

УДК 621.983.044.7, УДК 539.374

## **Решение практических проблем применения магнитно-импульсной обработки для повышения долговечности тонколистовых деталей летательных аппаратов\***

**К.Н. БОБИН, Н.А. РЫНГАЧ, Н.В. КУРЛАЕВ**

*Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет*

Проводились экспериментальные исследования влияния магнитно-импульсной обработки на технологические дефекты сплошности алюминиевых сплавов. Для этого были изготовлены методами статического пластического деформирования кольцевые образцы из Д16АТ л. 1,5. Часть полученных образцов дополнительно обрабатывалась импульсным магнитным полем. Режимы обработки импульсным магнитным полем подбирались по ранее полученным авторами данным численного моделирования. Электронная микроскопия материала кольцевых тонколистовых образцов в зонах больших пластических деформаций показала уменьшение объема технологических дефектов сплошности при магнитно-импульсной обработке. Была оценена достоверность проведенных в предыдущих исследованиях численных расчетов уменьшения объема дефектов сплошности при магнитно-импульсной обработке. Экспериментальные результаты по уменьшению объема пор при магнитно-импульсной обработке отличаются от результатов численного моделирования приблизительно в 1,3 раза, что свидетельствует об удовлетворительном соответствии расчетных данных с экспериментом. Предлагаются новые схемы индукторов для магнитно-импульсной обработки давлением, в том числе и для обработки уменьшающей объем дефектов сплошности. Токоведущую спираль в индукторах предлагается делать комбинированной, состоящей из двух разных металлов. Это позволяет обеспечивать как высокую электропроводность по верхним слоям (за счет использования меди), так и конструкционную прочность (за счет использования нержавеющей стали).

**Ключевые слова:** штамповка, магнитно-импульсная обработка, индукторы, пористость, усталостная долговечность, тонколистовые детали, алюминиевые сплавы, летательные аппараты

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время растет интерес к штамповочным технологиям, которые позволяют получать качественные детали за возможно меньшее количество технологических переходов, либо получать детали такой формы, которая недостижима любыми другими методами штамповки [1–3]. Также растет интерес к технологиям, которые позволяют повышать долговечность металлов и сплавов [4].

Одной из технологий, которая может удовлетворить эти требования, является штамповка импульсным магнитным полем (ИМП). Она имеет более широкие технологические возможности по сравнению с традиционными технологиями штамповки. Кроме того, из результатов теоретических работ [5–7] следует, что магнитно-импульсная обработка (МИО) при определенных параметрах обработки положительно сказывается на объеме внутренних дефектов сплошности деталей летательных аппаратов, а значит и на долговечности деталей. Однако имеются сложности с практической реализацией обработки. Во-первых, отсутствуют данные об экспериментальных исследованиях по влиянию обработки ИМП на структуру реальных тонколистовых штампованных деталей летательных аппаратов. Во-вторых, отсутствует инст-

---

\* Статья получена 1 марта 2013 г.

Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта Министерства образования и науки РФ № 7.822.2011.

румент для МИО, который будет иметь достаточную прочность для проведения обработки уменьшающей объем дефектов сплошности.

Поэтому были поставлены задачи: провести экспериментальные исследования по уменьшению объема дефектов сплошности при МИО на реальных деталях и разработать конструкции инструмента для МИО уменьшающей объем дефектов сплошности.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Для выполнения первой задачи были изготовлены штамповкой эластичной средой кольцевые образцы, часть из которых затем подвергалась МИО.

Высота отбортовки и радиусгиба отбортовки были рассчитаны с условием, что деформации на кромке отбортовки образцов и радиусной части отбортовки будут соответствовать максимально возможным за один переход статическим. Наружный и внутренний диаметры заготовки соответствовали наружному и внутреннему диаметрам рабочей зоны индуктора для штамповки (рис. 1). Использовался алюминиевый сплав Д16АТ л. 1,5.

