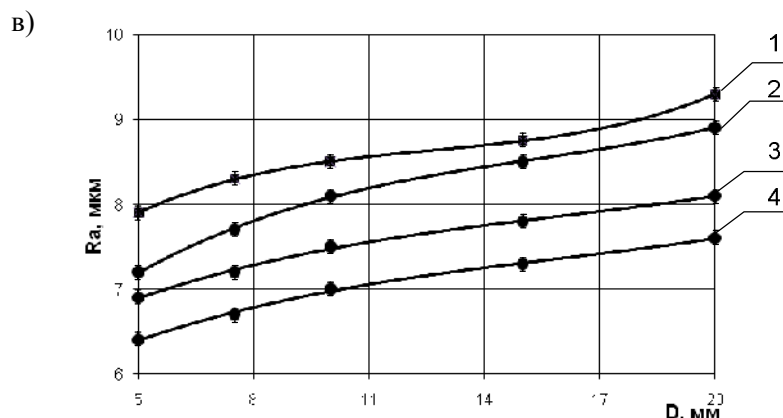
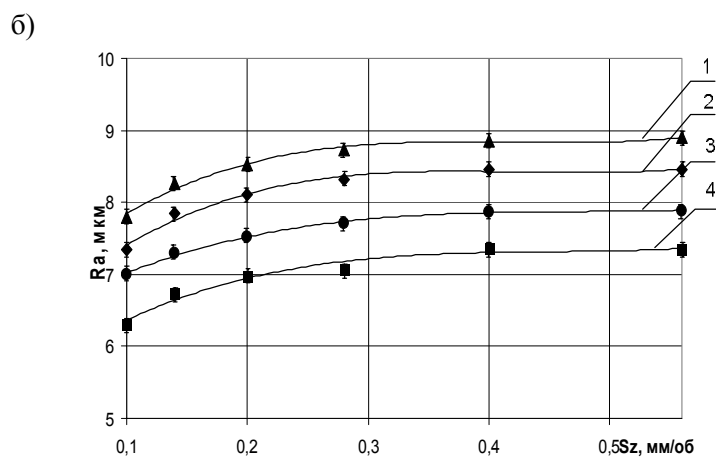
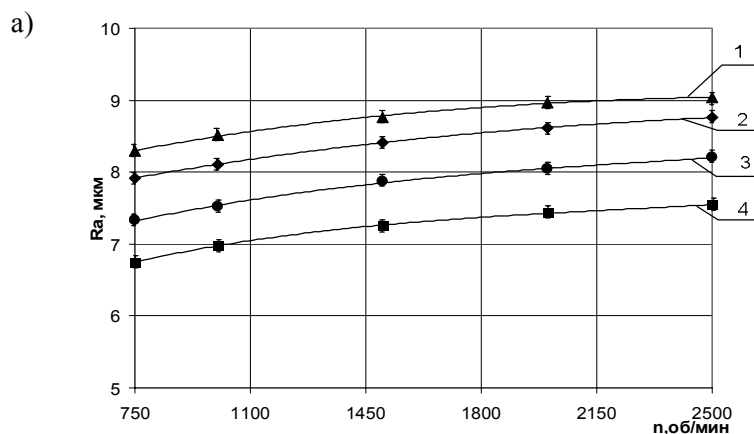


Рисунок 1. Влияние технологических параметров механической обработки сверлением на качество полимерных композиционных материалов: а) влияние скорости обработки; б) влияние подачи осевого инструмента; в) глубины резания: 1 - Полиэфирная смола 540-М 888 - 100 масс.ч.; Пероксид №1 - 2,5 масс.ч.; 2 - ЭД-20 - 100 масс.ч.; ПЭПА - 11 масс.ч.; 3 - ЭД-20 - 100 масс.ч.; ПЭПА - 11 масс.ч.; ДБФ - 5 масс.ч.; 4 - ЭД-20 - 100 масс.ч.; ПЭПА - 11 масс.ч.; Сарэл 04 - 10 масс.ч.



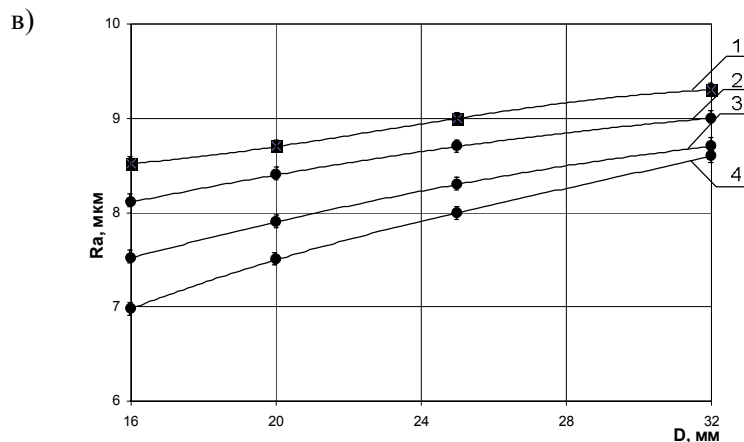


Рисунок 2. Влияние технологических параметров механической обработки фрезерованием на качество полимерных композиционных материалов: а) влияние скорости обработки; б) влияние подачи осевого инструмента; в) глубины резания: 1 - Полиэфирная смола 540-М 888 - 100 масс.ч.; Пероксид №1 - 2,5 масс.ч.; 2 - ЭД-20 - 100 масс.ч.; ПЭПА - 11 масс.ч.; 3 - ЭД-20 - 100 масс.ч.; ПЭПА - 11 масс.ч.; ДБФ - 5 масс.ч.; 4 - ЭД-20 - 100 масс.ч.; ПЭПА - 11 масс.ч.; Сарэл 04 - 10 масс.ч.

