

DOI: 10.12737/article_5940f01a170705.18626391

Минасова В.Е., аспирант, вед. инж.,
Любимый Н.С., аспирант,
Чепчуров М.С., д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЛИФОВАНИЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СМЫКАНИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ ПРЕСС-ФОРМ

vika314tm@yandex.ru

В настоящее время для изготовления деталей, оснастки и ремонта машиностроительные предприятия все чаще применяют композиционные материалы, например, металлополимеры. Исследования показали, что использование металлополимера в качестве материала формообразующей детали пресс-формы значительно снижает стоимость оснастки для литья пластика. В статье рассмотрены вопросы, связанные с оптимизацией параметров шлифования металлополимерной поверхности изделия. Авторами дан анализ методов параметрической оптимизации. Целью работы является решение задачи назначения режимов резания при шлифовании металлополимерной поверхности смыкания формообразующих деталей пресс-форм.

Ключевые слова: оптимизация, шлифование, металлополимер, метод, параметр, себестоимость.

Одной из основных задач при механической обработке является оптимизация режимов резания. При обработке металлов оптимизация параметров достаточно изучена, однако при обработке металлополимерных комбинированных металл-металлополимерных поверхностей таких исследований не проводилось [1]. Обеспечение шероховатости при условии минимальных временных затрат в условиях реального производства возможно при назначении соответствующих режимов обработки.

Критерий минимальной технологической себестоимости выполнения операции шлифования, критерий максимальной производительности, обеспечивающий наименьшие затраты времени на обработку и критерий точности обработки и параметров качества поверхностного слоя принимают в качестве целевой функции оптимизации [2]. Критерии максимальной производительности и минимальной себестоимости получили широкое использование в практике при расчетах оптимальных режимов резания [3, 4].

Уменьшение себестоимости и сокращение времени изготовления является основным фактором при производстве формообразующей пресс-формы [5], также опираясь на рекомендации В.Ф. Безъязычного [6] – критерием оптимизации становится минимальная технологическая себестоимость выполнения операций. Согласно рекомендациям [7] определение оптимальных режимов резания проводят путем многоуровневой оптимизации.

Авторами проводился эксперимент по шлифованию поверхностей смыкания металлополимерных формообразующих. При проведении планового эксперимента были получены значения, на основании которых была математическая модель шероховатости металлополимерной поверхности полученной шлифованием. Согласно этому для решения системы найдены все необходимые ограничения, что позволяет приступить к оптимизации [8]. Система уравнений, полученная по результатам эксперимента, выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} B_c \cdot \left(\frac{L}{S_{пр}} + \frac{S_{р.х.}}{V_{поп}} \right) \cdot \frac{\Delta}{t} \cdot \left(\text{int} \left(\frac{B_{ш}}{B_k - \delta} \right) + 1 \right) \Rightarrow \min \\ 0,01 \leq t \leq 0,1 \\ 9 \leq S_{пр} \leq 40 \\ Ra^{\text{доп}} \leq e^{3.3766 - 0.0773 \cdot \ln(S_{пр}) + 1.0992 \cdot \ln(t) + 0.2168 \cdot \ln(S_{пр}) \cdot \ln(t)} \\ V_{кр} = \text{const} \end{array} \right.$$

где B_c – полная себестоимость одной минуты станка и станочника, руб.; $S_{пр}$ – подача стола в продольном направлении, мм/мин.; $S_{р.х.}$ – длина

рабочего хода $S_{р.х.} = B_k - \delta$, мм.; δ – величина перекрытия круга, мм; B_k – ширина круга, мм; $V_{поп}$ – скорость перемещения заготовки в поперечном направлении, мм/мин.; Δ – припуск, мм.;

t – глубина резания, мм; $B_{ш}$ – ширина шлифования, мм; $V_{кр}$ – скорость круга, м/мин.

Следует отметить, что модель шероховатости была получена при использовании шлифовального круга шириной 40мм, абразивный материал – электрокорунд белый марки 25А, скорость круга 35м/с [9].

От выбранного метода оптимизации параметров процесса механического съема припуска зависит точность получаемых результатов и скорость выполнения вычислений, поэтому предварительно, стоит выполнить краткий анализ основных характеристик, используемых металлообработке, методов оптимизации.

