

DOI: 10.12737/23799

*Любимый Н.С., аспирант,
Чепчуров М.С., д-р техн. наук, проф.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Аверченкова Е.Э., канд. техн. наук, доц.
Брянский государственный технический университет*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРА НАПОЛНЕННОГО АЛЮМИНИЕМ ПРИ ОБРАБОТКЕ ШЛИФОВАНИЕМ*

pershin26@yandex.ru

В настоящее время машиностроительные предприятия все чаще используют новые композиционные материалы для производства деталей, оснастки и ремонта. Одним из таких композиционных материалов является металлополимерный состав с алюминиевым наполнителем. В общем случае он представляет собой эпоксидно-диеновую матрицу наполненную алюминиевым наполнителем. Благодаря своим свойствам текучести в неотвержденном состоянии и твердости и термостойкости в отвержденном, этот материал находит все большее применение в производстве. Ранее проведенные исследования показали возможность использования металлополимерного материала в качестве материала формообразующей детали пресс-формы, так как это значительно снижает стоимость оснастки для литья пластиков. В отличие от сталей режимы механической обработки металлополимера малоизучены, так как материал новый и пока ещё только находит области своего применения. Однако при изготовлении из него формообразующей оснастки пресс-форм, требуется назначать такие технологические операции и режимы обработки, которые позволят получить нужную размерную точность и шероховатость детали. Для обеспечения заданного параметра шероховатости поверхности металлополимерной детали при обработке шлифованием была найдена модель шероховатости поверхности от параметра скорости движения стола и глубины резания.

Ключевые слова: шероховатость, металлополимер, пресс-форма, плоское шлифование, литье пластиков, модель.

Введение. Современный мир и конкуренция ставит перед промышленностью цель – создание гибких технологий, обеспечивающих минимальную себестоимость получения изделий. Стремительное развитие науки и техники, создание композиционных материалов [1], в свою очередь позволяет сегодняшнему машиностроению находить более эффективные и дешевые способы и технологии производства различных деталей, машин и агрегатов. На сегодняшний день применение металлополимерных материалов нашло свое применение не только в качестве ремонтных составов, но и как конструкционных материалов для изготовления деталей машин. Ранее в своих работах авторы доказали возможность изготовления формообразующих деталей пресс-форм из металлополимерного материала [2] для мелкосерийного литья пластиков. Такой способ изготовления позволяет значительно снизить стоимость изготовления оснастки и как следствие стоимость получаемых в ней изделий.

Согласно ГОСТ 27358-87 шероховатость опорных плоскостей разъема пресс-формы должна соответствовать значению Ra 0,80 мкм, а допуск плоскостности опорных плоскостей плит, плоскостей разъема пресс-форм должен

соответствовать 6-й степени точности по ГОСТ 24643, такие качественные характеристики деталей достигаются операцией шлифования на заключительных этапах обработки. Физические процессы при шлифовании, технология шлифования и её оптимизация при обработке стальных изделий описаны в работах В.А. Сипайлова, С.С. Силина, С.Н. Корчака, Л.Н. Филимонова [3, 4, 5, 6]. Обширная работа, проведенная этими учеными касается процессов обработки шлифованием изделий из металлов, но применение имеющихся закономерностей в плане назначения оптимальных режимов шлифования для обработки металлополимерных деталей не будет являться справедливой, так как структура, химические и физико-механические свойства металлополимера отличаются от сталей и сплавов с железом. Отсутствие закономерностей для назначения режимов шлифования металлополимерных деталей пресс-форм не позволяет произвести обработку металлополимерной поверхности смыкания пресс-формы с учетом требуемой шероховатости. Назначение режимов шлифования для обеспечения требуемого качества поверхности [7], в частности шероховатости поверхности, требует нахождения модели процесса шлифования. Так как металлополимерная ком-

позиция при изготовлении деталей пресс-форм используется в качестве материала формообразующей плиты. Заключительной операцией механической обработки является шлифование опорных плоскостей разъема пресс-формы, поэтому необходимо определить параметры скорости перемещения стола $V_{ст}$ и глубины резания t при которых шероховатость поверхности будет соответствовать значению $Ra=0,8$ мкм.