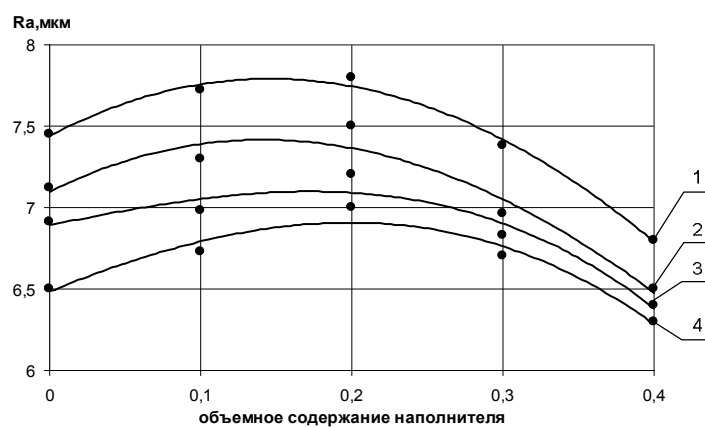


Рисунок 3. Влияние содержания маршалита ($S_{уд}=250 \text{ м}^2/\text{кг}$) на качество обработанных образцов из полимерных композиционных материалов ($n=1000 \text{ об/мин}$; $S_z=0,2 \text{ мм/об}$): 1 - Полиэфирная смола 540-М 888 - 100 масс.ч.; Пероксид №1 - 2,5 масс.ч.; 2 - ЭД-20 - 100 масс.ч.; ПЭПА - 11 масс.ч.; 3 - ЭД-20 - 100 масс.ч.; ПЭПА - 11 масс.ч.; ДБФ - 5 масс.ч.; 4 - ЭД-20 - 100 масс.ч.; ПЭПА - 11 масс.ч.; Сарэл 04 - 10 масс.ч.

В ходе проведённых исследований установлено, что при обработке резанием полимерных композитов источником возникновения трещин и больших значений микронеровностей являются значительные силы сопротивления частиц наполнителя, приводящие к механодеструкции и росту шероховатости поверхности (рисунок 4).

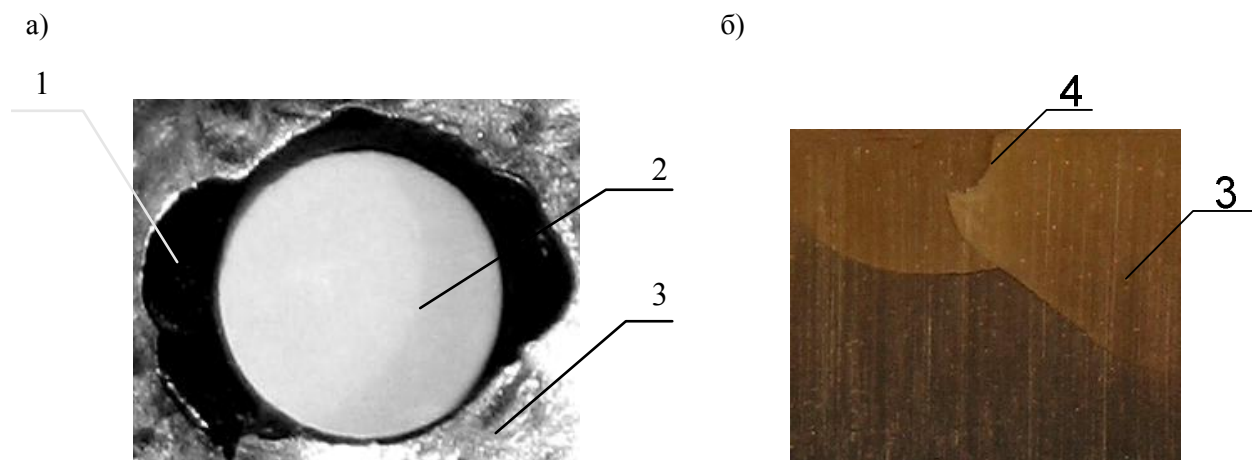


Рисунок 4. Внешний вид поверхностей композиционных материалов, полученных механической обработкой сверлением (а) на входе инструмента (х3) и фрезерованием (б) на внутренней поверхности (х20) (ЭД-20 - 100 масс.ч.; ПЭПА - 11 масс.ч.; ДБФ - 5 масс.ч.; маршалит $\vartheta=0,3$): 1 - сколы; 2 - отверстие D 15; 3 - полимерный композиционный материал; 4 - трещина