Не требующие больших ресурсов ЭВМ симплекс методы линейного программирования имеет существенный недостаток: пересчет всех коэффициентов и свободных членов полной системы уравнений, обусловленный тем, что формулы симплекс-метода предусматривают вычисление всех искомым коэффициентов на i -м шаге по данным k -го шага; оптимальный план, найденный обычным симплекс-методом, как правило, не является целочисленным. Разработаны более эффективные алгоритмы, в отличие от обычного симплекс-метода. Система неравенств, решаемая симплекс-методом дает лишь приближенное решение. Качество получаемого решения зависит правильности подбора коэффициентов и разумно составленных ограничений.

Для решения системы уравнений, описывающих рассматриваемый процесс симплекс-методом [7], совместно решаются все возможные пары неравенств. Любое из ограничений описывает линию на плоскости. Параллельное решение системы из двух таких уравнений дает точку пересечения этих двух линий, следовательно, получают точки всех вершин области оптимальных решений. Из полученного множества точек, удовлетворяющих всем ограничениям выбирается точка, которая соответствует минимуму целевой функции.

Численные методы решения с помощью градиента, сводящиеся к нахождению экстремума функции, называемые градиентными методами, широко применяют при решении задач оптимизации.

Градиентные методы оптимизации отличаются глобальной сходимостью и относительной простотой вычислений, т.е. слабыми требованиями к исходным данным, точка X_0 может быть далека от X_{opt} , а так же слабые требования к $f(x)$ нужна только $f'(x)$, но имеют медленную скорость сходимости [10].

Метод штрафных функций относят к группе непрямых методов решения задач нелинейного

программирования. Он преобразует задачу с ограничениями в последовательность задач безусловной оптимизации некоторых вспомогательных функций. Путем преобразование целевой функции с помощью функций-ограничений получают вспомогательные функции, чтобы в явном виде ограничения не фигурировали, в свою очередь, обеспечивая возможность применения методов безусловной оптимизации [4].

Метод штрафных функций отличается тем, что задача безусловной оптимизации решается в том же пространстве что и исходная. Штрафная функция не является существенно сложнее функции, а также задача сводится к задаче безусловной оптимизации и метод может использоваться для задач смешанного типа. К недостаткам этого метода можно отнести то, что задачу необходимо решать многократно при разных штрафных коэффициентах и решением задачи всегда будет точка, не принадлежащая области допустимых решений задачи, если решение исходной задачи находится на границе допустимой области [6].

Метод деформируемого многогранника или метод Нелдера–Мида [11] является методом безусловной оптимизации функции от нескольких переменных, не использующий производной (градиентов) функции и поэтому легко применим к негладким функциям.

К достоинствам метода можно отнести простоту, которая обуславливается малым набором заранее установленных параметров, простоту плана поиска, вычисление только значений функции и небольшой объём требуемой памяти. Но метод работает эффективно при $N \leq 6$, а алгоритм основан на циклическом движении по координатам, что может привести к вырождению алгоритма в бесконечную последовательность исследующих поисков без поиска по образцу.

Существует метод с использованием формы Бернштейна [12, 13] или полиномиальный подход Бернштейна, при записи многочлена в базе Бернштейна область полинома становится ограниченной значениями минимального и максимального коэффициентов Бернштейна, а используя свойства многочленов Бернштейна, можно получить тесные включения для области значений полинома на данной области [14].

Основная особенность этого подхода к вычислениям диапазона – границы на глобальных оптимумах гарантированы. Подход Бернштейна не требует первоначальных предположений для начала оптимизации, а только поле начального поиска, ограничивающего интересующую область. Если присутствуют множественные решения, то гарантируется получение всех реше-

ний. Без предварительного знания неподвижных точек глобальный оптимум может быть найден с заданной точностью, с учетом точности машины. Подход Бернштейна имеет дополнительное преимущество, заключающееся в отсутствии необходимости сброса каких-либо значений параметра настройки или каких-либо «релаксаций».

