

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ <b>Жарков П.Е., Ткаченко Г.Г., Радзиевский В.Н.</b> Разработка и создание новых воздушных систем термостатирования ..... 2	<b>Погребняк А.Д., Дядюра К.А., Руденко Л.Ф.</b> Исследование электролитно-плазменно обработанной поверхности конструкционной стали..... 19	<b>Панченко М.В., Каневский С.А.</b> Автоматизация ассоциативных связей документов MS Word с Search и Autocad ..... 38
<b>Тертышный И.Н., Парафейник В.П., Нефедов А.Н., Рогальский С.А.</b> Анализ эффективности центробежного компрессора как сложной энерготехнологической системы ..... 5	<b>Гапонова О.П., Дядюра К.О., Шостак М.М.</b> Дослідження пластичної плинності при осаджуванні порошкових мідно-титанових матеріалів ..... 24	<b>Гайдар В.А.</b> Многофункциональный редактор “Turbo_Profile.Section_50” для быстрого и качественного редактирования управляющих программ станков с ЧПУ ..... 42
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ <b>Клюс В.П., Новицкая Е.Г.</b> Получение вторичных энергоносителей из резинотехнических отходов ..... 11	ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ <b>Левченко Д.А., Иванов В.А., Шарапов С.О., Прокопов М.Г., Козин В.Н.</b> Применение технологии 3d печати при проектировании и прототипировании компрессорной техники ..... 27	ТЕХНИКА <b>Радионов А.В.</b> Повышение экологической безопасности оборудования газоперекачивающих станций ..... 46
ИССЛЕДОВАНИЯ <b>Макаренко В.Д., Бондарев А.А., Бутко Н.П., Мурашко Н.И., Савченко И.Е.</b> Исследование загрязнения атмосферы в районе компрессорных станций с применением нейросетевого моделирования ..... 14	<b>Концевич В.Г., Шевчук М.С.</b> Моделирование нагружения вала свободновихревого насоса для расчета методом конечных элементов ..... 34	ТЕХНОЛОГИЯ <b>Самойлов П.Е., Чижов И.Г., Шкурат А.И., Бугаёв С.И., Павленко Ю.А.</b> Смазочно-охлаждающая жидкость для чистовой обработки молибдена..... 51
		<b>Сайчук А.В.</b> Отклонения в структурообразовании при производстве корпусных деталей ..... 53
		Слово к читателю ..... 56

### Вниманию читателей!

Журнал поможет вам презентовать продукцию и услуги потенциальным потребителям, расширить контакты, выйти на новые рынки в Украине, странах СНГ и дальнего зарубежья



Вы можете сделать заявку на размещение в журнале «Компрессорное и энергетическое машиностроение»:

- ✓ рекламной-аналитической статьи с иллюстрациями (логотипом, фотографиями, схемами, диаграммами, графиками и т.д.)
- ✓ рекламного модуля форматом на всю страницу, ее половину или четверть страницы



- При полной или частичной перепечатке ссылка на журнал “Компрессорное и энергетическое машиностроение” обязательна
- Редакция не несет ответственности за содержание рекламы
- Мнение редакции журнала может не совпадать с мнением автора

### Тематические приоритеты журнала:

- Новые теоретические и практические результаты исследований в отраслях технических и связанных с ними наук.
- Проектирование, производство, эксплуатация оборудования.
- Качество, надежность, безопасность техники.
- Автоматика и системы управления в машиностроении.
- Технический контроль и диагностика.
- Управленческие, экономические, экологические и другие проблемы отрасли.

Д.А. Левченко, к.т.н., ст.преп., В.А. Иванов, к.т.н., доцент, С.О. Шарапов, ассистент, М.Г. Прокопов, к.т.н., ст.преп., В.Н. Козин, к.т.н., ст.преп. (Сумский государственный университет) г. Сумы, Украина

## Применение технологии 3d печати при проектировании и прототипировании компрессорной техники

В статье рассмотрена возможность применения технологий 3D прототипирования при проектировании компрессорной техники. Рассмотрена задача повышения массогабаритных показателей компрессора на примере корпусной детали транспортного холодильного компрессора. По результатам численного эксперимента и тестовой печати была определена область наиболее эффективного применения технологий 3D печати с позиций временных и финансовых затрат, а также в зависимости от задач прототипирования и способа построения детали. Даны рекомендации по граничным условиям параметров печати при прототипировании различных деталей машиностроения в зависимости от их назначения. Полученные результаты могут быть распространены на все 3D принтеры, использующие аналогичные MakerWare программные алгоритмы разбиения детали на слои и наложения сетки движения головки экструдера.

**Ключевые слова:** компрессор, 3D печать, прототипирование, массогабаритная оптимизация.

В статті розглянута можливість застосування технологій 3D прототипування при проектуванні компресорної техніки. Розглянута задача підвищення масогабаритних показників компресора на прикладі корпусної деталі транспортного холодильного компресора. У результаті чисельного експерименту та тестового друку була виявлена область найбільш ефективного застосування технологій 3D друку з позицій часових і фінансових витрат, а також в залежності від завдань прототипування та способу побудови деталі. Дано рекомендації по граничним умовам параметрів друку при прототипуванні різних деталей машинобудування в залежності від їх призначення. Отримані результати можуть бути розповсюджені на всі 3D принтери, що використовують аналогічні MakerWare програмні алгоритми розбиття деталі на шари та накладення сітки руху головки екструдера.