Получение требуемых параметров шероховатости поверхности при обработке плоским шлифованием периферией круга так же необходимо в процессе восстановления при ремонте деталей машин с использованием металлополимера [8].

Методология. Для получения зависимости шероховатости поверхности металлополимерного изделия при плоском шлифовании использовался трехфакторный плановый эксперимент.

Обработка результатов эксперимента производилась с использованием лицензионного программного пакета *PlanExp B-D13 v.1.0*.

Подготовка образцов для проведения экспериментальных работ производилась с учетом ранее полученных научных результатов из металлополимера наполненного алюминием [9]. Для снятия измерений использовался поверенный измерительный инструмент.

Для анализа полученной модели использовался математический программный продукт *PTC MathCad Prime 3.1*.

Основная часть. При исследовании технологического процесса шлифования металлополимерной детали пресс-формы авторы использовали методику с построением планового эксперимента описанного в [10], в частности трехфакторный плановый эксперимент. В качестве изменяемых параметров были выбраны скорость перемещения стола, глубина резания и ширина шлифовального круга.

Металлополимерные образцы были подготовлены с учетом ранее проведенных исследований, описанных в [11], так как режимы отверждения металлополимерной композиции существенно влияют на физико-механические свойства отвержденного металлополимерного материала и как следствие на результаты эксперимента. Шлифование образцов производилось на плоскошлифовальном станке 3Б722. Так как станок имеет бесступенчатую регулировку скорости перемещения стола, для получения верхнего, нижнего и основного численных значений фактора скорости перемещения стола был произведен замер его скорости перемещения. Были нанесены контрольные риски на рукоятке дроссельного управления скоростью перемещения стола для трех скоростей, отмечена контрольная риска на кожухе и размечен стол с ценой деления 0,1 м. Далее с использованием цифровой камеры была произведена запись движения перемещения стола на трех скоростях и произведен пересчет численного значения скорости перемещения стола в м/мин. На (рис. 1) показана разметка для вычисления значения скорости перемещения стола.

Для анализа полученной модели использовался математический программный продукт *PTC MathCad Prime 3.1*.



Рис. 1. Разметка оборудования для численного определения значения скорости перемещения стола; а – на кожухе и столе станка; б – на рукоятке дроссельного управления скоростью перемещения стола

В таблице 1 приведены численные параметры для расчета и полученное значение скорости

перемещения стола на трех скоростях *max*, *min* и средней.

Таблица 1

Параметры для расчета величины скорости перемещения стола и её рассчитанное значение

Положение рукоятки	Время прохождения дистанции 0,5м, мин.	Значение скорости перемещения стола, м/мин
<i>Min</i>	0,05561	8,991
Средняя	0,02722	18,369
<i>Max</i>	0,01798	27,809

Следует отметить, что паспортный диапазон регулировки скорости перемещения стола находится в пределах от 2 до 40 м/мин.

Измерение значений шероховатости поверхности металлополимерного образца после шлифования производилось профилометром TIME TR110. Процесс измерения показан на (рис. 2).

При шлифовании использовалось 3 круга ГОСТ 2424-83 диаметром 450 мм и шириной 32 мм, 40 мм и 50 мм, из материала 25А. Скорость круга 35 м/с.

По условиям эксперимента на шероховатость поверхности металлополимерного образца оказывает влияние скорость перемещения стола $V_{ст}$, м/мин, ширина круга B мм. и глубина резания t мм. Количество повторных опытов при постановке экспериментов определялось с учетом рекомендаций [12].

Для упрощения расчетов использовалась коммерческая лицензионная программа PlanExp B-D13 v.1.0. Архитектура программы описана в [13]. Рабочая область окна программы показана на (рис. 3).