Графическим методом или методом дискретного программирования так же может решаться система уравнений, описывающая рассматриваемый процесс [5]. Этот метод применим только при сведении нелинейной задачи к линейной за счет линеаризации целевой функции и ограничений. Для этого логарифмируют правые и левые части целевой функции и ограничений, затем определяют область допустимых решений (область поиска оптимального решения) образованную линиями ограничений, эти линии образуют многоугольник, одна из вершин которого и является оптимальным решением. При наличии большого числа ограничений область допустимых решений может иметь множество вершин, поэтому поиск оптимального решения производят с помощью градиентного метода или «нежесткого спуска» [4]. Определив координаты оптимального решения, необходимо

произвести раскодирование целевой функции и вычислить оптимальные параметры режимов резания.

Перед выполнением оптимизации следует проанализировать функции, входящие в систему уравнений оптимизации в виде графиков поверхностей функций себестоимости и шероховатости поверхности от f_s и t , которые представлены на показаны на (рис. 1) и (рис. 2).

На графиках (рис.1 и рис.2) видно, что целевая функция рассматриваемой системы оптимизации не имеет экстремумов, а диапазон регулирования режимов резания имеет ограничения, следовательно, поставленную задачу можно решить с использованием метода дискретного программирования.

Этот метод заключается в переборе всех возможных комбинаций пар f_s и t из массивов $[f_s]$ и $[t]$. Оптимальной признается такая пара f_s и t , которая удовлетворяет всем ограничениям и дает минимальное значение целевой функции $Stex(f_s, t) = \min$. Для перебора возможных комбинаций пар авторами используется программный комплекс scilab 5.5.2 [15]. Текст программы поиска оптимальных режимов шлифования приведен на рис. 3.