**Ключові слова:** компресор, 3D друк, прототипування, масогабаритна оптимізація.

The possibility of 3D prototyping application in design of compressor technics is considered in current article. Objective of improving mass and dimension parameters of compressor on the its carcass as an example is considered. The area of the most effective application of the 3D print technology was defined on results of numerical and experimental (test print) investigations, taking into account financial and time expenses and various goals of prototyping. The recommendations for boundary conditions of print settings were given for machine parts depending on its function. Gained results could be spread to all 3D printers which use software's algorithms of slicing and grid coating of 3D model equal to MakerWare program.

**Keywords:** compressor, 3D printing, prototyping, mass and dimension optimization.

Проектирование высококачественной и эффективной компрессорной техники задача достаточно сложная и многогранная. С одной стороны в основе повышения качества производимой продукции лежит непрерывный поиск технических и технологических решений, которые позволят либо улучшить характеристики производимой продукции либо удешевить ее производство при прочих равных параметрах. Однако поиски новых решений и их апробация на натурных моделях задача дорогостоящая и трудоемкая, поскольку сопряжена с дополнительной нагрузкой на оборудование и персонал предприятия. Более того, руководство большинства предприятий настороженно относится к нововведениям и новым технологиям, тем более, если эти «новые идеи» не апробированы кем-то. По этой причине технологии 3D печати, несмотря на то, что им уже более 30 лет на рынке услуг [1], на территории СНГ долгое время не получали широкого распространения, хотя за рубежом около 60% предприятий активно используют 3D печать в своей деятельности, причем 73% респондентов используют для проверки идей и тестирования концептов, 67% – для научно-исследовательских и опыт-

но-конструкторских работ, 19% – для производства конечных изделий [2]. В последние годы технология 3D печати динамично развивается, укрепив свои позиции, чтобы называться одним из основных методов производства деталей [3] и является одной из ТОП-10 стратегических технологий, которые будут развиваться в 2015 году [4]. И только в последнее время к ним повышается интерес отечественных машиностроительных предприятий, ювелирной промышленности и медицины. Кроме того, распространение и широкое внедрение подобных технологий ограничено высокой стоимостью 3D принтера и, как следствие, высокой удельной стоимостью единицы получаемой продукции. Часто при проектировании нового компрессора или при совершенствовании существующей конструкции, инженерам приходится решать различные, порой противоречивые задачи (например, обеспечение необходимой прочности и жесткости конструкции при уменьшении ее массы и габаритов), что, как правило, требует проведения численного и физического эксперимента. Процесс отработки прототипа на натурных образцах достаточно длительный как из-за существенных материальных затрат, так и времени на оформле-

ние разрешительной, сметной и прочей документации. При этом возможности повторного проведения натурных испытаний в случае неудачи весьма ограничены.

В связи с этим, вопрос определения области эффективного использования технологий 3D печати и условий их рационального применения при проектировании и производстве энергетического оборудования, в частности компрессорной техники, является актуальным и имеет практическое значение.

### 3D принтер – инструмент разработки дизайна энергетического оборудования

Рассмотрим возможности 3D печати применительно к решению задачи по улучшению массогабаритных показателей транспортного холодильного компрессора. Тип выбранного компрессора (рис. 1) роторный с катящимся ротором, холодопроизводительность 5 кВт и частотой вращения ротора 25 с<sup>-1</sup>.

Очевидно, что корпус – это наиболее массивная деталь в представленном компрессоре. Поэтому проработка модели компрессора с целью улучшить массогабаритные показатели производилась именно по этой детали (рис. 2). Анализ 3D модели в CAD программе показал, что масса твердотельной корпусной детали, изготовленной из пластика ABS [5], равна  $m_0 = 0,945$  при плотности материала 1,05 кг/м<sup>3</sup>.

Прототипирование корпусной детали компрессора выполнялось с применением 3D принтера Flashforge Creator II (аналог The Replicator (dual)), реализующего FDM-технологии [6], и программы MakerBot MakerWare [7]. Для выполнения итерационного процесса прототипирования необходимо соблюдение определенного алгоритма (рис. 3). Программа предусматривает печать детали двумя способами либо их комбинацией, что осуществляется при задании параметров печати (рис. 4). **Первый способ** (рис. 4 а) предусматривает наложение на каждый слой (сечение) детали мелкогабаритной сетки с шестигранными ячейками, где процентное заполнение  $\Omega$  детали указывает плотность этой сетки. **Второй способ** (рис. 4 б) выполняет построение детали последовательным наложением слоев  $n$  от наружных стенок в глубину тела модели.