Рис. 2. Измерение шероховатости металлополимерного образца профилометром TR110

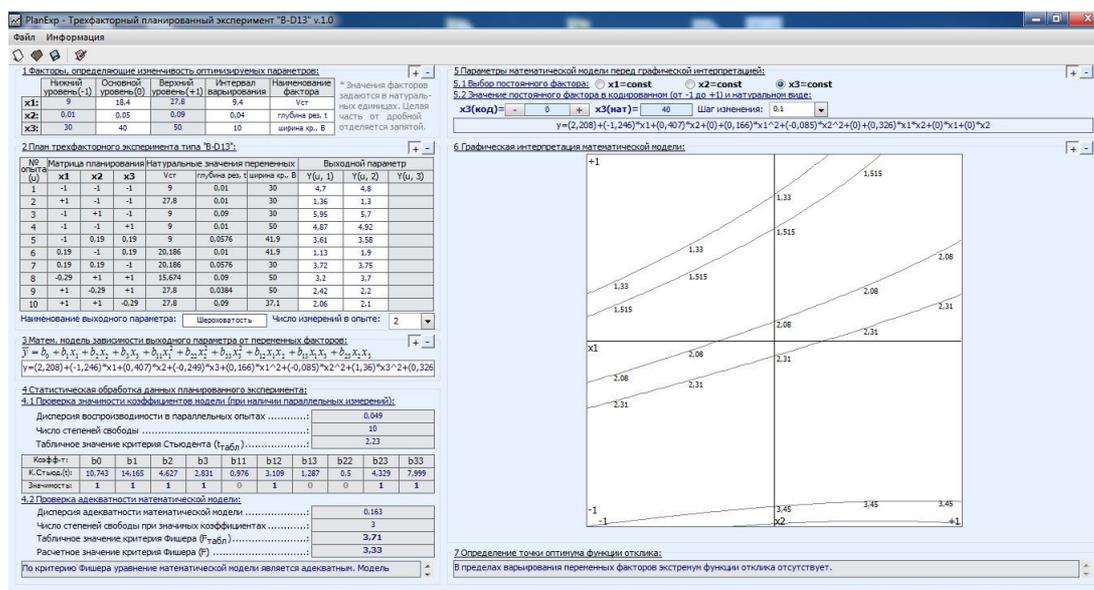


Рис. 3. Рабочее окно программы PlanExp B-D13 v.1.0

Программа позволяет оценить полином следующего вида (1)

$$\bar{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (1)$$

В разделе 1 программы заносятся факторы определяющие изменчивость оптимизируемых параметров, факторы и интервалы их варьирования показаны в табл. 2.

Таблица 2

Факторы и интервалы их варьирования

	Нижний уровень (-1)	Основной уровень (0)	Верхний уровень (+1)	Интервал варьирования	Наименование фактора
x1:	9	18,4	27,8	9,4	Скорость перемещения стола
x2:	0,01	0,05	0,09	0,04	глубина резания
x3:	30	40	50	10	ширина круга

В разделе 2 используемой программы описан план эксперимента типа *B-D13* и выходные

параметры опытов, соответствующие значения показаны в табл. 3.

Таблица 3

План эксперимента и выходные параметры опытов

Номер опыта (u)	Матрица планирования			Натуральные значения переменных			Выходной параметр (Шероховатость)		
	x1	x2	x2	Скорость перемещения стола	глубина рез	ширина кр	y(u, 1)	y(u, 2)	y(u, 3)
1	-1	-1	-1	9	0,01	30	4,7	4,8	
2	+1	-1	-1	27,8	0,01	30	1,36	1,3	
3	-1	+1	-1	9	0,09	30	5,95	5,7	
4	-1	-1	+1	9	0,01	50	4,87	4,92	
5	-1	0,19	0,19	9	0,0576	41,9	3,61	3,58	
6	0,19	-1	0,19	20,186	0,01	41,9	1,13	1,9	
7	0,19	0,19	-1	20,186	0,0576	30	3,72	3,75	
8	-0,29	+1	+1	15,674	0,09	50	3,2	3,7	
9	+1	-0,29	+1	27,8	0,0384	50	2,42	2,2	
10	+1	+1	-0,29	27,8	0,09	37,1	2,06	2,1	

Программа автоматически вычисляет значения коэффициентов уравнения математиче-

ской модели. Значения коэффициентов показаны в табл. 4.