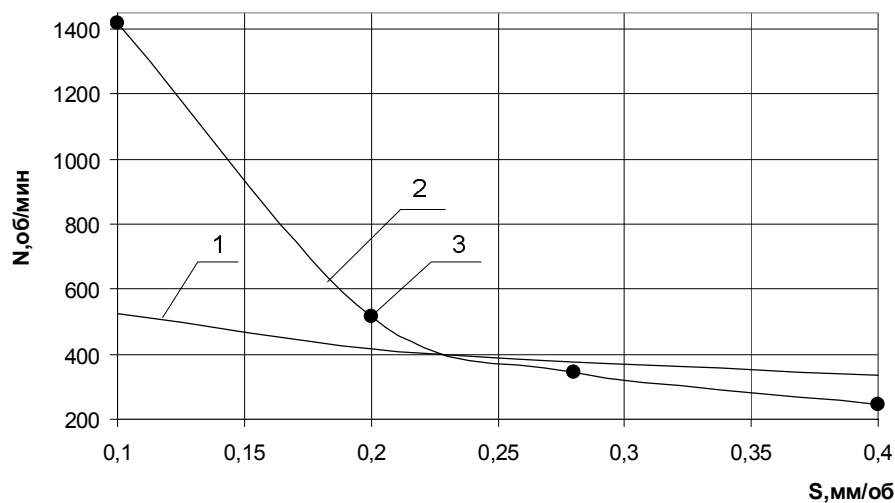


Рисунок 5. Технологические параметры механической обработки КМ для операции сверления (ЭД-20 - 100 масс.ч.; ПЭПА - 11 масс.ч.; ДБФ - 5 масс.ч.; Маршалит $\vartheta=0,3$): 1 - тейлоровская модель; 2 - по модели (10); 3 - экспериментальные данные

Твердость КМ характеризует поверхностные свойства и не учитывает внутренние дефекты материала. Условно-мгновенный, равновесный и динамический модули упругости, а также предел прочности при одноосном сжатии являются объемными свойствами полимерного КМ. Для получения высококачественных машиностроительных изделий путем механической обработки необходимо учитывать поверхностные и объемные свойства КМ.

Значительное влияние на качество получаемых поверхностей оказывает наличие внутренних дефектов (трещины, поры) в обрабатываемом материале. Внутренние поры КМ служат источниками возникновения микротрещин. С ростом приложенной нагрузки и длительности ее воздействия происходит рост микротрещин и их объединение в магистральную трещину, приводящую к разрушению образца. Таким образом, наличие внутренних дефектов приводит к значительному снижению прочности КМ, которая становится значительно ниже, чем теоретическая.

С целью увеличения точности аппроксимации экспериментальных данных и уменьшения погрешности расчета режимов обработки необходимо внести в стойкостные модели технологических параметров механической обработки полимерных композитов безразмерный экспоненциальный член e^W . Значение показателя степени определяется на основе экспериментальных данных, в соответствии с методологией, предложенной Грановским И.И. [2].

Для расчета технологических параметров КМ внесем в стойкостные тейлоровские модели ряд поправочных коэффициентов:

$$K_{\text{упр.с}} = \left(\frac{E_c}{E_m} \right)^{z1} = \left(\frac{E_m E_f + [E_m \vartheta + E_f (1 - \vartheta)] \cdot b_{\text{упр}} \cdot S_{\text{уд}} \cdot k_{\text{уд}}}{(E_m \vartheta + E_f (1 - \vartheta)) \cdot E_m} \right)^{z1}, \quad (3)$$

где $K_{\text{упр.с}}$ - коэффициент, учитывающий влияние на технологические параметры КМ динамического модуля упругости обрабатываемого материала; $z1$ - показатель степени;

$$K_{\text{сж.с}} = \left(\frac{R_{\text{сж.с}}}{R_{\text{сж.м}}} \right)^{z2} = \left(\frac{R_{\text{сж.м}} \cdot (1 + \alpha_{\text{сж}} \cdot \vartheta^V) + b_{\text{сж}} \cdot S_{\text{уд}} \cdot k}{R_{\text{сж.м}}} \right)^{z2} = [(1 + \alpha_{\text{сж}} \cdot \vartheta^V) + \frac{b_{\text{сж}}}{R_{\text{сж.м}}} \cdot S_{\text{уд}} \cdot k]^{z2}, \quad (4)$$

