

МЕХАНИКА

УДК 621.983

**ПРОГРЕССИВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ\***

Д.М. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, А.С. УШАКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры самолето- и вертолетостроения. E-mail: petroffdm91@gmail.com

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры самолето- и вертолетостроения. E-mail: jeridy@mail.ru

В статье проведен обзор актуальных методов изготовления листовых деталей. С каждым годом форма деталей становится более сложной, а требования в отношении качества к ним растут. Это приводит к проблеме технологического обеспечения их производства, к созданию и поиску новых методов производства. Традиционные методы формообразования деталей летательных аппаратов основаны на «быстром», пластическом деформировании, что приводит к образованию микротрещин и, как следствие, к снижению остаточного ресурса детали. Также к недостаткам традиционных методов стоит отнести и повышенную трудоемкость технологического процесса. Например, при штамповке падающими молотами, которая в данный момент является одним из основных методов изготовления деталей со сложными очертаниями, качество деталей во многом определяется квалификацией рабочего. Значительное время при данном типе штамповки занимает промежуточная термообработка заготовок, доля которой может достигать до 70 % всего времени изготовления детали. В рамках настоящей статьи проведен сравнительный анализ перспективных методов формообразования с традиционными методами. Описываются наиболее перспективные методы формообразования деталей сложных контуров, в частности деталей, имеющих сложную аэродинамическую форму. Особое внимание в статье уделяется магнитно-импульсной обработке материалов и формованию деталей в режимах ползучести, близких к сверхпластичности. Особенности указанных методов заключаются в использовании сравнительно низких технологических нагрузок, которые, как правило, не превышают предела упругости материала, возможность проведения термообработки одновременно с формовкой. При современных реалиях производства, известных концепциях обеспечения качества конечного продукта эти методы могут найти широкое применение в различных отраслях машиностроения.

**Ключевые слова:** листовые детали, формообразование, магнитно-импульсная обработка, штамповка, ползучесть, сверхпластичность, ресурсосберегающие технологии, пластичность

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-2-131-142

---

\* Статья получена 14 апреля 2016 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Требования к изделиям в авиапромышленности определяются такими факторами, как вес, долговечность и требования аэродинамики и др. Это приводит к известным конструкторским и технологическим трудностям, связанным с появлением габаритных деталей сложных форм и конфигураций, отсюда большие затраты на технологическую подготовку производства [9].

Традиционные методы производства листовых деталей имеют ряд ограничений, которые учитываются также в конструкции изделия в целом еще на этапе конструктивно-технологического членения планера, что приводит к увеличению номенклатуры используемых сборочных единиц. Также без внимания не остается и вопрос ресурса готового изделия и его обеспечения по возможности с минимальными затратами. В дополнение к этому существуют труднодеформируемые материалы, использование в производстве которых также встречает определенные технологические трудности. В частности, за рубежом на примере истребительной авиации США использование титановых сплавов в конструкциях увеличилось с 21 % до 39 %.

Из вышесказанного следует, что немаловажным фактором для производства деталей является задача создания и внедрения новых высокоэффективных малоотходных технологий, обеспечивающих максимально возможное высокое качество изделий, экономию материальных и энергетических ресурсов, повышение производительности труда и охрану окружающей среды.

В настоящее время разработаны и в разной степени внедрены такие прогрессивные технологии изготовления листовых деталей, как магнитно-импульсная штамповка, пневмотермическое формование в режимах сверхпластичности, формование в режимах ползучести.

## 1. АНАЛИЗ И ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

В настоящее время основной объем листовых деталей и пластин изготавливается с использованием пластичного деформирования материалов в холодном или горячем состоянии. Также в последнее время прослеживается тенденция к использованию следующих прогрессивных методов формоизменения:

- 1) деформирование в режимах сверхпластичности;
- 2) деформирование в режимах ползучести;
- 3) магнитно-импульсная обработка металлов.

Принцип *деформирования в режимах сверхпластичности* заключается в нагреве заготовки до теплового состояния, равного половине температуры

плавления с последующим деформированием в необходимую конфигурацию. Как правило, для нормального протекания этого процесса материал специально подготавливают таким образом, чтобы он имел мелкий (менее 20 мкм) размер зерна. Основным способом формования листовых деталей в режиме сверхпластичности является пневмотермическое формование (рис. 1) [1].

