

Несовпадения результатов сплайнового моделирования и экспериментов формирования параметров качества поверхностей при виброударном упрочнении без реверса составляют:  $\Delta R_{z_{\text{мод}}}^* = 29 \div 35 \%$ ,  $\Delta \sigma_{\text{мод}}^* = 15 \div 23 \%$ . При отсутствии кинематических связей между инструментальной средой, деталью и станком данные погрешности можно признать удовлетворительными. Компьютерное моделирование с учетом интегральных свойств инструментальной среды [2] имеет погрешность  $60 \div 100 \%$ . Имитационное моделирование без учета свойств инструментальной среды имеет погрешность —  $100 \div 200 \%$ .

Преимущество разработанного сплайнового моделирования заключается в том, что кроме осредненной оценки определяется распределение параметров качества на разных участках поверхностного слоя. Кроме параметров качества определяются координаты участков, в том числе с недостаточным упрочнением, что позволяет прогнозировать усталостную прочность и надежность деталей.

УДК 621.941.1:535.31

В. В. ЛАПШИН, Е. М. ЗАХАРЕВИЧ (ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ"), С. В. ГРУБЫЙ, д-р техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана), e-mail: grusv@yandex.ru

## Технология обработки линейных негативных матриц для линз и призм Френеля<sup>1</sup>

Рассмотрены конструктивные особенности линейных негативных матриц для изготовления линейных линз и призм Френеля и требования к оборудованию и режущему инструменту для обработки негативных матриц. Представлена технология изготовления матриц и результаты технологических испытаний.

**Ключевые слова:** алмазный резец, сверхточная обработка, негативная матрица, линза Френеля, призма Френеля.

The structural features of linear negative matrices for production of linear Fresnel lenses and prisms and the requirements to equipment and cutting tool for processing of negative matrices are considered. The manufacturing technology of matrices and the results of technological tests are presented.

**Keywords:** diamond cutter, ultra-precision processing, negative matrix, Fresnel lens, Fresnel prism.

### Назначение матриц

Сегодня в прецизионном приборостроении и машиностроении находят широкое применение прецизионные детали со структурированными поверх-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Соглашения № 14.579.21.0042 от 25.08.2014 (RFMEF157914X0042) между ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" и Министерством образования и науки РФ по теме "Разработка технологии и оборудования наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания".

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Копылов Ю. Р. Виброударное упрочнение: Монография. Воронеж: ВИМВД РФ, 1999. 386 с.
2. Копылов Ю. Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: Монография. Воронеж: ИПЦ "Научная книга", 2011. 569 с. (CD-ROM).
3. Шевцов С. Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах. Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2005. 194 с.
4. Св. № 2014617496 об офиц. регистрации программ для ЭВМ: VibroImpact 3D — моделирование процесса виброударного упрочнения.
5. Боресков А. В., Харламов А. А. Основы работы с технологией CUDA. М.: ДМК Пресс, 2010. 232 с.
6. Копылов Ю. Р., Попов А. А. К проблеме трехмерного моделирования процесса виброударного упрочнения // Тр. 7-й междунар. науч.-техн. конф. "Авиакосмические технологии. АКТ-06". Воронеж, 2006, С. 542—546.
7. Копылов Ю. Р. Особенности виброударного упрочнения длинномерных деталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 9. С. 17—19.

ностями, например матрицы для изготовления линейных линз и призм Френеля, которые используют в качестве увеличительных линз, коллиматорных линз, а также в качестве концентраторов солнечной энергии [1—3]. Они имеют две базовые конфигурации: линейную и круговую. Первые имеют параллельные канавки, в которых солнечный свет фокусируется в линию [4]. Такие линзы применяют в качестве концентраторов солнечной энергии в фотоэлектрических модулях солнечных батарей космических аппаратов. Применение оптических концентраторов позволяет сократить площадь солнечных элементов и увеличить срок службы батареи, так как концентраторы защищают солнечные элементы от воздействия космической радиации.

В Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН разработан способ изготовления линз Френеля для концентраторного фотоэлектрического модуля [5], который заключается в изготовлении негативной матрицы и снятии с нее позитивных копий линейной линзы Френеля. Негативную матрицу изготавливают алмазным точением ленты, закрепленной вокруг боковой поверхности барабана. Позитивные копии линейной линзы Френеля изготавливают заполнением жидким силиконовым эластомером зазора между негативной матрицей и плоской стеклянной пластиной. После завершения вулканизации силиконового эластомера готовую линзу отделяют. Данный способ обеспечивает вы-

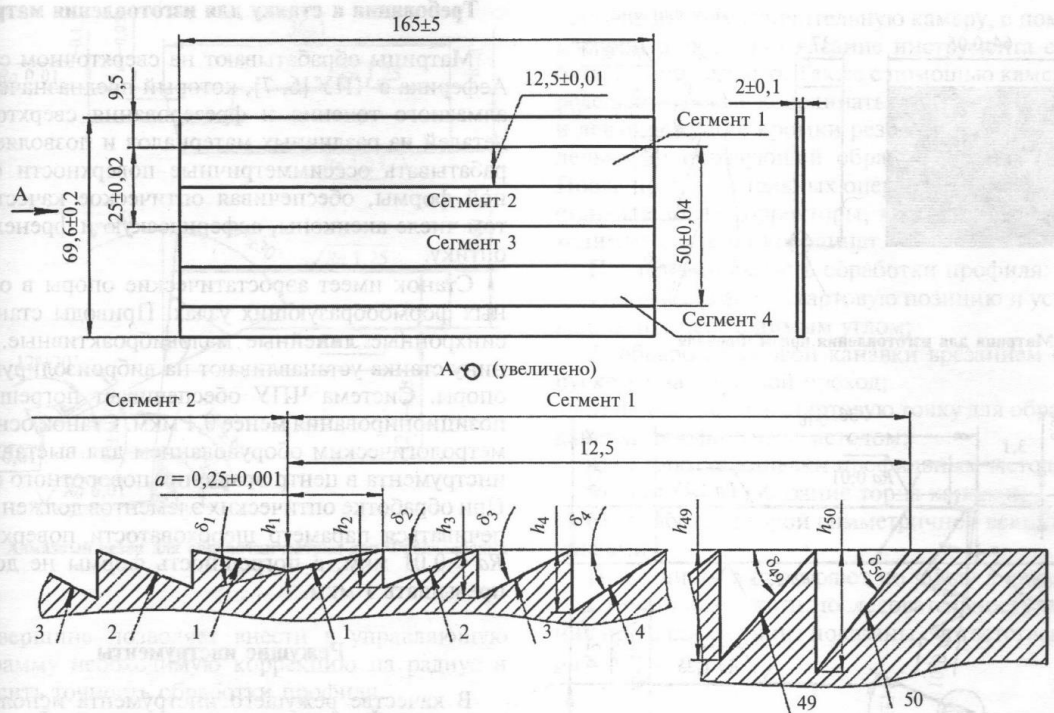


Рис. 1. Линейная негативная матрица Френеля

сокое оптическое качество линзы при небольшой ее массе.

В ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" совместно с МГТУ им. Н. Э. Баумана разработана и реализована технология обработки негативной матрицы для последующего изготовления позитивных копий.

Негативная линейная матрица Френеля представляет собой полосу толщиной 2 мм и шириной 69,6 мм с обработанным профилем. Для изготовления данных деталей используют: поликарбонат, оптическое оргстекло, медь М06 и алюминиевый сплав АМг6. Профиль матрицы Френеля состоит из двух одинаковых частей шириной 25 мм, расположенных параллельно, каждая из которых состоит из двух симметричных сегментов. В каждом сегменте находится 50 канавок разной глубины  $h$  и с разными углами  $\delta$  наклона профиля. Таким образом, профиль матрицы Френеля (рис. 1) состоит из четырех сегментов с общим числом канавок 200. Сегмент 2 является зеркальным отображением сегмента 1, а сегмент 4 — зеркальным отражением сегмента 3. Глубина  $h$  канавок профиля варьируется от 2,3 до 185 мкм, а угол  $\delta$  изменяется от 0,53 до 36,4° (табл. 1).