Таблица 4

Коэффициенты уравнения математической модели

b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₁	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₂	b ₂₃	b ₃₃
2,208	-1,246	0,407	-0,249	0,166	0,326	0,135	-0,085	-0,454	1,36

Рассчитанная математическая модель зависимости шероховатости поверхности при плоском шлифовании металлополимерного материа-

ла с алюминиевым наполнителем от переменных факторов выглядит следующим образом (2)

$$y = 2,208 - 1,246 * x_1 + 0,407 * x_2 - 0,249 * x_3 + 0,326 * x_1 x_2 + 0,135 * x_1 x_3 - 0,454 * x_2 x_3 + 0,166 * x_1^2 - 0,085 * x_2^2 + 1,36 * x_3^2 \quad (2)$$

Так как в ходе эксперимента производилось параллельное измерение в каждом опыте в количестве двух измерений, существует возможность статистической обработки данных планового эксперимента.

Для оценки значимости коэффициентов необходимо сравнить расчетный коэффициент

Стьюдента t с табличным $t_{\text{табл}}$. В поставленном опыте дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах равна 0,049, число степеней свободы 10, а табличное значение критерия Стьюдента $t_{\text{табл}}=2,23$. Расчетные значения критерия Стьюдента для каждого коэффициента показаны в табл. 5.

Таблица 5

Критерии Стьюдента и значимость коэффициентов модели (1/0 – значимый / незначимый)

	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₁	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₂	b ₂₃	b ₃₃
t-критерий	10,743	14,165	4,627	2,831	0,976	3,109	1,287	0,5	4,329	7,999
Значимость	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1

Из таблицы видно, что незначимыми для полученной модели являются коэффициенты b_{11} , b_{13} , b_{22} .

Проверка адекватности математической модели производится по критерию Фишера, при этом дисперсия адекватности математической модели равняется 0,163, а число степеней свободы при значимых коэффициентах 3. Табличное значение критерия Фишера равняется $F_{\text{табл}}=3,71$, что больше расчетного $F=3,33$, а это значит, что по критерию Фишера уравнение математической модели является адекватным. Модель мо-

жет быть применима для решения производственных задач.

Программный продукт *PlanExp B-D13 v.1.0*, позволяет не только определить математическую модель, но и вычислить математическую модель при фиксировании одного из переменных факторов.

Вычислим математическую модель шероховатости поверхности металлополимера с алюминиевым наполнителем при плоском шлифовании кругом шириной 40мм., так как такой круг наиболее часто используется в производстве. Так для круга шириной $B=40$ мм, матема-

тическая модель будет выглядеть следующим образом (3)

$$y = 2,208 - 1,246 * x_1 + 0,407 * x_2 + 0,326 * x_1 x_2 + 0,166 * x_1^2 - 0,085 * x_2^2 \quad (3)$$

Исключив незначимые коэффициенты модель примет вид (4)

$$y = 2,208 - 1,246 * x_1 + 0,407 * x_2 + 0,326 * x_1 x_2 \quad (4)$$

В расчете факторного плана значения уровней входных факторов принимаются в кодированном виде. Пересчет заданных натуральных значений факторов производится путем линейной интерполяции значений по формуле (5)

$$x_i = \frac{X_i - x_{0i}}{\Delta X_i} \quad (5)$$

где x_i – значение i -го фактора в кодированном виде; X_i – значение i -го фактора в натуральном виде; ΔX_i – интервал варьирования i -го фактора;

$$Ra(V_{ст}, t) = 2,208 - 1,246 * \left(\frac{V_{ст} - 18,4}{27,8 - 9} \right) + 0,407 * \left(\frac{t - 0,05}{0,09 - 0,01} \right) + 0,326 * \left(\frac{V_{ст} - 18,4}{27,8 - 9} \right) * \left(\frac{t - 0,05}{0,09 - 0,01} \right) \quad (6)$$

Получив математическую модель зависимости шероховатости поверхности металлополимера от глубины резания и скорости перемещения стола при плоском шлифовании (6), зададим интервал варьирования скорости перемещения

x_{0i} – натуральное значение основного уровня i -го фактора.