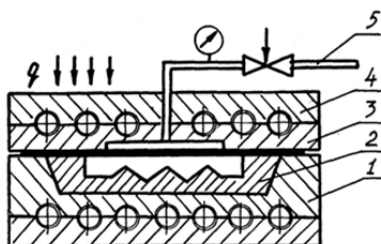


Рис. 1. Схема процесса пневмотермического формования

Достоинства данного метода:

- 1) возможность производства более сложных по конфигурации изделий;
- 2) низкие значения усилий, давлений процесса;
- 3) широкий спектр возможностей беспрессовой штамповки;
- 4) высокая точность формируемых изделий вследствие хорошего воспроизведения формы и отсутствия пружинения, что создает благоприятные предпосылки бездоводочной штамповки;
- 5) относительная простота и маневренность процесса.

Недостатки:

- 1) малая скорость процесса деформирования;
- 2) сильно выраженная разнотолщинность формируемых деталей;
- 3) технологические трудности осуществления изготовления крупногабаритных деталей;
- 4) сложность изготовления цельнофрезерованных оребренных панелей и толстостенных листовых деталей.

В основе технологии обработки материалов давлением в *режиме ползучести* заложен процесс необратимого деформирования материалов под действием упругих (или близких к ним) напряжений, т. е. процесс формообразования происходит не пластически, а за счет деформаций ползучести, которые развиваются с течением времени при повышенной температуре. Процесс позволяет совместить термообработку с процессом формообразования. Заметное снижение усилий формообразования по сравнению с холодной и даже с горячей штамповкой позволяет обойтись без уникального прессового оборудова-

ния, а увеличение длительности процесса формоизменения обеспечивает эффективный контроль и управление процессом [2].

Впервые ползучесть к изготовлению деталей была применена в 70–80-х годах XX века сотрудниками Новосибирского филиала НИИТ под руководством Г.А. Раевской. В рамках работ по оптимизации технологического процесса формования деталей сложных аэродинамических форм был предложен принципиально новый метод изготовления листовых деталей при медленном нагружении. В результате последующих испытаний было выявлено, что изготовленные по предложенному методу детали имеют гораздо больший остаточный ресурс по сравнению с традиционными методами формообразования. В результате был сформулирован следующий тезис: «Проигрыш во времени в процессе формования дает выигрыш в качестве материала полученной детали» [3].

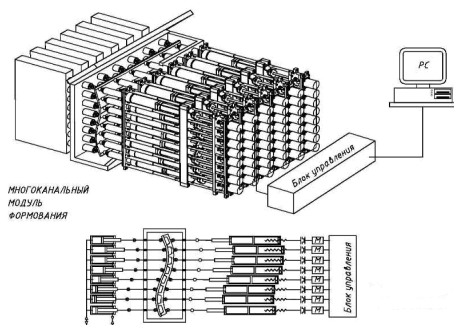


Рис. 2. Кинематическая схема экспериментального варианта модуля

Производство изделий с использованием крупногабаритных панелей из высокопрочных материалов (алюминий, титан, сталь) трудоемкое. Вместе с широким применением прогрессивных методов металлообработки на станках с ЧПУ в процессах формообразования продолжается применение ручного труда.

Технология обработки материалов давлением в режимах ползучести позволяет целиком автоматизировать операцию формообразования крупногабаритных монолитных панелей со сложными поверхностями. На рис. 2 изображена схема экспериментального многопуансонного модуля для формообразования деталей сложных геометрических форм. Модуль предназначен для точного формообразования и правки гладких и оребренных крупногабаритных панелей одинарной и двойной кривизны в режимах ползучести и близких к

сверхпластичности посредством перемещения двух систем дискретно установленных штоков, расположенных оппозитно в соответствии с поверхностью детали. Для подкрепленных панелей штоки гидравлических пуансонов устанавливаются против пересечения ребер, для гладких – рядами по ширине панели с расстоянием между штоками 80 мм, расстояние между рядами 300 мм. На концах штоков для формоизменения заготовки без вмятин и гофрообразований устанавливаются поворотные головки. Перемещения каждого штока задаются программно с использованием шаговых двигателей типа ДШИ-200, что позволяет формировать детали двойной кривизны за один технологический цикл (переход) [4].

Использование данной технологии позволяет существенно повысить качество деталей, а именно прочностные свойства и ресурс. Так, этим методом вполне оправдано изготовление ответственных узлов и деталей. К недостаткам стоит отнести длительность процесса и относительную сложность реализации.