Одно из перспективных направлений использования матрицы с френелевским профилем — изготовление эластичных призм для коррекции зрения. В призматических линзах лучи отклоняются к основанию призмы, поэтому изображение смещается

к ее вершине. Этот эффект используют для восстановления направления лучей при отклонении оптической оси одного из глаз от общей точки фиксации.

Призмы представляют собой тонкие пластинки из гибкого прозрачного полимера, одна поверхность которых гладкая, а вторая выполнена в виде призматического раstra. Их накладывают на линзы очков, где они прочно удерживаются благодаря адгезии.

Матрицы для призм Френеля изготавливают из меди М06 или алюминия АМг6. Профиль матрицы представляет собой ряд одинаковых канавок с ша-

Таблица 1  
Значения параметров линейной негативной матрицы Френеля

Номер канавки	$\delta^\circ$	$h$ , мкм
1	0,5	2,31
2	1,5	6,93
3	2,6	11,55
4	3,7	16,17
⋮	⋮	⋮
25	23,1	106,94
26	23,9	110,79
⋮	⋮	⋮
49	36,0	182,16
50	36,4	184,51

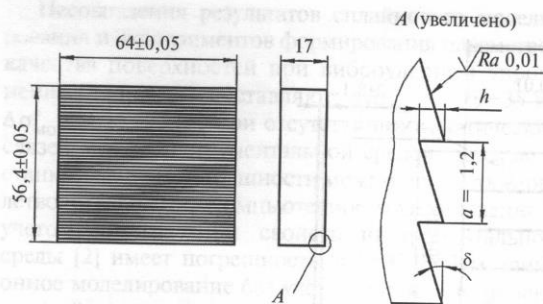


Рис. 2. Матрица для изготовления призм Френеля

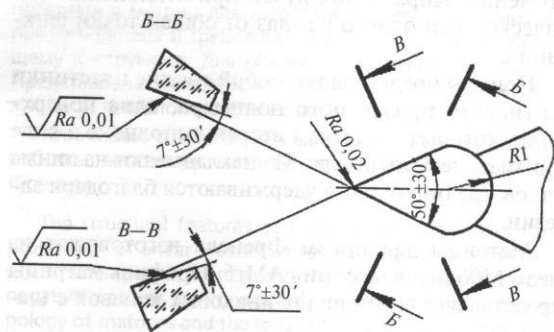
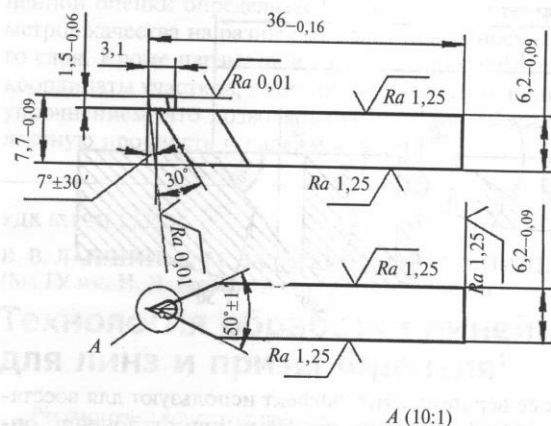


Рис. 3. Алмазный резец для обработки негативной матрицы Френеля

гом  $a = 1,2$  мм, угол наклона и глубина варьируются соответственно в диапазонах  $1,11 < \delta < 33,33^\circ$  и  $0,0233 < h < 0,7892$  мм (рис. 2).

В табл. 2 приведены значения  $h$  и  $\delta$  для матриц, применяемых при изготовлении призм Френеля.

К негативным матрицам для изготовления линейных линз и призм Френеля предъявляются высокие требования по качеству поверхности и точности изготовления. Шероховатость обработанных поверхностей не должна превышать  $Ra = 0,01$  мкм, допуски на параметры  $h$  и  $a$  не должны превышать 1 мкм.