Заменяя кодированные значения уровней входных факторов значениями в соответствии с выражением (5), имеем следующую математическую модель шероховатости поверхности металлополимера с алюминиевым наполнителем при плоском шлифовании кругом шириной 40мм. (6)

стола $V_{ст} = 2..40$ м/мин. и глубины резания $t = 0,01..1$ мм. Построим графическую интерпретацию математической модели (рис. 4.), используя математический пакет *PTC MathCad Prime 3.1*.

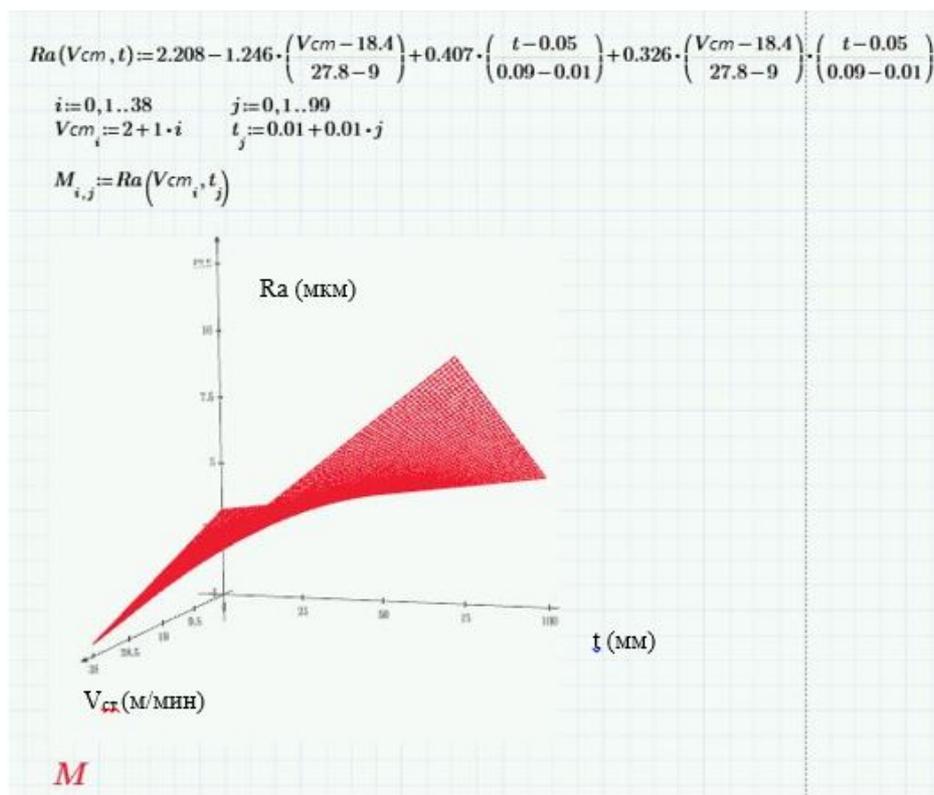
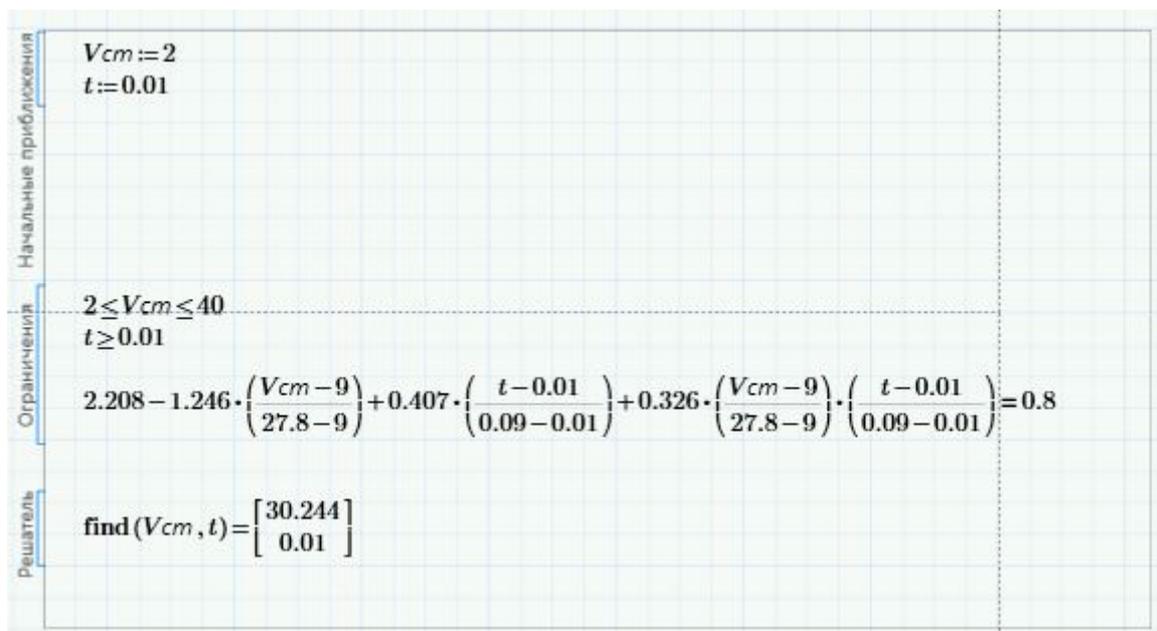