где $K_{\text{сж.с}}$ - коэффициент, учитывающий влияние на технологические параметры КМ предела прочности при одноосном сжатии обрабатываемого материала; $z2$ - показатель степени;

$$K_{\text{нв}} = \left(\frac{HB_{\text{пр.с}}}{HB_{\text{пр.м}}} \right)^{z3} = \left(\frac{\frac{R_{\text{сж.м}} \cdot (1 + \alpha_{\text{сж}} \cdot \vartheta^V) + b_{\text{сж}} \cdot S_{\text{уд}} \cdot k}{K_{\text{сж}}}}{\frac{R_{\text{сж.м}}}{K_{\text{сж}}}} \right)^{z3} = [(1 + \alpha_{\text{сж}} \cdot \vartheta^V) + \frac{b_{\text{сж}}}{R_{\text{сж.м}}} \cdot S_{\text{уд}} \cdot k]^{z3}, \quad (5)$$

где $K_{\text{нв}}$ - коэффициент, учитывающий влияние на технологические параметры КМ твердости обрабатываемого материала; $z3$ - показатель степени;

$$K_0 = \left(\frac{E_{0c}}{E_{0m}} \right)^{z4}, \quad (6)$$

где K_0 - коэффициент, учитывающий влияние на технологические параметры КМ условно-мгновенного модуля упругости обрабатываемого материала; $z4$ - показатель степени;

$$K_{\text{ув}} = \left(\frac{E_{\text{увс}}}{E_{\text{уvm}}} \right)^{z5}, \quad (7)$$

где $K_{\text{ув}}$ - коэффициент, учитывающий влияние на технологические параметры КМ равновесного модуля упругости обрабатываемого материала; $z5$ - показатель степени.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что, чем выше прочностные и упругие свойства КМ, тем выше технологические параметры обработки осевыми инструментами. Таким

образом, зависимость между коэффициентами $K_{\text{упр.с}}, K_{\text{сж.с}}, K_{\text{нв}}, K_0, K_{\text{ув}}$ и скоростью механической обработки прямо пропорциональна.

Установлено, что с ростом количества внутренних дефектов происходит снижение прочности композитов. Следовательно, обработку данных КМ следует вести при более низких режимных параметрах.

С учетом вышесказанного получены экспоненциальные модели стойкости, учитывающие прочность, твердость, динамический, условно-мгновенный и равновесный модули упругости обрабатываемых материалов (рисунок 5):

$$V = \frac{C_v \cdot D^{x_v} \cdot K_v \cdot [(1 + \alpha_{\text{сж}} \cdot \mathcal{G}') + b_{\text{сж}1} \cdot (S_{y02} - S_{y01})]^{2+z3} \cdot e^w}{T^m \cdot S^{y_v}} \times \left(\frac{E_m E_f + [E_m \mathcal{G} + E_f (1 - \mathcal{G})] \cdot b_{\text{упр}} \cdot S_{уд} \cdot k_{уд}}{(E_m \mathcal{G} + E_f (1 - \mathcal{G})) \cdot E_m} \right)^{z1} \cdot \left(\frac{E_{0c}}{E_{0m}} \right)^{z4} \cdot \left(\frac{E_{увс}}{E_{увм}} \right)^{z5}, \quad (8)$$

$$V = \frac{C_v \cdot D^{w_v} \cdot K_v \cdot [(1 + \alpha_{\text{сж}} \cdot \mathcal{G}') + b_{\text{сж}1} \cdot (S_{y02} - S_{y01})]^{2+z3} \cdot e^w}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v}} \times \left(\frac{E_m E_f + [E_m \mathcal{G} + E_f (1 - \mathcal{G})] \cdot b_{\text{упр}} \cdot S_{уд} \cdot k_{уд}}{(E_m \mathcal{G} + E_f (1 - \mathcal{G})) \cdot E_m} \right)^{z1} \cdot \left(\frac{E_{0c}}{E_{0m}} \right)^{z4} \cdot \left(\frac{E_{увс}}{E_{увм}} \right)^{z5}, \quad (9)$$

где $b_{\text{сж}1} = \frac{b_{\text{сж}}}{\sigma_{\text{сж.т}}}$ - постоянная; w - показатель степени зависящий, от D, S, T .

Учитывая коэффициенты коррозионной стойкости, получим:

$$V = \frac{C_v \cdot D^{x_v} \cdot K_v \cdot e^w}{T^m \cdot S^{y_v}} \cdot \left(\frac{E_c}{E_m} \cdot k_{\text{м.упр}} \right)^{z1} \cdot \left(\frac{R_{\text{сж.с}}}{R_{\text{сж.т}}} \cdot k_{\text{т.сж}} \right)^{z2} \cdot \left(\frac{R_{\text{сж.с}}}{R_{\text{сж.т}}} \cdot k_{\text{т.нв}} \right)^{z3} \cdot k_o^{z4} \cdot k_{ув}^{z5}, \quad (10)$$

$$V = \frac{C_v \cdot D^{w_v} \cdot K_v \cdot e^w}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v}} \cdot \left(\frac{E_c}{E_m} \cdot k_{\text{м.упр}} \right)^{z1} \cdot \left(\frac{R_{\text{сж.с}}}{R_{\text{сж.т}}} \cdot k_{\text{т.сж}} \right)^{z2} \cdot \left(\frac{R_{\text{сж.с}}}{R_{\text{сж.т}}} \cdot k_{\text{т.нв}} \right)^{z3} \cdot k_o^{z4} \cdot k_{ув}^{z5}. \quad (11)$$

где $k_{\text{т.сж}}, k_{\text{т.нв}}, k_{\text{м.упр}}$ - коэффициенты стойкости в агрессивных средах.