### Требования к станку для изготовления матриц

Матрицы обрабатывают на сверхточном станке Асферика с ЧПУ [6, 7], который предназначен для алмазного точения и фрезерования сверхточных деталей из различных материалов и позволяет обрабатывать осесимметричные поверхности сложной формы, обеспечивая оптическое качество, том числе аксиконы, асферическую и френелеву оптику.

Станок имеет аэростатические опоры в основных формообразующих узлах. Приводы станка — синхронные линейные маловиброактивные. Станину станка устанавливают на виброизолирующие опоры. Система ЧПУ обеспечивает погрешность позиционирования менее 0,1 мкм. Станок оснащен метрологическим оборудованием для выставления инструмента в центр вращения поворотного стола. При обработке оптических элементов должен обеспечиваться параметр шероховатости поверхности  $Ra < 0,01$  мкм, а погрешность формы не должна превышать 1 мкм.

### Режущие инструменты

В качестве режущего инструмента используют алмазные монокристаллические резцы со специальной геометрией режущей части. Шероховатость рабочих поверхностей данных резцов  $Ra < 0,01$  мкм, радиус  $\rho$  скругления режущей кромки должен составлять  $30 \div 50$  нм. Радиус резца при вершине должен быть как можно меньше. Чем больше радиус при вершине, тем больше искажается сопрягаемый профиль по дну обрабатываемой канавки. По публикациям известно, что лучшие резцы имеют  $\rho = 1$  мкм. Этому условию соответствуют только резцы из природного монокристаллического алмаза.

Для обработки негативных матриц Френеля использовали острозаточенные алмазные резцы отечественного производства и алмазные резцы с радиусом при вершине 20 мкм фирмы Contour (Нидерланды) (рис. 3). Погрешность радиуса при вершине резца Contour составляет менее 1 мкм. Использование инструмента с заданным радиусом

Таблица 2  
Значения параметров матриц для изготовления призм Френеля

Номер матрицы	Диоптрия	$\delta^\circ$	$h$ , мкм
1	1	1,11	0,23
2	2	2,22	0,46
...	...	...	...
7	7	7,77	0,164
8	8	8,88	0,188
...	...	...	...
14	25	27,77	0,632
15	30	33,33	0,789

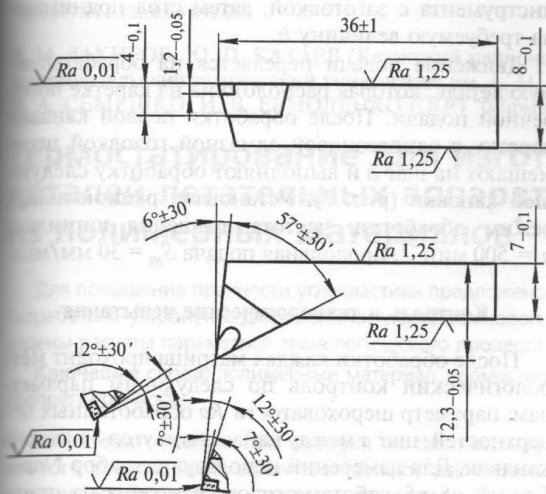


Рис. 4. Алмазный резец для обработки матриц для Френелевских призм

при вершине позволяет внести в управляющую программу необходимую коррекцию на радиус и повысить точность обработки профиля.

Для обработки матриц для призм Френеля использовали острозаточенные резцы отечественного производства (рис. 4).

#### Технология обработки негативных матриц для линейных линз Френеля

Для изготовления матриц использовали полосы из меди, оргстекла, алюминия. Полосу шириной 70 мм и длиной 1055 мм устанавливали на цилиндре диаметром 350 мм и натягивали с помощью специального механизма так, чтобы обеспечить ее плотное прилегание к поверхности цилиндра. Алмазный резец устанавливали в резцедержателе, который расположен на поворотном столе. Резцедержатель имеет возможность регулировки инструмента по высоте, чтобы с высокой точностью выставлять резец по высоте центров шпинделя.