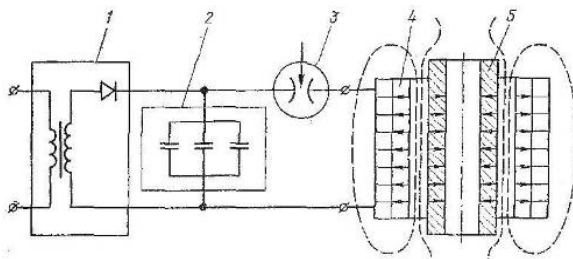


Рис. 3. Принципиальная схема процесса магнитно-импульсной обработки металлов

*Магнитно-импульсная обработка металлов* основывается на использовании сил электромеханического взаимодействия между вихревыми токами, наведенными в стенках обрабатываемой детали при пересечении их силовыми магнитными линиями импульсного магнитного поля, и самим магнитным потоком импульса. В отличие от других известных методов деформирования, при магнитно-импульсной обработке электрическая энергия непосредственно преобразуется в механическую и импульс давления магнитного поля действует непосредственно на заготовку без участия какой-либо передающей среды [8]. Это позволяет осуществлять деформирование как в вакууме, так и в любой среде, не препятствующей распространению магнитного поля. В установку для магнитно-импульсной обработки обычно входят зарядное устройство 1, состоящее из высоковольтного трансформатора и выпрямителя, коммутирующее устройство 3, включающееся при подаче поджигающего им-

пульса на вспомогательный электрод и вызывающее разряд батареи высоковольтных конденсаторов 2 на индуктор 4.

При прохождении разрядного тока через индуктор в окружающем его пространстве образуется электромагнитное поле, которое в соответствии с законом электромагнитной индукции наводит токи в заготовке 5. В результате взаимодействия тока, наведенного в заготовке, с электромагнитным полем индуктора возникают динамические воздействия на заготовку и ее деформация.

Интенсивное развитие импульсной обработки давлением связано с изготовлением сложных деталей ЛА, в которых при получении традиционными видами штамповки возникают технологические дефекты. Реализация импульсных методов нагружения осуществляется путем использования различных сочетаний энергоносителей (взрывчатые вещества, сжатые газы, электрический ток) и передающих давления на заготовку. Общим для всех процессов является импульсное силовое воздействие на обрабатываемый материал.

Магнитно-импульсная обработка (МИО) получила интенсивное развитие благодаря работам Л.Т. Хименко, В.А. Глущенкова, Г.М. Лебедева, Е.Г. Иванова, Ю.А. Попова, В.Б. Юдаева и других [5–7]. Проведение первых работ по ее промышленному использованию относится к началу 1960-х гг.

Развитие обработки деталей ИМП в основном идет по двум направлениям:

- формообразование тонкостенных деталей, сборки и сварки;
- улучшение физико-механических свойств и структуры электропроводных материалов, увеличение статической и усталостной прочности и долговечности деталей [15].

## **2. ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРЕССИВНЫХ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Использование указанных методов в промышленности обусловлено рядом факторов:

- 1) геометрический образ изготавливаемой детали;
- 2) технологические свойства материала детали;
- 3) перспективы уменьшения доли ручного труда в технологическом цикле;
- 4) новые технологические и конструктивные возможности, связанные с оптимизацией конструкции и технологического процесса.

Учитывая влияние этих факторов, выбор падает на тот или иной способ формообразования.

Опыт использования пневмотермического формования за рубежом довольно широк. Впервые вопрос о практическом применении сверхпластичности был поставлен Бэкофеном, Тернером и Эвери в 1964 г., когда было доказано проявление эффекта сверхпластичности при различных схемах напряженного состояния, характерных для различных процессов обработки металлов давлением. С тех пор применение данного метода только расширяется, в особенности по отношению к титановым сплавам ввиду их низкой технологичности при использовании традиционных методов. Многие титановые детали, такие как патрубки, трубные коллекторы, обтекатели рельсов закрылков, изготавливаются методом пневмотермического формования. Наглядной иллюстрацией оптимизации конструкции самолета служит перепроектирование хвостового отсека истребителя F-15E под данную технологию, что привело к значительному сокращению числа деталей и, как следствие, к сокращению стоимости на 44 % и сокращению массы на 15 %. В России данный метод формообразования пока не получил широкого распространения, однако в данной области проводится много исследований, в частности, в НИ ИрГТУ [1].