Эффективность механической обработки осевым инструментом во многом зависит от уровня технологической подготовки производства. В связи со значительным количеством нормативной информации по назначению технологических параметров и нормам расхода инструмента существует проблема выбора оптимальных условий обработки.

Задача выбора режимов работы инструмента в этом случае заключается в получении таких искомых параметров процесса, которые обеспечили бы его максимальную эффективность в заданных конкретных производственных условиях при выполнении всех требований к нему. Последние накладывают определенные технические ограничения на возможные технологические параметры [3].

Модель оптимизации технологических параметров обработки высокотехнологичных полимерных КМ строится по двум связанным между собой функциональным группам, включающим целевой критерий (критерий оптимизации) и область граничных условий в виде неравенств, образующих область возможных решений. Целевая функция представляет собой

аналитическую зависимость между целевым критерием и параметрами оптимизации процесса механической обработки. Параметрами оптимизации выступают скорость обработки и подача.

Целевые критерии делят на две группы: технологические и обобщенные. Технологические - максимальная производительность обработки ($F_{от}(n, S)$): $F_{от}(n, S) = \frac{L}{n \cdot S} \rightarrow \min$ (L - длина рабочего хода осевого инструмента, мм).

Данный критерий обеспечивает достижение максимальной выработки рабочего. Он применяется при ликвидации узких мест, когда экономия «живого» труда имеет наибольшее значение. Однако данный критерий может оказаться экономически неоправданным, поэтому предпочтительным является критерий, ориентированный на комплексные показатели - минимальную себестоимость процесса обработки и высокий коэффициент загрузки оборудования ($F_{ок}(n, S)$):

$$F_{ок}(n, S) = \frac{L}{n \cdot S} \cdot (k_{cm} + k_{zn}) + \frac{k_{ин} \cdot (318 \cdot D^{x_v-1} \cdot C_v)^{1/m}}{(n \cdot S^{y_v})^{1/m}} \rightarrow \min, \quad (12)$$

где k_{cm} - стоимость одной минуты работы станка; k_{zn} - стоимость одной минуты рабочего времени работника; $k_{ин}$ - стоимость инструмента.

Однако, данная форма записи обобщенного критерия, приведенного в справочной литературе [3], является неадекватной для современного машиностроительного производства, так как не учитывает ряд показателей, а именно: физико-технологические свойства обрабатываемого материала, стойкость осевого инструмента.

Определим стойкость инструментов, используя уравнения (10-11):

- для сверла

$$T = \left(\frac{C_v \cdot D^{x_v} \cdot K_v \cdot e^w}{V \cdot S^{y_v}} \cdot \left(\frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m.упр} \right)^{z_1} \cdot \left(\frac{R_{сжс.с}}{R_{сжс.т}} \cdot k_{т.сжс} \right)^{z_2} \times \left(\frac{R_{сжс.с}}{R_{сжс.т}} \cdot k_{т.НВ} \right)^{z_3} \cdot \left(\frac{E_{0с}}{E_{от}} \right)^{z_4} \cdot \left(\frac{E_{увс}}{E_{увт}} \right)^{z_5} \right)^{1/m}, \quad (13)$$

- для фрезы

$$T = \left(\frac{C_v \cdot D^{w_v} \cdot K_v \cdot e^w}{V \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v}} \cdot \left(\frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m.упр} \right)^{z_1} \cdot \left(\frac{R_{сжс.с}}{R_{сжс.т}} \cdot k_{т.сжс} \right)^{z_2} \times \left(\frac{R_{сжс.с}}{R_{сжс.т}} \cdot k_{т.НВ} \right)^{z_3} \cdot \left(\frac{E_{0с}}{E_{от}} \right)^{z_4} \cdot \left(\frac{E_{увс}}{E_{увт}} \right)^{z_5} \right)^{1/m}. \quad (14)$$

Суммарная стойкость инструмента $\sum T$, мин, до полного изнашивания, с учетом числа переточек:

$$\sum T = (K + 1) \cdot T, \quad (15)$$

где K - число переточек режущего инструмента, зависящее от марки инструментального материала и конструкции инструмента.

Если инструмент не перетачиваемый, то $K=1$ и $\sum T = T$. Основное технологическое время равно: $t_0 = \frac{L}{n \cdot S}$. Взяв отношение между t_0 и $\sum T$, определим долю износа инструмента, приходящуюся на одну обработанную деталь.