После установки полосы на станок ее необходимо проточить до требуемого размера по толщине и ширине. Точение по наружному цилиндру выполняли алмазным резцом с радиусом при вершине 2 мм, а подрезание торцов осуществляли черновым острым резцом. Затем в резцедержатель устанавливали алмазный резец для обработки матриц. Совмещение вершины инструмента с центром вращения поворотного стола выполняли с помощью микроскопа, перекрестие которого предварительно было совмещено с центром вращения поворотного стола с помощью центроискателя.

Далее выполняли операции по определению положения инструмента в системе координат относительно обрабатываемой детали. Для этого на станок

устанавливали увеличительную камеру, с помощью которой определяли касание инструмента с обрабатываемой деталью. Также с помощью камеры определяли угловые координаты, при которых правая и левая режущие кромки резца становятся параллельными образующей обрабатываемой полосы. После подготовительных операций в систему ЧПУ станка заносят корректоры, которые задают необходимые системы координат.

Последовательность обработки профиля:

- 1) подвод резца в стартовую позицию и установка его под необходимым углом;
- 2) обработка первой канавки врезанием с припуском  $t$  на чистовой проход;
- 3) подвод резца в стартовую точку для обработки канавки профильным методом;
- 4) обработка канавки профильным методом;
- 5) чистовое подрезание торца канавки;
- 6) обработка второй симметричной секции с канавками.

Позиции 1–5 повторяют по числу  $n$  канавок.

Схема обработки и последовательность нарезания профиля матрицы показаны соответственно на рис. 5 и 6, а–г.

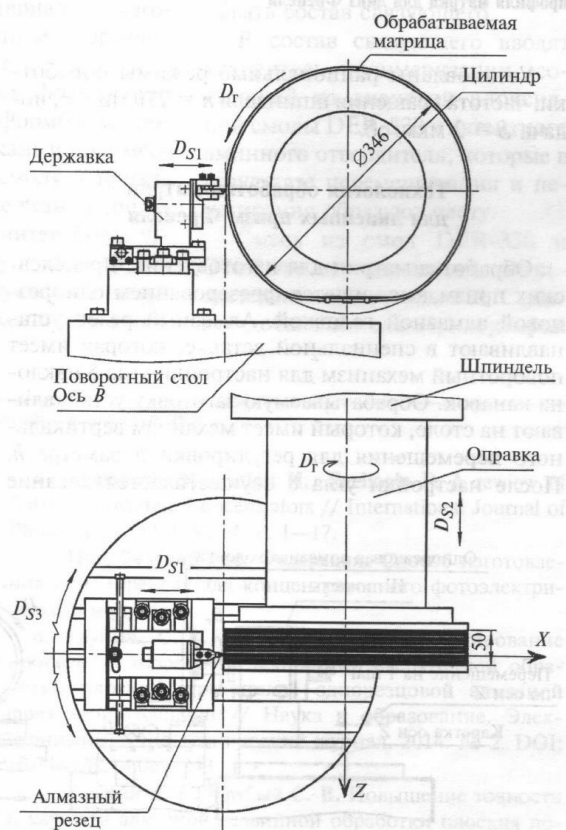


Рис. 5. Схема обработки матриц для линз Френеля

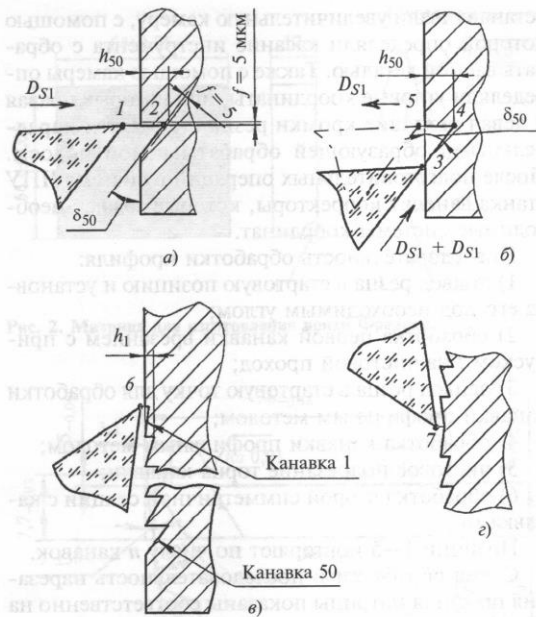


Рис. 6. Последовательность (поз. 1—7) нарезания 50-й канавки профиля матриц для линз Френеля

Установлены рациональные режимы обработки: частота вращения шпинделя  $n = 270 \text{ мин}^{-1}$ , подача  $S = 2 \text{ мкм/об}$ .