Использование установок формования в режимах ползучести осуществляется, например, на НАЗ им. В.П. Чкалова. Установка состоит из двух частей – подвижной и неподвижной, между которыми установлена разъемная тепловая камера. Одна из полукамер закреплена в подвижной части установки, другая в неподвижной. Тепловая камера обеспечивает нагрев заготовки до заданной температуры, для чего на вертикальных стенках полукамер смонтированы электронагреватели.

Формообразование панели осуществляется с помощью силовозбудителей, перемещающих формообразующие штоки. Управление – серводвигатель, редуктор, специализированное программное обеспечение [4].

В настоящее время производится гибка плит из титанового сплава АБВТ-20 толщиной 17 мм при температуре 850 °С с габаритами 800 × 2000 мм (самолетная броня изделий СУ-25, СУ-25Б).

Модульность установки позволяет набирать размер для больших длин деталей.

Особенно эффективно использование экспериментального модуля и технической установки УФП-1М взамен традиционных технологий с применением ручного труда (гибка впередвижку на прессах, многопереходная штамповка, дробеструйная обработка) в условиях мелкосерийного производства для изготовления и правки несущих элементов конструкций в режимах ползучести при температурах старения и близких к температуре сверхпластичности

(панели, динномерные жесткости), образующих сложный аэро- и гидродинамический контур изделий авиа- и судостроения, энергетического машиностроения.

Зарубежные аналоги установок штокового типа имеют фиксированные формы матриц и пуансона, постоянные и равные скорости перемещения штоков, что не позволяет формообразовывать детали двойной кривизны за один переход. Технология и оборудование не имеют зарубежных аналогов.

Изготовлен и апробирован экспериментальный образец автоматизированного многопуансонного модуля с изменяемой в процессе деформирования геометрией оснастки на 48 пар штоков (ИГиЛ СО РАН). Разработанный в ОАО «Новосибирский НИИ авиационной технологии и организации производства» (НовосибНИАТ) совместно с ИГиЛ СО РАН и ООО «НТЦ-Ползуется» технический образец многопуансонного оборудования эксплуатируется на Новосибирском авиационном производственном объединении им. В.П. Чкалова.

Во множестве машиностроительных компаний был введен в производство метод магнитно-импульсной обработки металлов.

Например такие компании, как Ford motor company, Volkswagen AG, Honda motor company используют данную технологию для изготовления деталей элементов кузова [10–12].

Компания Maxwell-Magneform использует метод магнитно-импульсной штамповки для изготовления деталей: валов приводов, амортизаторов, а также создание труб различных конфигураций и длин.

Также в стороне не остались и авиастроительные предприятия. Например, компания Boeing с помощью метода магнитно-импульсной обработки металлов не только производит обшивочные детали, но и осуществляет внешнюю рихтовку этих деталей, уже установленных на самолет [13].

Компания Harvan Engineering, Ltd – Woodstock, ON с помощью этого метода изготавливает детали для таких отраслей промышленности, как космическая, сельскохозяйственная, лесоводственная, медицинская и военная промышленность [14].

На данный момент есть несколько основных установок, которые предприятия или дорабатывают под свои требования, или используют с теми характеристиками, которые в них заложены производителем.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной статье представлены и описаны прогрессивные методы формообразования листовых деталей, а также оборудование, необходимое для их осуществления. Данные методы получили в целом ограниченное распростра-