Таким образом, комбинируя два этих параметра печати можно получать модели прототипов с различными механическими свойствами и массовыми показателями. 3D принтер, оснащенный двумя печатающими головками, позволяет печатать очень сложные пространственные модели за счет использования материала поддержки. После задания параметров печати дальнейшая подготовка модели к печати предусматривает предварительный просмотр печатаемой детали, при этом масса, время печати и внутренняя структура детали указывается в диалоговом окне. Масса рассчитывается для материала, выбранного при задании



Рис. 1. Роторный компрессор с катящимся ротором транспортной холодильной установки

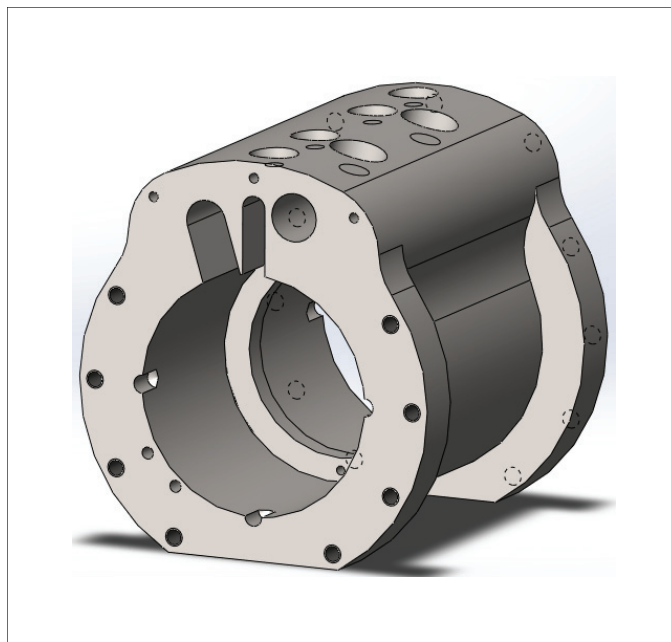


Рис. 2. Корпус роторного компрессора с катящимся ротором транспортной холодильной установки

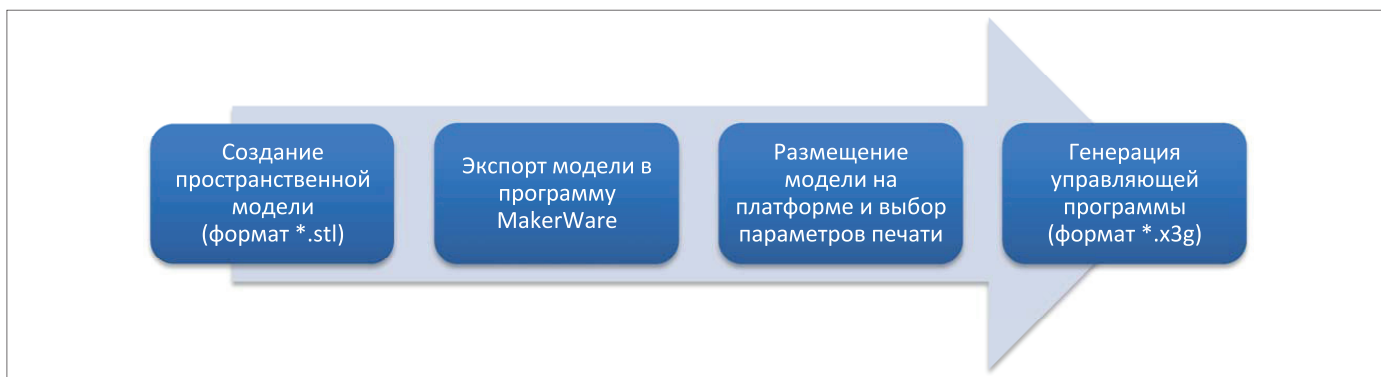
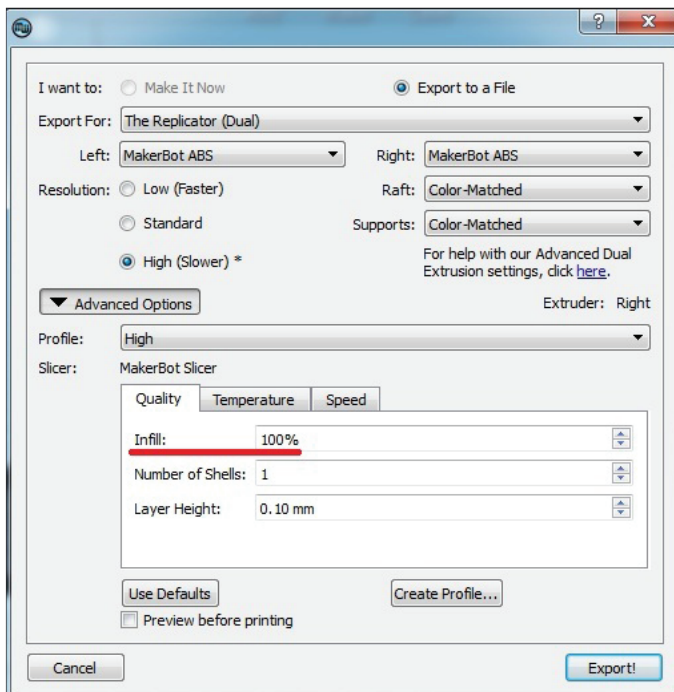
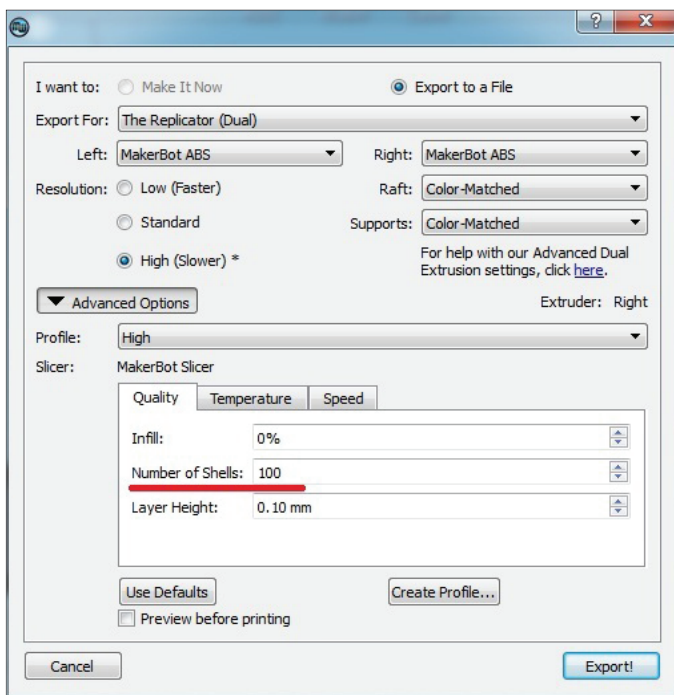