#### Технология обработки матриц для линейных призм Френеля

Обработка матриц для изготовления Френелевских призм выполняется фрезерованием односторонней алмазной головкой. Алмазный резец устанавливается в специальной вставке, которая имеет поворотный механизм для настройки угла  $\delta$  наклона канавок. Обрабатываемую заготовку устанавливают на столе, который имеет механизм вертикального перемещения для регулировки параметра  $h$ . После настройки угла  $\delta$  осуществляется касание

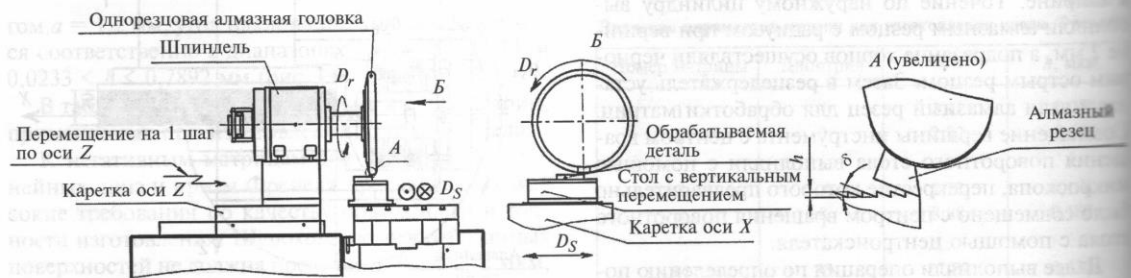


Рис. 7. Схема обработки матриц для изготовления призм Френеля

инструмента с заготовкой, затем стол поднимают на требуемую величину  $h$ .

Движение подачи передается на обрабатываемую деталь, которая расположена на каретке поперечной подачи. После обработки первой канавки каретку с односторонней алмазной головкой перемещают на шаг  $a$  и выполняют обработку следующей канавки (рис. 7). Установлен рациональный режим обработки: частота вращения шпинделя  $n = 500 \text{ мин}^{-1}$ , продольная подача  $S_m = 30 \text{ мм/мин}$ .

#### Контроль и технологические испытания

После обработки каждая матрица проходит метрологический контроль по следующим параметрам: параметр шероховатости  $Ra$  обработанных поверхностей, шаг  $a$  между канавками, угол  $\delta$  наклона канавок. Для измерений используют прибор NanoFocus®  $\mu\text{Surf}$ , работа которого основана на принципе конфокальной микроскопии.

Для бесконтактного измерения топографии поверхности контролируемую матрицу позиционируют на прецизионном измерительном столе и сканируют поверхность. Изображение отсканированной поверхности выводят на экран и с помощью специального программного обеспечения выполняют измерения.

По заказу Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, используя данную технологию, были обработаны негативные матрицы Френеля из поликарбоната, оргстекла и меди с помощью остро заточенных алмазных резцов и радиусных резцов с функцией коррекции на радиус. Наилучшие показатели были достигнуты при обработке матриц из оргстекла:  $Ra = 0,015 \text{ мкм}$ ;  $a$  менее  $1 \text{ мкм}$ ;  $\delta$  менее  $0,3^\circ$ .

Были также обработаны матрицы для изготовления призм Френеля. Значения параметров изготовленных матриц представлены в табл. 2. Результаты метрологического контроля:  $Ra = 0,03 \text{ мкм}$ ,  $a$  менее  $1 \text{ мкм}$ ;  $\delta$  менее  $0,3^\circ$ .