Рис. 4. Графическая интерпретация математической модели шероховатости

Используя блок решения и функцию **find** [14] в PTC MathCad Prime 3.1 вычислим значения скорости перемещения стола и глубины резания при которых шероховатость поверхности металлополимерной детали будет равна 0,8 мкм. Зададим начальные приближения для каждого

параметра $V_{ст} = 2$, $t = 0,01$. Запишем уравнение, ограничения и функцию нахождения корней системы. Область листа PTC MathCad Prime 3.1 с введенным блоком решения изображена на (рис. 5).

Рис. 5. Вычисление значений переменных модели для $Ra=0,8$ мкм

Из (рис. 5) видно, что расчетные значения скорости перемещения стола и глубины резания для $Ra=0,8$ мкм, равны $V_{ст}=30,244$ м/мин и $t=0,01$ мм. Анализ графика (рис. 4), также показывает, что уравнение имеет 1 значение для каждого искомого параметра, удовлетворяющее заданному значению шероховатости.

При обработке конструкционных, углеродистых и легированных сталей с твердостью HRC до 30, для достижения параметра шероховатости не выше $Ra=0,8$ мкм, согласно [15] рекомендуется использовать следующие режимы резания: скорость круга $V_{кр}=35$ м/с; Припуск на обработку $\Delta=0,3..0,35$ мм; поперечная подача для круга 40 мм $S_{поп}=10$ мм/ход стола; скорость перемещения стола $V_{ст}=8$ м/мин; глубина резания $t=0,073$.

Сравнивая полученное значение параметра скорости перемещения стола для металлополимера и рекомендованное в справочной литературе для легированной стали, можно сделать вывод, что производительность обработки металлополимерной детали несколько ниже чем детали выполненной из легированной стали из-за малой глубины резания. Так для шлифования металлической заготовки длиной 300 мм, шириной 35 мм и припуском на мех. обработку 0,3 мм, требуется 11,25 с. технологического времени, а для обработки металлополимерной заготовки 18 с.

Выводы. Полученная модель шероховатости металлополимерной поверхности при плоском шлифовании периферией круга может быть использована для назначения режимов резания: скорости перемещения стола и глубины резания, при обеспечении требуемой шероховатости по-

верхности. В частности при плоском шлифовании опорной плоскости разъема металлополимерной детали пресс-формы, шероховатость которой по ГОСТ 27358-87 должна быть Ra 0,8 мкм, глубина резания $t=0,01$ мм, а $V_{ст}=30,244$ м/мин.

Сравнение параметров обработки шлифованием детали из металлополимера и легированной стали при достижении требуемого значения шероховатости, показали, что обработка опорной плоскости разъема детали из металлополимера на 6,75 с дольше, чем аналогичной детали из легированной стали. Увеличение технологического времени на обработку металлополимерной детали существенно не повлияет на себестоимость получаемой детали пресс-формы, так как пресс-форма является штучным изделием. Значительное снижение стоимости изготовления пресс-формы с применением металлополимера многократно превышает увеличение стоимости в связи с увеличением технологического времени шлифования опорной плоскости разъема.