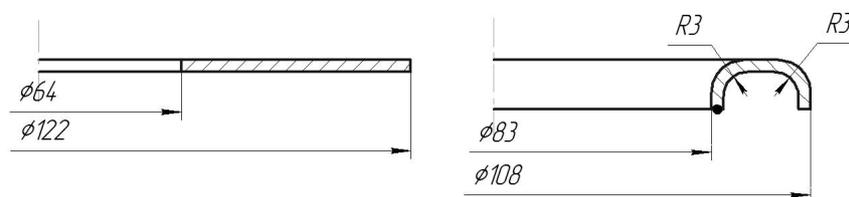


Рис. 1. Геометрические размеры заготовки и кольцевого образца

Статическое деформирование производилось на гидропрессе П-125 в контейнере с эластичной средой марки СКУ7Л. Материал формблока – сталь 45. МИО осуществлялась на установке МИУ-15. Использовался цилиндрический многovitковый индуктор для раздачи (7 витков, размеры токопровода  $3 \times 7$ , диаметр рабочей зоны 82 мм). В качестве жесткой стенки использовался тот же формблок, что и для изготовления кольцевых образцов. МИО подвергалась кромка отбортовки кольцевого образца. Схема обработки приведена на рис. 2. Микроскопия проводилась с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO-420.

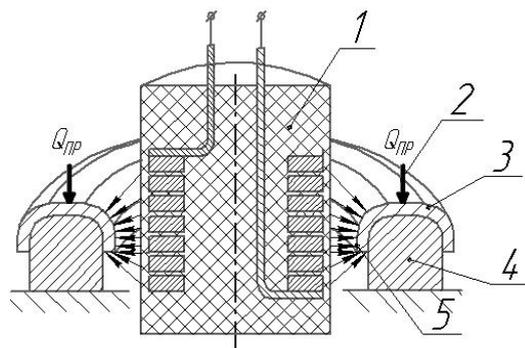


Рис. 2. Схема обработки кольцевого образца давлением ИМП:

1 – индуктор; 2 – прижим с усилием  $Q_{пр}$ ; 3 – образец;  
4 – формблок; 5 – зона обработки

Приготовление микрошлифов проводили по стандартным методикам, включающим операции шлифования на абразивных шкурках, полирования с использованием алмазных паст и химического травления. Микроскопии подвергались участки на кромке отбортовки за пределами скин-слоя (0,7...1,2 мм) и основного влияния импульсных токов, вдоль проката. Типовые

микрошлифы представлены на рис. 3–5. Оценка коэффициента пористости  $\alpha$ , равного отношению объема пор к общему объему материала, проводилась с помощью электронной микроскопии образцов с использованием вероятностно-статистической методики.

Расчет режимов МИО производился по номограмме в работе [7]. Обработка образца осуществлялась десятью разрядами МИУ. Энергия одного разряда МИУ составляла  $W_H \approx 5,08$  кДж. Удельная энергия тока в заготовке, отнесенная к единице площади обработки, имела значение  $w^* \approx 0,5$  Дж/мм<sup>2</sup>. Уменьшение объема пор в обработанном ИМП деформированном образце достигает  $\approx 33$  %.

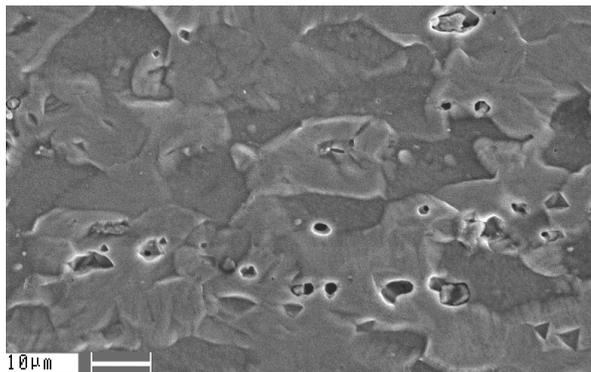


Рис. 3. Микрошлиф сплава Д16АТ (исходный,  $\alpha \approx 0,05$ )