Подставив последнее отношение в уравнение (12) и вынося t_0 за скобки, получим:

- для операции сверления

$$F_{ок}(n, S) = \frac{L}{n \cdot S} \cdot [k_{ст} + k_{зп} + \frac{k_{ин} \cdot (n \cdot S^{y_v})^{1/m}}{(k+1)(318 \cdot C_v \cdot D^{x_v^{-1}} \cdot e^w \cdot K_v \cdot \left(\frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m.упр}\right)^{z1} \cdot \left(\frac{R_{сж.с}}{R_{сж.т}} \cdot k_{m.сж}\right)^{z2} \cdot \left(\frac{R_{сж.с}}{R_{сж.т}} \cdot k_{m.НВ}\right)^{z3} \cdot k_o^{z4} \cdot k_{ув}^{z5})^{1/m}}] \quad (16)$$

- для операции фрезерования

$$F_{ок}(n, S_z) = \frac{L}{n \cdot S_z} \cdot [k_{ст} + k_{зп} + \frac{k_{ин} \cdot (n \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v} \cdot t^{x_v})^{1/m}}{(k+1)(318 \cdot C_v \cdot D^{w_v^{-1}} \cdot e^w \cdot K_v \cdot \left(\frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m.упр}\right)^{z1} \cdot \left(\frac{R_{сж.с}}{R_{сж.т}} \cdot k_{m.сж}\right)^{z2} \cdot \left(\frac{R_{сж.с}}{R_{сж.т}} \cdot k_{m.НВ}\right)^{z3} \cdot k_o^{z4} \cdot k_{ув}^{z5})^{1/m}}] \quad (17)$$

При условии однокритериальной задачи для нахождения оптимальных режимов резания композиционных материалов использовали симплекс-метод, а для решения многокритериальной задачи множество Парето [4]. При этом критериями оптимизации являлись: для сверления $U_{max} = -F_t(n, S) = \frac{t}{n \cdot S}$ и $V_{max} = -F_{ок.св}(n, S)$; для фрезерования

$U_{max} = -F_t(n, S_z) = \frac{t}{n \cdot S_z}$ и $V_{max} = -F_{ок.фр}(n, S_z)$. Для нахождения компромиссного решения

использовали метод идеальной точки, а в качестве координат целевой точки выбирали сочетание наилучших значений.

На основе полученных зависимостей расчета режимов резания и целевых критериев разработаны алгоритмы расчета и оптимизации режимов резания композитов (рисунки 6-8). Данные алгоритмы можно применить в различных инженерных программах, предназначенных для конструирования и производства материалов и изделий из композиционных материалов.