нение, что обусловлено спорами относительно экономической целесообразности, относительной сложностью технологических расчетов и отсутствием структурированной инженерной и теоретической базы. Работы в этом направлении продолжают проводиться, и, возможно, в будущем этот метод производства деталей найдет более широкое применение не только в России, но и за рубежом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников А.В., Шмаков А.К. Пневмотермическая формовка трехслойных клиновидных панелей с подпором обшивок // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 11 (82). – С. 52–57.
2. Патент 2251464 Российская Федерация. Устройство формования / И.Д. Клопотов, И.В. Любашевская, Г.А. Раевская, Л.Л. Рублевский, О.В. Соснин. – № 2002119982/02; заявл. 22.07.02; опубл. 10.05.2005, Бюл. № 13.
3. Горев Б.В., Раевская Г.А., Соснин О.В. К вопросу об использовании ползучести в технологии формирования изделий // Динамика сплошной среды. – 1977. – Вып. 30. – С. 141–145.
4. Горев Б.В., Соснин О.В., Загарин Ю.В. Технология процесса формообразования деталей двойной знакопеременной кривизны в режиме ползучести и устройство для его осуществления // Материалы III международного технологического конгресса «Военная техника, вооружение и технологии двойного применения». – Омск: ОМГУ, 2005. – С. 117–119.
5. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с.
6. Отбортовка отверстий и наружного контура заготовок из листового металла ИМП / Г.М. Лебедев, А.Д. Комаров, Г.З. Исарович, Д.Н. Лысенко // КШП. – 1970. – № 4. – С. 25–28.
7. Попов Ю.А., Иванов Е.Г. К выбору оптимальных электрических режимов магнитно-импульсной обработки металлов // Исследование новых электрофизических и электротермических установок. – Чебоксары, 1972. – С. 23–26.
8. Курлаев Н.В., Гулидов А.И. Влияние импульсной обработки на технологические дефекты деталей. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 168 с.
9. Курлаев Н.В., Нарышева Г.Г., Рынгач Н.А. Теоретические основы самолето- и вертолетостроения: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 100 с.
10. Gallagher H. Metal stamping and electromagnetic forming: new process improves material formability, reduces wrinkling [Electronic resource] // The

Fabricator. – 2001. – N 5. – Available at: <http://www.thefabricator.com/article/stamping/metal-stamping-and-electromagnetic-forming-new-process-improves-material-formability-reduces-wrinkling> (accessed: 24.06.2016).

11. Особенности магнитно-импульсной обработки металлов в технологиях современности / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Щ.В. Гнатова, А.А. Степанов, Е.А. Чаплыгин // Электротехника и электромеханика. – 2011. – № 1. – С. 72–75.

12. Magneform corp. About [Electronic resource]. – 2016. – Available at: <http://www.magneform.com/about.html> (accessed: 24.06.2016).

13. Батыгин Ю.В., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А. Реализация и перспективы магнитно-импульсных методов в развитии передовых технологий современности // Автомобильный транспорт. – Харьков, 2006. – № 18. – С. 83–87.

14. Harvan Engineering LTD. [Electronic resource]: website. – Woodstock, Canada, 2013. – Available at: <http://www.harvan.com/index.html> (accessed: 24.06.2016).

15. Смыкание несплошностей в структуре материалов деталей при магнитно-импульсной обработке / Н.В. Курлаев, А.И. Гулидов, Н.А. Рынгач, В.В. Красовский // Научный вестник НГТУ. – 2002. – № 1. – С. 131–140.

***Петров Денис Михайлович***, аспирант кафедры самолето- и вертолетостроения Новосибирского государственного технического университета. Научные интересы: ползучесть, механика деформируемого твердого тела, технология изготовления деталей ЛА. E-mail: [petroffdm91@gmail.com](mailto:petroffdm91@gmail.com)

***Ушаков Александр Сергеевич***, аспирант кафедры самолето- и вертолетостроения Новосибирского государственного технического университета. Научные интересы: магнитно-импульсная обработка, сверхпластичность, механика деформируемого твердого тела. E-mail: [jeridy@mail.ru](mailto:jeridy@mail.ru)

## Sheet parts manufacturing progressive methods\*

D.M. Petrov<sup>1</sup>, A.S. Ushakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, the post-graduate student, Aircraft and Helicopter Engineering department. E-mail: petroffdm91@gmail.com

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, the post-graduate student, Aircraft and Helicopter Engineering department. E-mail: jeridy@mail.ru

The article gives a review about sheet parts manufacturing methods of current interest. A shape of parts is getting more complex year by year and the requirements of quality are rising. This leads to searching and creation of new production approaches. The conventional approaches of aviation sheet parts manufacturing are based on 'fast' plastic deformations and can lead to microcracks is occurring. Also, the disadvantage of the conventional methods is a high laboriousness. In this article a comparison between conventional methods and progressive ones has been made. A special attention paid to a magnetic-pulse treatment of materials and creep forming processes. The features of these methods consist in a comparatively low loading and the ability to provide a heat treatment simultaneously with a forming.