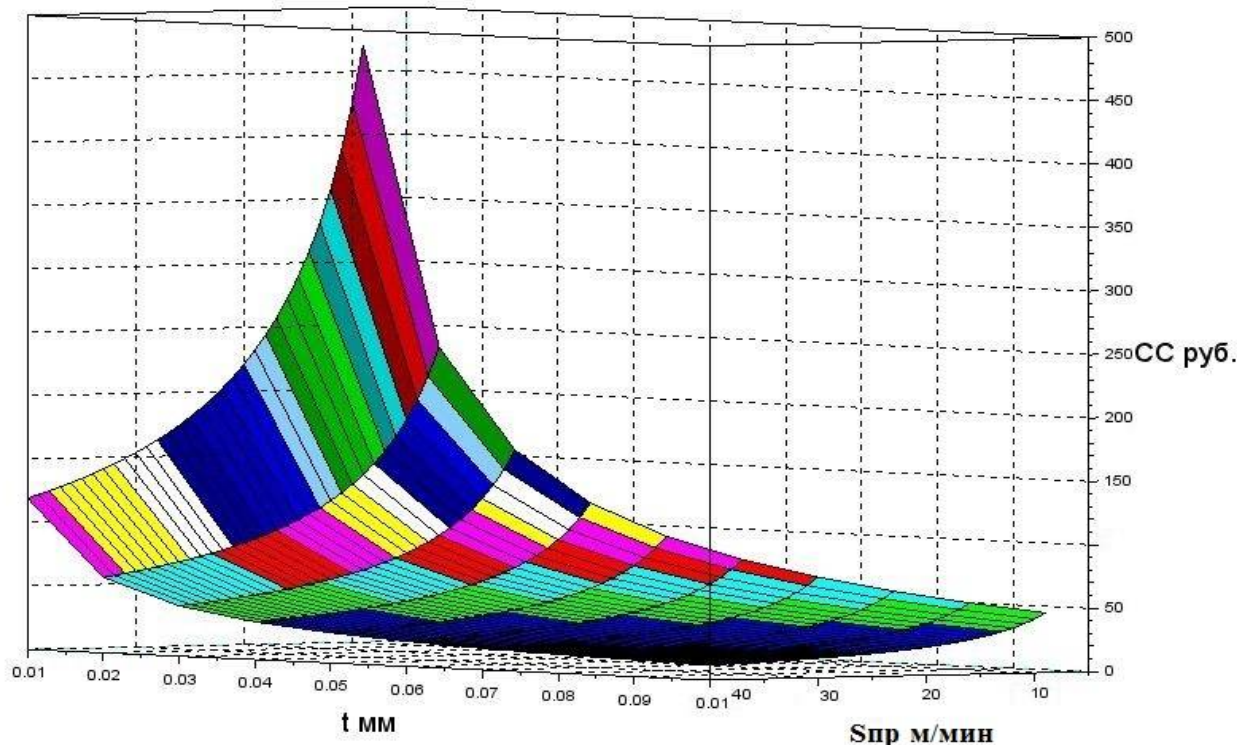


Рис. 1. Зависимость себестоимости операции шлифования от режимов резания

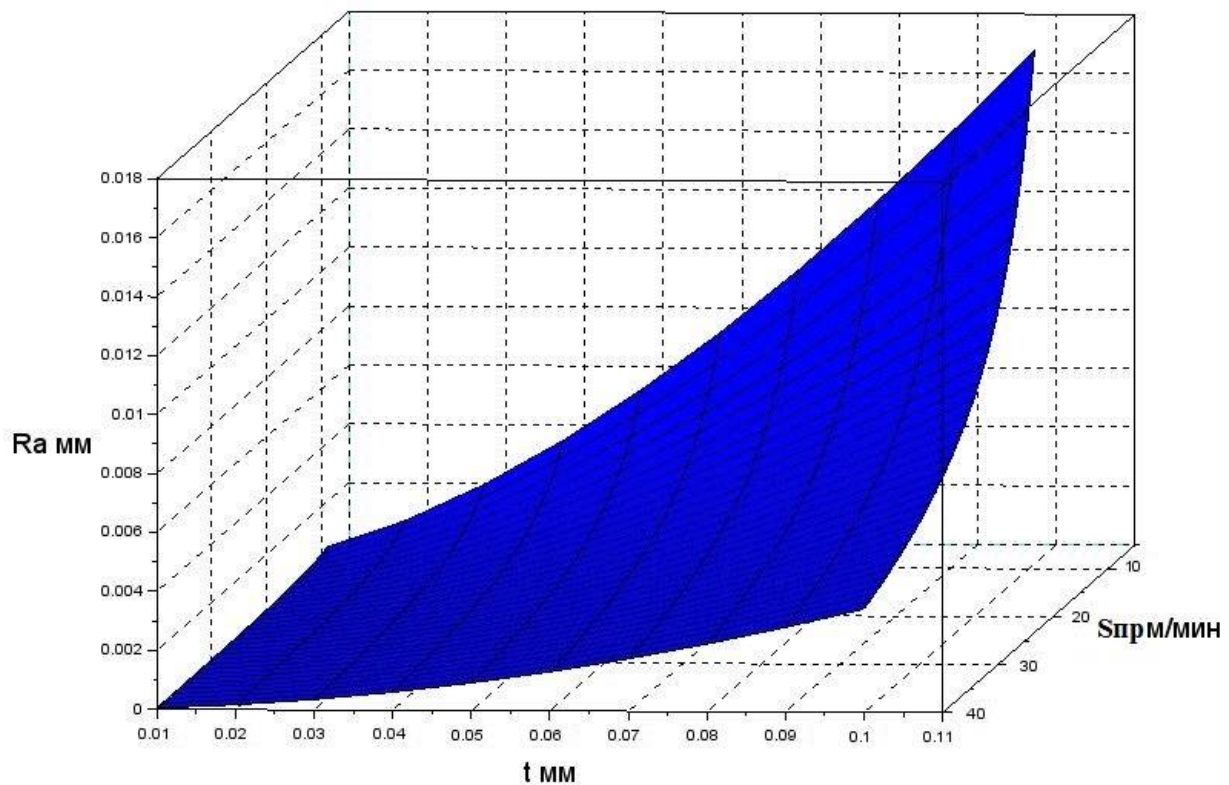


Рис. 2. Зависимость функции шероховатости при шлифовании от режимов резания

```

1 Bs=6.8; L=0.2;Bk=0.04;d=0.002;Bsh=0.08;D=1;Vpop=45;
2 X=9:1:40;
3 Y=0.01:0.01:0.1
4 for i=1:size(X,2);
5     for j=1:size(Y,2);
6         CC(i,j)=Bs*(L/X(i)+(Bk-d)/Vpop)*D/Y(j)*int(Bsh/(Bk-d)+1);
7     end
8     if i==1 & j==1 then
9         CC_o=CC(i,j)
10        elseif exp(3.3766-0.0773*log(X(i))+1.0992*log(Y(j))+0.2168*log(X(i))*log(Y(j)))<=0.0008 then
11            if CC(i,j)<CC_o then
12                CC_o=CC(i,j)
13                Ra=exp(3.3766-0.0773*log(X(i))+1.0992*log(Y(j))+0.2168*log(X(i))*log(Y(j)))
14            end
15            S_o=X(i)
16            t_o=Y(j)
17        end
18    end
19 end;
20 end;
21 end
22 print(%io(2),CC_o,S_o,t_o,Ra)
23