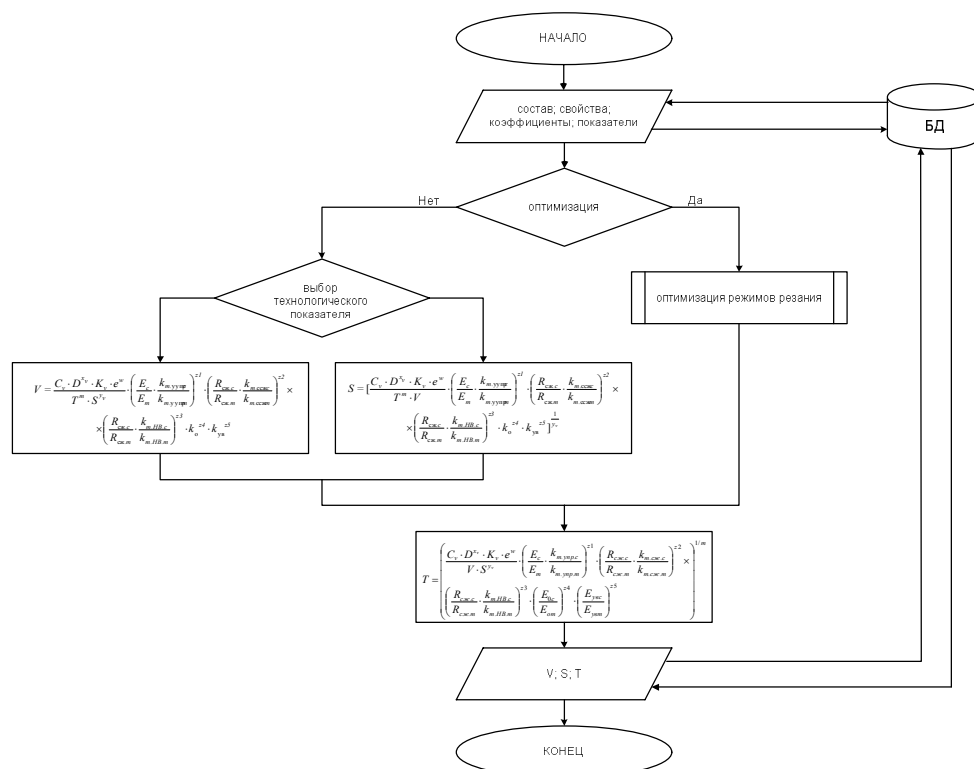


Рисунок 6. Алгоритм расчета режимов резания композитов при сверлении

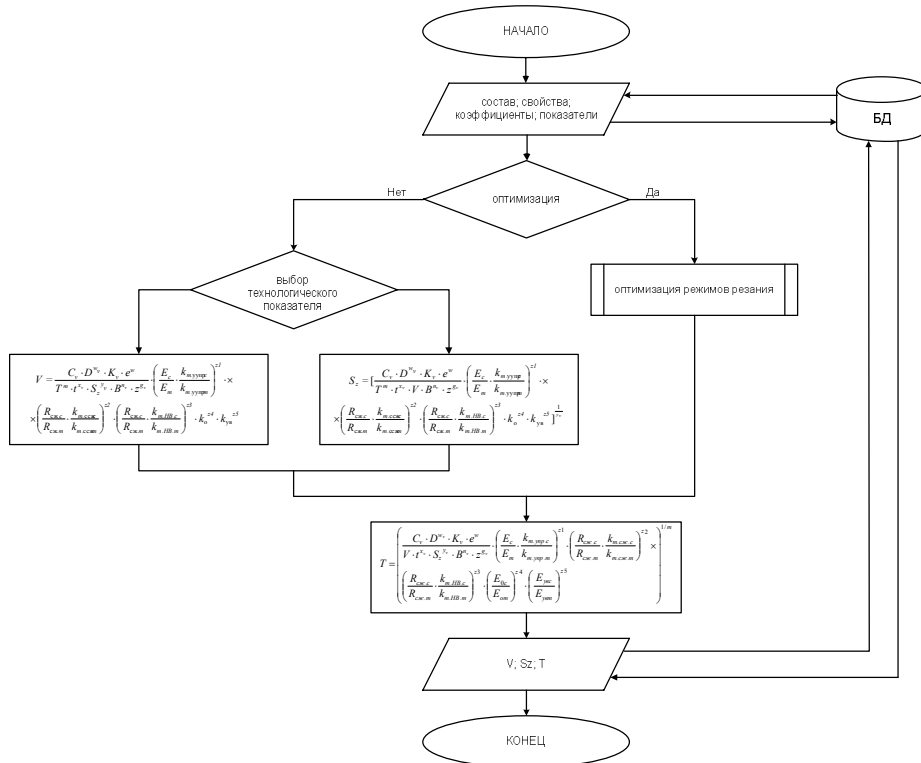


Рисунок 7. Алгоритм расчета режимов резания композитов при фрезеровании

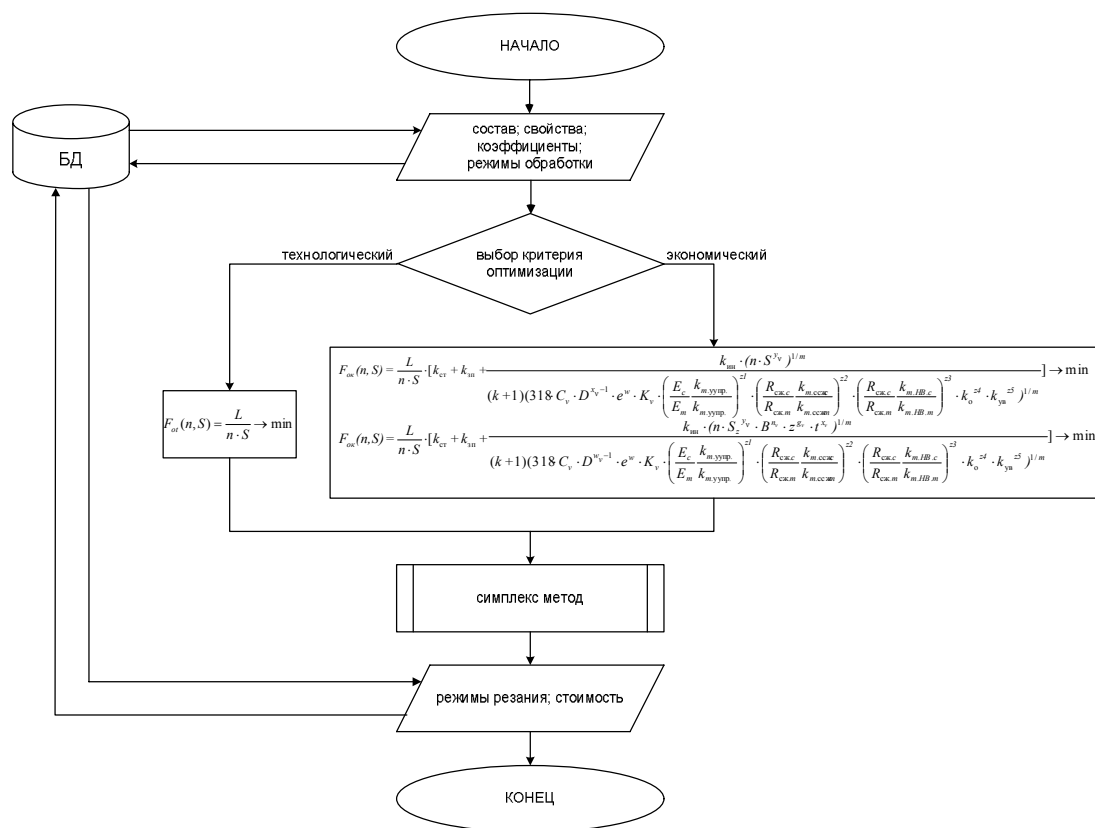


Рисунок 8. Алгоритм оптимизации режимов резания композитов

С применением $F_t(n, S)$, $F_t(n, S_z)$, $F_{ок.св}(n, S)$ и $F_{ок.фр}(n, S_z)$ установлены режимы обработки композитов для производства фасонных изделий и футеровочных плит (таблица).