Исследования и обработка партий негативных матриц для линз и призм Френеля подтвердили эффективность разработанной технологии. Даль-

М. ЗАКИРОВ, Ю. П. КАТАЕВ (Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ),  
А. А. СЕМЕШКО, И. В. ЕРМОЛЕНКО (ООО "Фирма "МВЕН")

## Термостатирование при изготовлении деталей летательных аппаратов из полимерных материалов<sup>1</sup>

Для повышения прочности углепластика предложено термостатирование. Разработано устройство для пропитки углепластиковой ткани смолой. Приведены расчеты параметров технологического процесса.

**Ключевые слова:** полимерный материал, термостатирование, пропитка, препрег, прочность.

For increase of carbon fiber strength, the thermostating is suggested. The device for impregnation of carbon fiber fabric by resin is developed. The calculations of manufacturing process parameters are given.

**Keywords:** polymer material, thermostating, impregnation, prepreg, strength.

Полимерные материалы и, в частности, пластмассы обладают высокой удельной прочностью, которая определяется отношением предела текучести к удельному весу материала, что обуславлива-

ет их применение в летательных аппаратах [1]. Такие детали, как элементы обшивки из слоистых и волокнистых материалов, изготавливают контактными формованием и напылением.

При контактном формовании на поверхность формблока послойно наносят ткань и полимерную связующую смолу и прикапывают. В качестве ткани используют полотна из нитей бора, углерода, стекла, шунгита и других материалов. Связующими могут быть смолы: эпоксидные, фено-

лоформальдегидные, полиэфирные и др.

После прокатывания изделие на 8÷10 ч оставляют на формблоке для полного отверждения при нормальной температуре воздуха (20÷22 °С), что снижает производительность изготовления и прочность изделия. Сократить время изготовления и повысить прочность детали можно повышением температуры отверждения нагреванием, полимеризацией смолы и дополнительным термостатированием.

Повысить эффективность изготовления деталей из полимерных материалов можно использованием препрега, т. е. предварительным нанесением связующего на ткань. Причем данную операцию можно автоматизировать, но для этого необходимо модифицировать состав связующего.

В состав связующего вводят ускоритель полимеризации, состоящий из диановой эпоксидной смолы DER-330 и латентного аминного отвердителя, которые в результате перемешивания и перетиравания образуют пасту.

Смесь из смол DER-330 и ЭН-6 при перемешивании нагревается до температуры 125 °С. Далее добавляют полиарилсульфон

<sup>1</sup> Исследования проводили при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.". Соглашение № 14.579.21.0037 от 05.06.2014. Уникальный идентификатор ПНИ-RFMEF157914X0037.

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 60)

нейшее совершенствование технологии обработки структурированных поверхностей на прецизионных деталях возможно при использовании более точных станков.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Davis A., Kuhnlenz F. Optical design using Fresnel lenses. Basic principles and some practical experiment // *Optic and Photonic*. 2007. N 4. P. 52–55.
2. Gaurav A. Madhugiri, Karale S. R. High solar energy concentration with a Fresnel lens: a review // *International Journal of Modern Engineering Research*. 2012. V. 2. P. 1381–1385.
3. Sierra C., Alfonso J. Va'Zquez. High solar energy concentration with a Fresnel Lens // *Journal of Materials Science*. 2005. N 40. P. 1339–1343.

4. Khamooshi M., Salati H., Egelioglu F. A review of Solar Photovoltaic Concentrators // *International Journal of Photoenergy*. 2014. V. 14. P. 1–17.

5. Пат. 2456645 Рос. Федерации: Способ изготовления линз Френеля для концентраторного фотоэлектрического модуля.

6. Грубый С. В., Лапшин В. В. Моделирование процесса и разработка технологии сверхточной обработки плоских отражателей однорезцовой алмазной фрезерной головкой // *Наука и образование. Электронный научно-технический журнал*. 2014. № 2. DOI: 10.7463/0214.0699743.

7. Лапшин В. В., Грубый С. В. Повышение точности и качества алмазной лезвийной обработки плоских поверхностей // *Вестник машиностроения*. 2015. № 5. С. 57–62.