Полученные в ходе исследования результаты могут быть применены на предприятиях занимающихся переработкой пластмасс и инструментальных производствах при подготовке технологической документации на изделия, изготавливаемые из металлополимера с алюминиевым наполнителем. Полученная модель также может быть применена при назначении режимов обработки при плоском шлифовании деталей, поверхности которых были восстановлены с использованием металлополимерной композиции.

**Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-*

технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по Соглашению от 27 октября 2015 г. № 14.577.21.0193 «Разработка роботизированного комплекса для реализации полномасштабных аддитивных технологий инновационных материалов, композитов, конструкций и сооружений».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др.; под ред. А.А. Берлина. СПб: Профессия, 2008. С. 560.
2. Першин Н.С., Чепчуров М.С. Изготовление формообразующих деталей прессформ из композиционных материалов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2015. № 6. С. 76–81.
3. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 164 с.
4. Силин С.С., Леонов Б.Н., Хрульков В.А. [и др.]. Оптимизация технологии глубинного шлифования. М.: Машиностроение, 1989. 120 с.
5. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение, 1974. 280 с.
6. Филимонов Л.Н. Плоское шлифование. Л.: Машиностроение, 1985. 108 с.
7. Бихлер М. Детали из пластмасс – отливать без дефектов. Гейдельберг: Цехнер, Шпейер. 1999. С. 112.
8. Ефремов В.В., Кутовой С.С., Агошков А.В. Результаты экспериментального исследования по управлению показателями качества восстановленной поверхности деталей при шлифовании // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 9. С. 131–136.
9. Металлополимеры «ЛЕО». М.: Изд. «ЗАО Металлополимерные материалы ЛЕО», 2013 С. 33.
10. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
11. Любимый Н.С., Чепчуров М.С. Влияние применения вакуумирования при отверждении металлополимера на его теплопроводность / Междисциплинарные подходы в материаловедении и технологии. Теория и практика: сборник трудов всероссийского совещания заведующих кафедрами материаловедения и технологии материалов // Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С 7–14.
12. Бойко А.Ф., Кудеников Е.Ю. Точный метод расчета необходимого количества повторных опытов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 8. С. 128–132.
13. Белов В.В., Образцов И.В., Курятников Ю.Ю. Разработка программно-алгоритмического средства обработки данных трехфакторного планированного эксперимента для расчета математической модели прочности бетона // Программные продукты и системы. 2014. №108. С. 254–259.
14. Очков В.Ф. Mathcad 7 Pro для студентов и инженеров. М.: КомпьютерПресс, 1998. 384 с.
15. Дальский А.М., Суслов А.Г., Косилова А.Г., Мящерилов Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2. М.: Машиностроение, 2003. 944 с.

Lubimyi N.S., Chepchurov M.S., Averchenkova E.E.

PROVIDE THE REQUIRED SURFACE ROUGHNESS PRODUCTS FROM METALLOPOLYMERS FILLED WITH ALUMINUM AT PROCESSING GRINDING

Currently, machine-building enterprises are increasingly using new composite materials for the production of parts, accessories and repair. One such material is a metallopolymeric composite structure with an aluminum filler. In general, it is an epoxy-dienoic filled with an aluminum matrix excipient. Owing to its flow properties in the uncured state, and hardness and heat resistance when cured, the material is increasingly used in the production. Previous studies have shown the use of metal-polymer material as the material forming the mold parts, as this significantly reduces the cost of equipment for molding plastics. Unlike steel machining modes metallopolymerinsufficiently studied, because the material is new, and as yet only finds its field of application. However, in the manufacture of it forming tooling molds required to appoint such process steps and processing modes, which will provide the required dimensional accuracy and surface roughness detail. For a given parameter surface roughness of a metallopolymeric in the processing of grinding was found model of the surface roughness of the parameter rate table movement and the depth of cut.

Key words: roughness, metallopolymer, the mold, surface grinding, molding plastics, simulator.

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

Аверченкова Елена Эдуардовна, кандидат технических наук, доцент кафедры экономики.
Брянский государственный технический университет.
Адрес: Россия, 241035, Брянск, ул. бул.50-лет Октября, д. 7.
E-mail: lena_ki@inbox.ru