```

Рис. 3. Текст программы оптимизации режимов шлифовании металлополимера по критерию минимальной технологической себестоимости методом перебора

Значения расчетных режимов резания и минимальной технологической себестоимости приведены на (рис. 4).

```

Ra =
    0.0006152
t_o =
    0.04
S_o =
    40.
CC_o =
    47.056
-->

```

Рис. 4. Расчетные режимы резания и минимальная технологическая себестоимость

На основании результатов соотношений оптимальных значений [16] авторами построены номограммы шероховатости металлополимерной поверхности от параметров продольной подачи стола и глубины шлифования, для того чтобы расширить область решаемой задачи по назначению режимов шлифования обеспечивающих заданную шероховатость поверхности металлополимерных изделий (рис. 5).

Увеличение продольной подачи стола, как и уменьшение глубины резания при плоском шлифовании периферией круга ведет к уменьшению шероховатости поверхности, согласно (рис. 5).

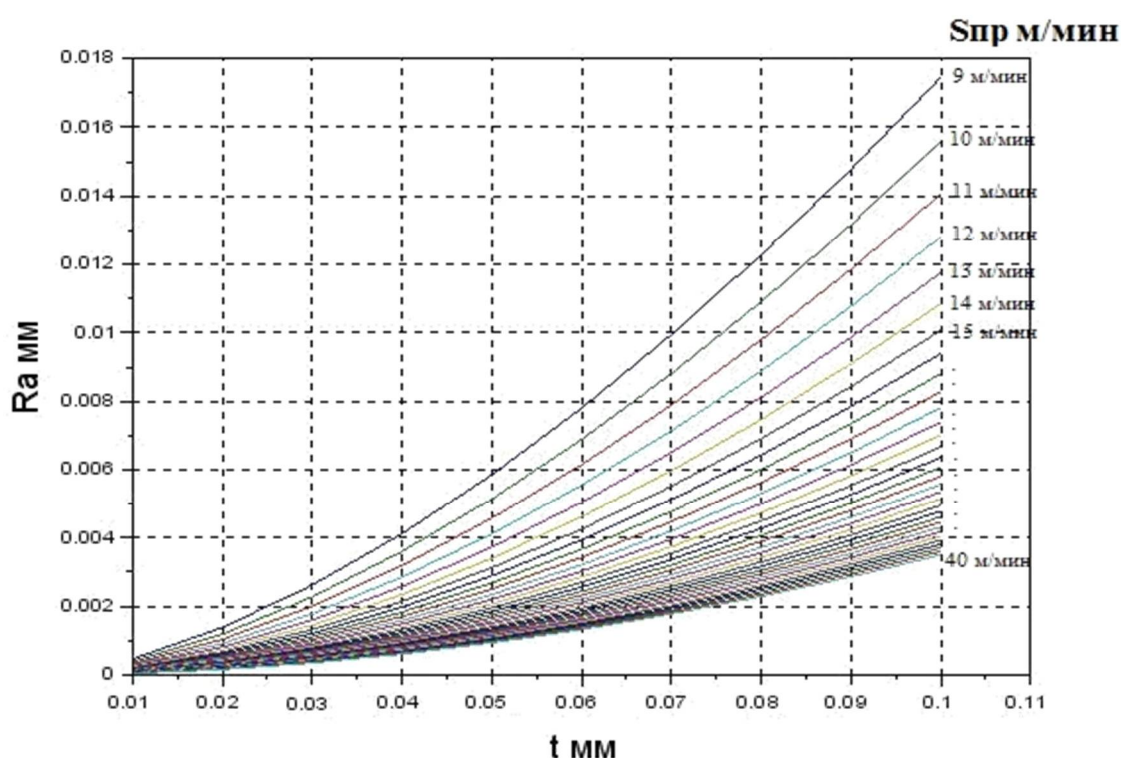


Рис. 5. Номограммы шероховатости металлополимерной поверхности

Традиционным средством решения задач является применение компьютера для итеративного поиска оптимальных значений f_s и t . Данный метод не требует дополнительных процедур для линеаризации, а в отличие от предыдущих методов, может находить оптимальные режимы резания и при переменных коэффициентах в формулах ограничений.