Рис. 3. Алгоритм процесса прототипирования



а



б

**Рис. 4. Интерфейс диалогового окна программы MakerWare:** а – процентное заполнение модели; б – количество слоев

параметров печати, однако, несмотря на это, можно пересчитать массу под практически любой материал, если известна его геометрия и плотность (при условии использования одинаковых алгоритмов построения траектории движения головки принтера). Эта возможность, а также обратный экспорт перестроенной модели в САД программы и дальнейшее исследование модели в них или САЕ комплексах с последующей печатью лучшего варианта исполнения детали, позволяют значительно сократить время испытаний, предоставляют возможность быстрой обратной связи, т.е. отбраковывать неэффективные решения на ранней стадии про-

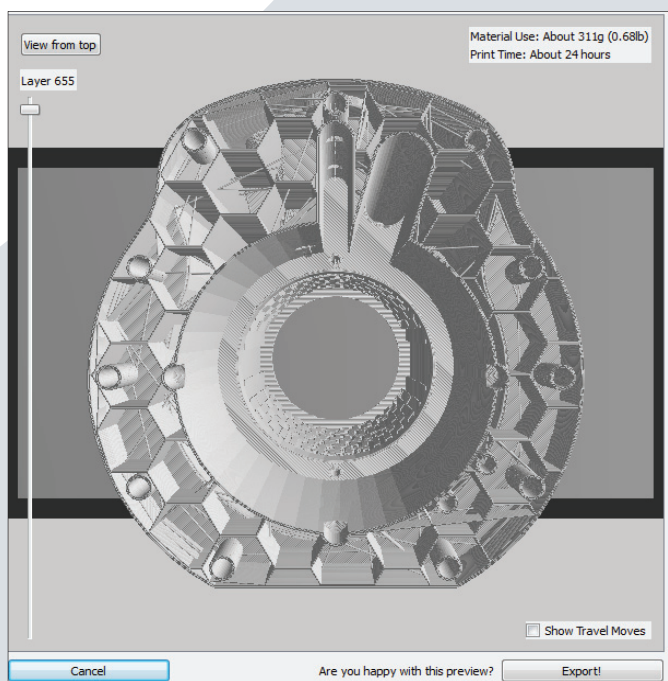
ектирования, что также сокращает время нахождения наиболее выгодного технического решения и экономит ресурсы предприятия.

Так как способ заполнения печатаемой модели задается пользователем (процентным заполнением или слоями) и не зависит от материала печати, то результаты программного прототипирования можно распространить на все 3D принтеры, которые используют такие же принципы разбиения твердотельной модели на слои и те же алгоритмы построения траектории движения печатающей головки, что и компания MakerBot в программе MakerWare. В данном случае печать осуществлялась пластиком ABS, но остается возможность существенно повысить экологичность процесса прототипирования за счет применения пластика на основе биоразлагаемых полимеров, например PLA.