**Keywords:** sheet metal parts, forming, magnetic-pulse treatment, stamping, creep, superplasticity, resource-saving technologies, plasticity

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-2-131-142

## REFERENCES

1. Kolesnikov A.V., Shmakov A.K. Pnevmotermicheskaya formovka trekhslonnykh klinovidnykh panelei s podporom obshivok [Thermal-pneumatic forming and diffusion bonding of three-layer wedge-shaped panels]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2013, no. 11 (82), pp. 52–57.
2. Klopotov I.D., Lyubashevskaya I.V., Raevskaya G.A., Rublevskii L.L., Sosnin O.V. *Ustroistvo formovaniya* [Shaping apparatus]. Patent RF, no. 2251464, 2005.
3. Gorev B.V., Raevskaya G.A., Sosnin O.V. K voprosu ob ispol'zovanii polzuchesti v tekhnologii formirovaniya izdelii [On creep usage in forming technology]. *Dinamika sploshnoi sredy*, 1977, iss. 30, pp. 141–145.
4. Gorev B.V., Sosnin O.V., Zagarin Yu.V. [Creep forming technology and a machine for it]. *Materialy III mezhdunarodnogo tekhnologicheskogo kongressa "Voennaya tekhnika, vooruzhenie i tekhnologii dvojnogo primeneniya"* [Materials of 3<sup>rd</sup> International technological congress "Military equipment, armor and technologies of double applying"], Omsk, 2005, pp. 117–119. (In Russian)

---

\* Received 14 April 2016.

5. Belyi I.V., Fertik S.M., Khimenko L.T. *Spravochnik po magnitno-impul'snoi obrabotke metallov* [Magnetic-pulse treatment reference book]. Khar'kov, Vishcha shkola Publ., 1977. 168 p.
6. Lebedev G.M., Komarov A.D., Isarovich G.Z., Lysenko D.N. Otbortovka ot-verstii i naruzhnogo kontura zagotovok iz listovogo metalla IMP [Beading of holes and exterior contour from sheet metal through MPT]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo – Forging and Stamping Production*, 1970, no. 4, pp. 25–28.
7. Popov Yu.A., Ivanov E.G. K vyboru optimal'nykh elektricheskikh rezhimov magnitno-impul'snoi obrabotki metallov [On optimal choice of MPT electric regimes]. *Issledovanie novykh elektrofizicheskikh i elektrotermicheskikh ustanovok*. Cheboksary, 1972, pp. 23–26.
8. Kurlaev N.V., Gulidov A.I. *Vliyanie impul'snoi obrabotki na tekhnologicheskie defekty detalei* [A MPT effect on technological defects of parts]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2005. 168 p.
9. Kurlaev N.V., Narysheva G.G., Ryngach N.A. *Teoreticheskie osnovy samo-lety- i vertoletostroeniya* [A theoretical foundations of aircraft and helicopter engineering]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013. 100 p.
10. Gallagher H. Metal stamping and electromagnetic forming: new process improves material formability, reduces wrinkling. *The Fabricator*, 2001, no. 5. Available at: <http://www.thefabricator.com/article/stamping/metal-stamping-and-electromagnetic-forming-new-process-improves-material-formability-reduces-wrinkling> (accessed 24.06.2016)
11. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Gnatova Shch.V., Stepanov A.A., Chaplygin E.A. Osobennosti magnitno-impul'snoi obrabotki metallov v tekhnologiyakh sovremennosti [A MPT features in modern technologies]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical Engineering & Electromechanics*, 2011, no. 1, pp. 72–75.
12. Magneform corp. About. 2016. Available at: <http://www.magneform.com/about.html> (accessed 24.06.2016)
13. Batygin Yu.V., Serikov G.S., Chaplygin E.A. Realizatsiya i perspektivy magnitno-impul'snykh metodov v razvitii peredovykh tekhnologii sovremennosti [Realization and perspectives of magnetic-pulse methods to develop advanced technologies]. *Avtomobil'nyi transport – Automobile Transport*, 2006, no. 18, pp. 83–87.
14. *Harvan Engineering LTD.*: website. Woodstock, Canada, 2013. Available at: <http://www.harvan.com/index.html> (accessed 24.06.2016).
15. Kurlayev N.V., Gulidov A.I., Ryngach N.A., Krasovskii V.V. Smykanie nesploshnopei v strukture materialov detalei pri magnitno-impul'snoi obrabotke [An interlocking of discontinuities in material structures at MPT]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2002, no. 1, pp. 131–140.