Таким образом, результаты исследования позволили выявить оптимальные режимы резания при шлифовании металлополимерной поверхности смыкания формообразующих деталей пресс-форм по критерию минимальной себестоимости. Полученные номограммы для назначенных режимов резания при шлифовании металлополимерных поверхностей имеют практиче-

скую ценность для проектирования процесса механической обработки металлополимеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Першин Н.С., Чепчуров М.С. Использование металлополимеров в пресс-формах для литья пластмасс // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2015. № 4. С. 86–90.
2. Махов А.А. Оптимизация в машиностроении. Методические рекомендации для самостоятельной работы студентов по дисциплине «АСТП». МГТУ «СТАНКИН», ЕТИ. Егорьевск, 2008. 48 с.

3. Безъязычный В.Ф. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2013. 568 с.
4. Кроль О.С., Хмеловский Г.Л. Оптимизация и управление процессом резания: Учебное пособие. К: УМК ВО, 1991. 140 с.
5. Першин Н.С., Чепчуров М.С. Изготовление формообразующих деталей персс-форм из композиционных материалов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2015. №6. С. 76–81
6. Безъязычный В.Ф., Аверьянов И.Н., Кордюков А.В. Расчет режимов резания. Учебное пособие. Рыбинск: РГАТА, 2009. 185 с.
7. Скуратов Д.Л., Трусов В.Н., Ласточкин Д.А. Оптимизация технологических процессов в машиностроении: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. 87 с.
8. Грубый С.В. Методы оптимизации режимных параметров лезвийной обработки: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 96 с.
9. Любимый Н.С., Чепчуров М.С., Аверченкова Е.Э. Обеспечение требуемой шероховатости поверхности изделий из металлополимера наполненного алюминием при обработке шлифованием // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. №1. С. 162–169.
10. Безъязычный В.Ф., Кожина Т. Д., Константинов А. В., Непомилуев В. В. Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей. Москва: Изд-во МАИ, 1993. 182 с.
11. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // *Comp. J.* 1964. V. 7. № 4. P. 308.
12. Nataraj P.S.V., Arounassalame M. A new subdivision algorithm for the Bernstein polynomial approach to global optimization // *International Journal of Automation and Computing* 4 (4). 342–352.
13. Nataraj P.S.V., Arounassalame M. A new subdivision algorithm for the Bernstein polynomial approach to global optimization // *International Journal of Automation and Computing*. 4 (4). 342–352.
14. Gupta A., Bhartiya S., Nataraj P.S.V. A novel approach to multiparametric quadratic programming // *Automatica*. 47 (9). 2112-2117
15. Андриевский А.Б., Андриевский Б.Р., Капитонов А.А., Фрадков А.Л. Решение инженерных задач в SCILAB. Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 97 с.
16. https://atoms.scilab.org/toolboxes/Global_Optim_toolbox [Электронный ресурс].

Minasova V.E., Lubimyi N.S., Chepchurov M.S.

OPTIMIZATION OF GRINDING PARAMETERS OF METAL-POLYMER SURFACE OF CLAMPING OF MOULDS' SHAPE-FORMING PARTS

Nowadays machine building companies frequently use composite materials such as metal-polymers for production of parts, for equipment and repair. The research has shown that the use of a metal-polymer as a material of a shape-forming part of a mould can significantly reduce production cost of the equipment for plastic injection. The paper reviews issues connected with optimization of grinding parameters of metal-polymer surface of a product. The authors have presented an analysis of parametric optimization methods. The purpose of the work is to solve a problem of cutting modes setting at the grinding process of metal-polymer surface of clamping of moulds' shape-forming parts.

Key words: optimization, grinding, metal-polymer, method, parameter, production cost.

Минасова Виктория Евгеньевна, аспирант, ведущий инженер кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: vika314TM@yandex.ru

Любимый Николай Сергеевич, аспирант кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: pershin26@yandex.ru

Чепчуров Михаил Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: avtpost@mail.ru