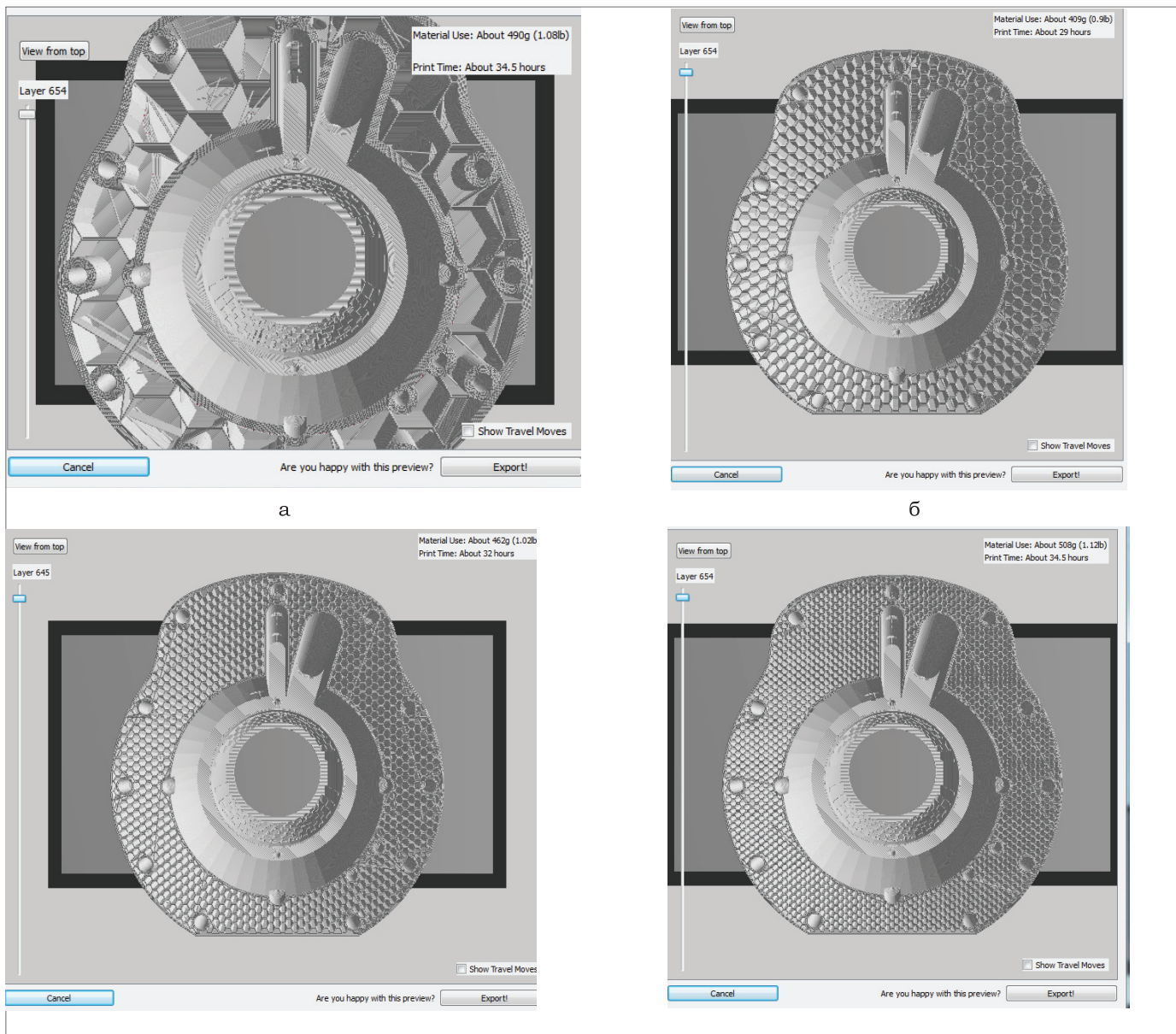
До начала проведения итерационного прототипирования детали необходимо определить нижние граничные значения основных параметров печати. Основным условием при определении нижней границы была выбрана достаточная прочность образца. Учитывая, что толщина одного слоя материала известна для каждого режима печати, то нижней границей были приняты следующие параметры печати: для *послойного способа построения детали* – 2 слоя; для *способа процентным заполнением детали* – 5% (рис. 5). Итерационное программное прототипирование заключается в последовательном прототипировании детали каждым методом отдельно (от минимального значения к максимальному с определенным шагом), что позволяет очертить области эффективного использования каждого метода и их комбинаций.

На рис. 6 и 7 приведены прототипы детали «корпус», построенные различными способами, что наглядно демонстрирует особенности построения траектории движения головки принтера и преимущества использования каждого из них.

Результаты пробной печати образцов (рис. 6) показали, что начиная с 10%Ω, деталь обладает достаточно высокими механическими свойствами. Так, деталь с 40% заполнением может выполнять большинство



**Рис. 5. Прототип корпусной детали с граничными параметрами печати**



а б в г

**Рис. 6. Прототипирование детали корпус способом процентного заполнения:**  
 а –  $\Omega = 10\%$ ; б –  $\Omega = 20\%$ ; в –  $\Omega = 30\%$ ; г –  $\Omega = 40\%$

функциональных задач, возложенных на аналогичную деталь изготовленную, методом литья или штамповки, т.е. твердотельную.

Процесс наращивания стенок прототипа детали и их слияние можно наглядно проследить на рис. 7. Результаты тестовой печати показали, что до момента слияния стенок ( $n \approx 20$ ), деталь обладает удовлетворительными механическими свойствами, а после слияния ( $n \geq 20$ ) прочностные характеристики значительно возрастают за счет перераспределения механических напряжений между ближайшими слитыми слоями. Сравнение механических свойств деталей, построенных различными способами и численные значения показателей механической прочности, и последующий их глубокий анализ, представляют научный и практический интерес, однако выходят за рамки данной статьи.