Как видно из таблицы, полученные по рекомендуемым режимам механической обработки изделия из полимерных композитов по показателю качества R_a , превосходят изделия, изготовленные по справочным классическим моделям.

Journal of International Scientific Publications:
Materials, Methods & Technologies, Volume 6, Part 3

Таблица 3. Оптимизированные высокотехнологичные составы полимерных композиционных материалов

№	Состав					Рекомендуемые режимы обработки при фрезеровании			Справочные режимы обработки при фрезеровании		
	Полимерная смола	Отвердитель масс. ч. на 100 масс. ч. смолы	Модификатор масс. ч. на 100 масс. ч. смолы	Пластификатор масс. ч. на 100 масс. ч. смолы	Объемное содержание наполнителя	n , об/мин	A , мм	Ra , мкм	n , об/мин	S_z , мм/об	Ra , мкм
1	ЭД-20	ЭПА 11	-	ДБФ 5	Диабаз $\square=0,3$	1500	0,20	7,0-8,0	1500	0,20	7,0-8,0
2	ЭД-20	ЭПА 11	-	ДБФ 5	Маршалит $\square=0,3$	1500	0,20	7,0-8,0	1500	0,20	7,0-8,0
3	ЭД-20	ЭПА 11	-	ДБФ 5	Цемент $\square=0,3$	1500	0,20	6,5-7,5	1500	0,20	6,5-7,5
4	ЭД-20	ЭПА 11	-	ДБФ 5	Аэросил $\square=0,3$	1000	0,14	7,0-8,0	1500	0,20	7,0-8,0
Футеровочные плиты											
5	540-М888	Пероксид 2,5	-	-	Диабаз $\square=0,4$	1000	0,28	6,5-7,5	1500	0,20	6,5-7,5
6	540-М888	Пероксид 2,5	-	-	Маршалит $\square=0,4$	1000	0,28	6,0-7,0	1500	0,20	6,5-7,5

Journal of International Scientific Publications:
Materials, Methods & Technologies, Volume 6, Part 3

	8										
7	5 4 0 - М 8 8 8	Пероксид 2,5	-	-	Цемент □=0,4	1000	0,28	6,5-7,5	1500	0,20	6,5-7,5
8	Э Д - 2 0	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Диабаз □=0,4	1000	0,20	6,5-7,5	1500	0,20	7, 0- 8, 0
9	Э Д - 2 0	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Маршалит □=0,4	1000	0,20	6,5-7,5	1500	0,20	7, 0- 8, 0
10	Э Д - 2 0	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Цемент □=0,4	1000	0,28	6,5-7,5	1500	0,20	7, 0- 8, 0
11	Э Д - 2 0	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Аэросил □=0,4	750	0,20	7,0-8,0	1500	0,20	7, 0- 8, 0
14	5 4 0 - М 8 8 8	Пероксид 2,5	-	-	Аэросил □=0,4	750	0,20	7,0-8,0	1500	0,20	7,0-8,0
15	Э Д - 2 0	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Диабаз м=0,3	1500	0,28	7,0-8,0	1500	0,20	7,0-8,0
16	Э Д - 2 0	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Диабаз □=0,4	1000	0,28	6,5-7,5	1500	0,20	6,5-7,5

Journal of International Scientific Publications:
Materials, Methods & Technologies, Volume 6, Part 3

17	Э Д - 2 0	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Маршалит □=0,3	1500	0,28	7,0-8,0	1500	0,20	7,0-8,0
18	Э Д - 2 0	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Маршалит □=0,4	1000	0,28	6,5-7,5	1500	0,20	6,5-7,5
19	Э Д - 2 0	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Цемент □=0,3	1500	0,28	6,5-7,5	1500	0,20	6,5-7,5
20	Э Д - 2 0	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Цемент □=0,4	1000	0,28	6,0-7,0	1500	0,20	6,0-7,0
21	Э Д - 2 0	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Аэросил □=0,4	750	0,20	7,0-8,0	1500	0,20	7,5-8,5

REFERENCES

1. Шафигуллин Л.Н. Исследование высокотехнологичных композиционных материалов с заданными физико-механическими свойствами для изделий машиностроения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Набережные Челны, 2009. - 20 с.
2. Грановский, Г.И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов / Грановский Г.И. - М.: Машиностроение, 1982. - 112 с.
3. Ящерицын, П.И. Теория резания: учеб. / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. - 2-е изд., испр. и доп. - Мн.: Новое знание, 2006. - 512 с.
4. Исследование операций в экономике: Учеб. пособие для вузов / Н.Ш. Кремер [и др.] - М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1997. - 407 с.