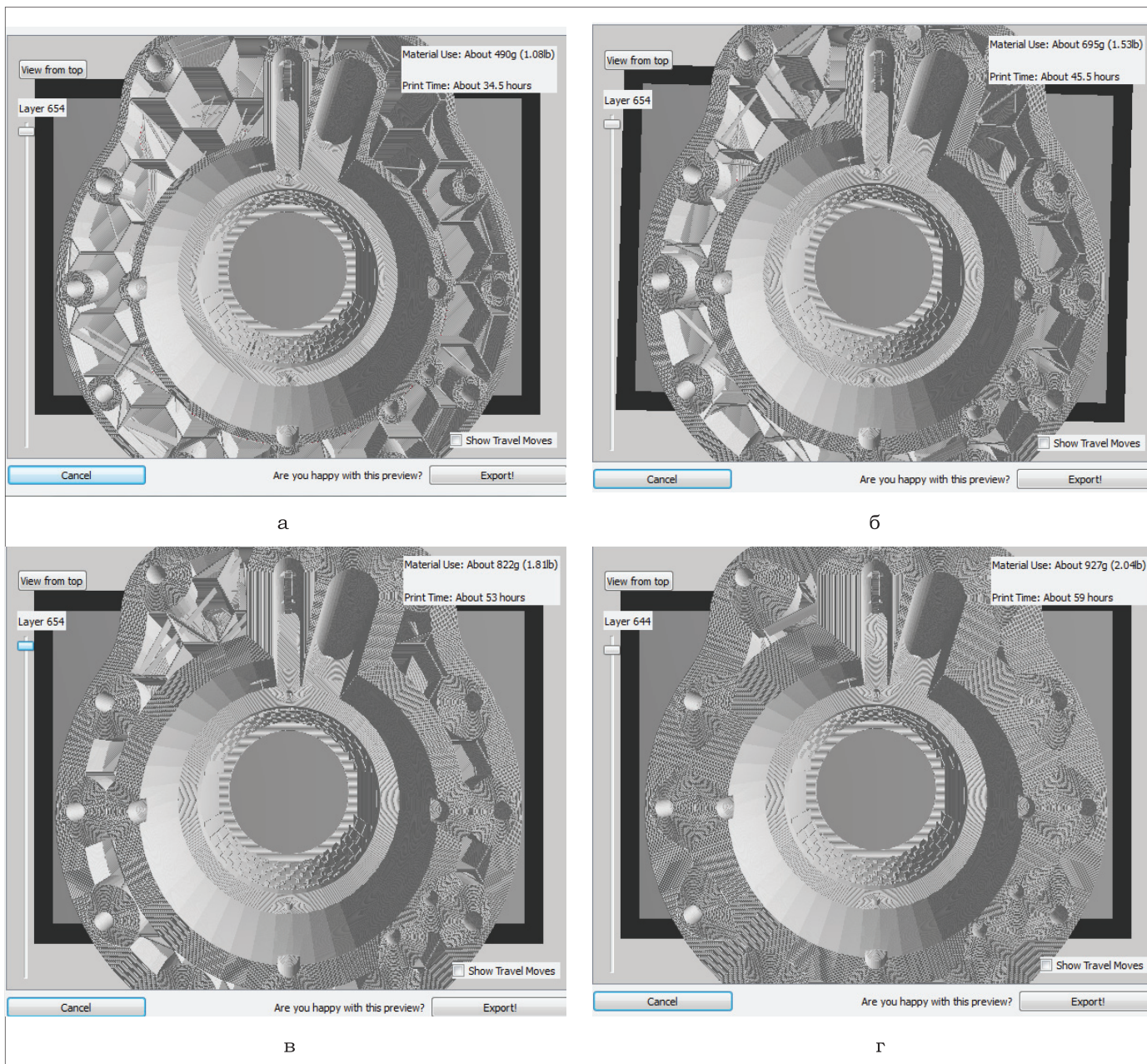
Результаты численного эксперимента представлены в табл. 1 и 2 для двух способов построения прототипа детали:

Анализ показал, что предельная масса детали при печати любым из способов не превышает

$m_{\max} = 0,942$  кг позиционирования головки принтера и усадкой материала (пластика) при его охлаждении. Однако для подавляющего большинства деталей эта погрешность приемлема.

Более того, чтобы выделить области эффективного применения каждого из способов построения прототипа и их комбинаций, построим графики соответствующих итераций прототипирования (рис. 8).

Выделенные три участка возможных комбинаций способов построения прототипов, характеризуют величину прироста массы детали на единицу слоя или процента ее заполнения (рис. 8). Линии, которые очерчивают области комбинированного применения способов прототипирования, образованы двумя кривыми:  $m = f(n)$  и  $m = f(\Omega)$ . При этом можно видеть, что использование способа послойного построения модели влечет более резкий прирост массы детали на участке I по сравнению со способом процентного заполнения  $\frac{\Delta m}{\Delta n} \gg \frac{\Delta m}{\Delta \Omega}$ , однако на участке II динамика прироста массы для обоих способов практически одинакова



**Рис. 7. Прототипирование детали корпус способом послойного построения: а – стенки из 6; б – 12; в – 18; г – 30 слоев**

$\frac{\Delta m}{\Delta n} = \frac{\Delta m}{\Delta \Omega} = 0,1$  кг характеризуют величину прироста массы детали на единицу слоя или процента ее заполнения.

На участке III масса детали для первого способа из-за слияния ее внутренних и внешних слоев, а для второго продолжает равномерно увеличиваться по линейной зависимости.

Несмотря на удобство применения программы MakerWare, при итерационном прототипировании она потребляет значительные системные ресурсы компьютера. Поэтому для двух ограничивающих кривых были составлены уравнения регрессии, которые позволяют составить математическую модель и сократить время итерационного прототипирования, сократив выборку вариантов комбинированных способов построения детали путем задания граничных условий.

$$\begin{cases} \frac{dm}{dx} = 7 \cdot 10^{-10}x^5 - 2 \cdot 10^{-7}x^4 + 3 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,002x^2 + 0,0623x + 0,1857, & \text{при } x_0 = \Omega \\ \frac{dm}{dx} = -7 \cdot 10^{-11}x^5 + 2 \cdot 10^{-8}x^4 - 2 \cdot 10^{-6}x^3 + 3 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,007x + 0,2769, & \text{при } x_0 = \Omega \end{cases} \quad (1)$$

Очевидно, что решение по выбору оптимальной массы детали это компромисс с ее прочностными характеристиками. Таким образом, с точки зрения практического применения, полученные результаты можно интерпретировать так:

- участок I (выделен зеленым цветом) соответствует прототипам, для которых не предъявляются высокие требования по механической прочности (легконагруженные детали, демонстрационные стенды и т.п.);

- участок II (выделен желтым цветом) соответствует прототипам, имеющим оптимальные сочетания механических свойств и массы (большинство деталей машиностроения);

- участок III (выделен красным цветом) соответствует прототипам, имеющим прочностные качества, приближающиеся к цельнолитой или штампованной детали (ответственные, нагруженные детали).

Еще одним важным параметром для эффективного применения технологий 3D прототипирования

**Таблица 1. Результаты численного эксперимента при использовании способа процентного заполнения детали**

Кол-во слоев, $n$	Заполнение, $\Omega$	Вес детали $m$ , кг	Время печати $\tau$ , час
2	5	0,311	24
2	10	0,347	26
2	15	0,38	27,5
2	20	0,409	29
2	25	0,438	30,5
2	30	0,462	32
2	35	0,485	33,5
2	40	0,508	34,5
2	45	0,53	36
2	50	0,552	37
2	55	0,573	38,5
2	60	0,591	39,5
2	65	0,628	41,3
2	70	0,649	42,6
2	75	0,685	44,7
2	80	0,716	46,46
2	85	0,756	48,4
2	90	0,824	52,6
2	95	0,888	56,7
2	100	0,942	59,5

**Таблица 2. Результаты численного эксперимента при использовании послойного способа**

Кол-во слоев, $n$	Заполнение, $\Omega$	Вес детали $m$ , кг	Время печати $\tau$ , час
2	5	0,311	24
4	5	0,4	29
6	5	0,49	34,5
8	5	0,576	39
10	5	0,643	42,5
12	5	0,695	45,5
14	5	0,742	48,5
16	5	0,784	51
18	5	0,822	53
20	5	0,851	55
30	5	0,927	59
40	5	0,941	59,5
50	5	0,942	59,5
60	5	0,942	59,5
70	5	0,942	59,5
80	5	0,942	59,5
90	5	0,942	59,5
100	5	0,942	59,5

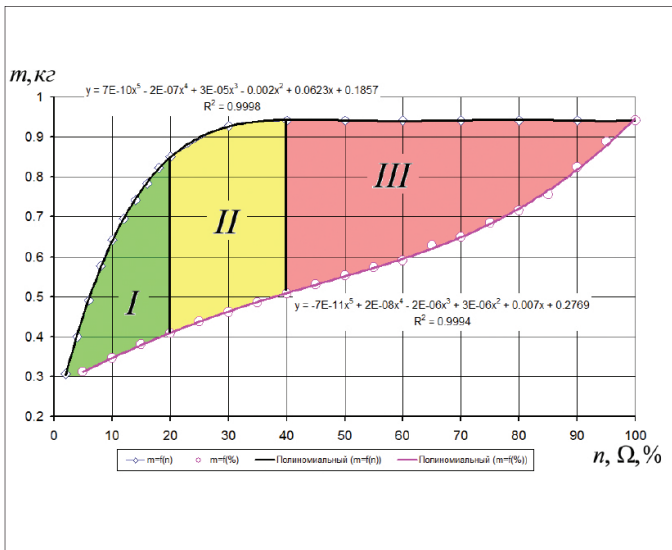


Рис. 8. Зависимость массы детали при двух способах ее построения

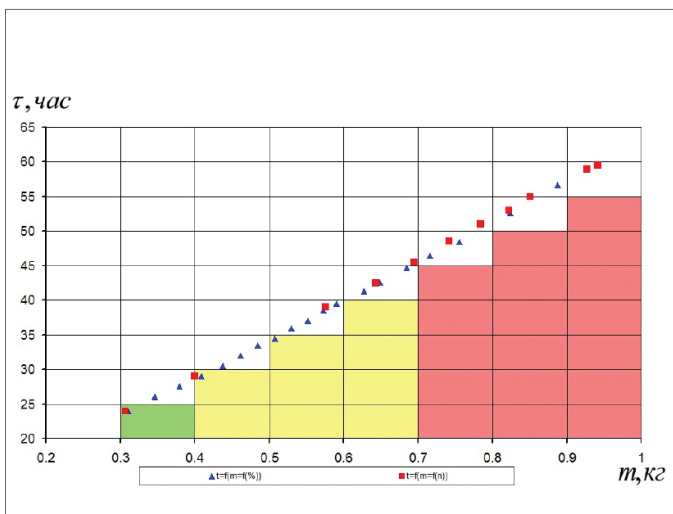


Рис. 9. Зависимость времени печати детали от ее массы при двух способах ее построения

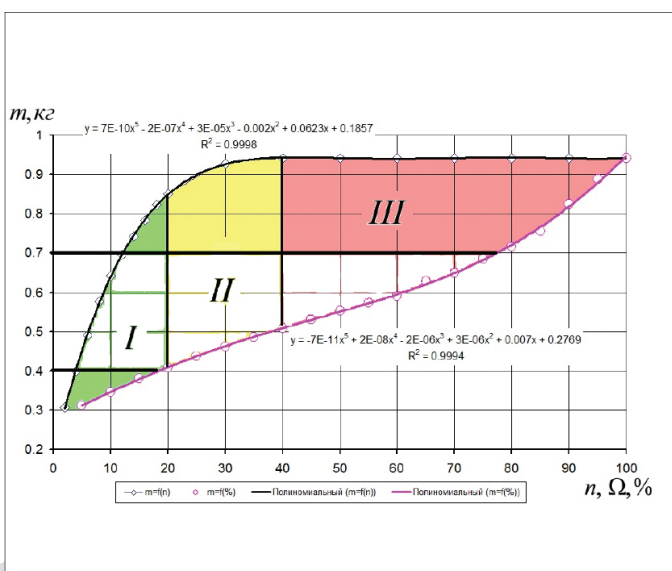


Рис. 10. Зависимость массы детали при двух способах ее построения с учетом времени печати

это время печати. Бесспорно, зависимость времени печати прототипа находится в прямой связи с результатами численного эксперимента (рис. 8), поскольку является функцией от массы прототипа  $\tau=f(m)$  (рис. 9).

Из рис. 9 видно, что точки численного эксперимента для способа построения детали процентным заполнением  $m=f(\Omega)$  расположены равномерно, в то время как точки для  $m=f(n)$  смещены вверх (следствие быстрого приращения массы). Кроме того, можно выделить три области, которые ограничены соответствующими значениями массы прототипа  $m_I=0,4$  кг и  $m_{II}=0,7$  кг из трех участков по оптимальному времени прототипирования детали с помощью технологий 3D печати (рис. 10). Таким образом, для задач быстрого прототипирования функциональных деталей можно использовать уравнение 1 и/или график (рис. 10).

### Выводы

В результате численного эксперимента и тестовой печати избранных прототипов определена область эффективного использования 3D принтера для прототипирования элементов энергетического оборудования или изготовления литейной оснастки с использованием печатного материала ABS. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что технология трехмерной печати представляет практический интерес при создании новых образцов техники, а найденный диапазон ее эффективного применения идентичен для всех типов 3D принтеров, использующих аналогичные программные алгоритмы разбиения детали на слои и наложения траектории движения головки принтера.

### Список литературы:

1. McLellan C. The History of 3D Printing: A Timeline [Электронный ресурс] / Charles McLellan // ZDNet. – 2014. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.zdnet.com/the-history-of-3d-printing-a-timeline-7000032187/>.
2. Hammond T. Research: 60 Percent of Enterprises are Using or Evaluating 3D Printing [Электронный ресурс] / Teena Hammond // ZDNet. – 2014. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.zdnet.com/research-60-percent-of-enterprises-are-using-or-evaluating-3d-printing-7000032219/>.
3. Caffrey T. 3D Printing Builds Up its Manufacturing Resume / T. Caffrey, T. Wohler. // Manufacturing Engineering. – 2014. – С. 61–68.
4. Dignan L. 3D Printing Turns Strategic in 2015, says Gartner [Электронный ресурс] / Larry Dignan // ZDNet. – 2014. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.zdnet.com/3d-printing-turns-strategic-in-2015-says-gartner-7000034421/>.
5. Свойства и области применения АБС-пластиков [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: [http://polymer.ru/letter.php?n\\_id=5138&cat\\_id=3&page\\_id=1](http://polymer.ru/letter.php?n_id=5138&cat_id=3&page_id=1).
6. FDM Technology [Электронный ресурс] // Stratasys – Режим доступа к ресурсу: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>.
7. MakerBot MakerWare 2.4.1 Release [Электронный ресурс] // MakerBot. – 2013. – Режим доступа ко ресурсу: <http://www.makerbot.com/blog/2013/12/09/makerbot-makerware-2-4-1-release/>.