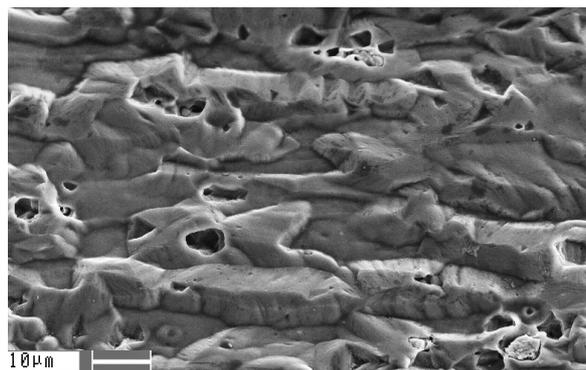


Рис. 4. Микрошлиф сплава Д16АТ (штамповка эластичной средой, кромка отбортовки,  $\alpha \approx 0,48$ )

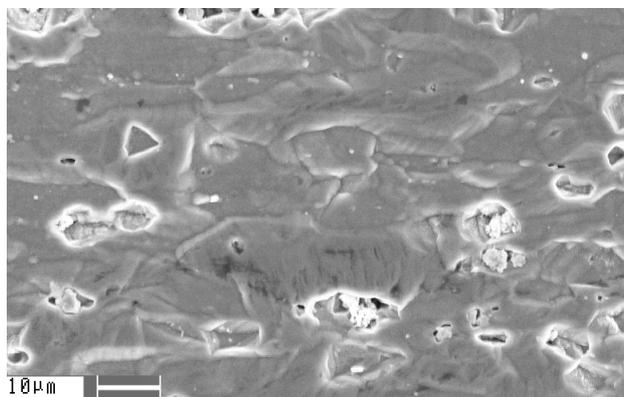


Рис. 6. Микрошлиф сплава Д16АТ (штамповка эластичной средой с последующей обработкой ИМП, кромка отбортовки,  $\alpha \approx 0,32$ )

Согласно математическому моделированию [7] для исходных параметров:  $\alpha_0 \approx 0,005$ ; алюминиевый сплав с динамическим пределом текучести  $Y_0 \approx 310$  МПа, при десяти разрядах с  $w^* \approx 0,5$  Дж/мм<sup>2</sup> – происходит сокращение пористости на 27 %. Таким образом, экспериментальные результаты по уменьшению объема пор при МИО отличаются от результатов численного моделирования приблизительно в 1,3 раза, что свидетельствует об удовлетворительном соответствии расчетных данных с экспериментом.

## 2. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

Основное отличие обработки ИМП уменьшающей объем дефектов сплошности от штамповки ИМП – это более высокие давления, необходимые для обработки. Для обработки ИМП уменьшающей объем дефектов сплошности можно использовать индуктора, аналогичных индукторам, применяемым для листовой штамповки: универсальные многовитковые индукторы и универсальные плоские многовитковые индукторы, но технологические возможности данных индукторов для упрочняющей обработки ИМП будут меньше. Лучшим решением для обработки ИМП уменьшающей дефектов сплошности в материалах тонколистовых деталей летательных аппаратов будет использование специальных индукторов.

Индукторы для МИО чаще всего изготавливаются из меди и алюминия [8, 9]. Также применяют бериллиевую бронзу, имеющую хорошую электропроводность и удовлетворительные механические характеристики. Попытки использовать высокопрочные алюминиевые сплавы в конструкции индукторов не дали ожидаемого результата из-за их низкой долговечности в условиях импульсного нагружения. Возможно изготовление токоведущих элементов из углеродистых и легированных сталей, однако такие индукторы имеют низкий к.п.д. передачи энергии в заготовку [9]. Основная часть электрической энергии преобразуется в тепло. В данной статье рассматриваются конструкции индукторов, которые позволяют повысить рабочее давление на обрабатываемую поверхность и долговечность самого индуктора.

Прочность индукторов обусловлена выбором материала токоведущей спирали. Например, наиболее подходящим материалом для индукторов для МИО сплава типа Д16АМ с динамическим пределом текучести  $Y_0 \approx 200$  МПа, учитывая, что при МИО давление импульсного магнитного поля может численно превзойти в 1,5...2,0 раза значение  $Y_0$ , будет бериллиевая бронза БрБ2 с пределом текучести  $\sigma_T = 500$  МПа. Однако высокочастотный ток по сечению индуктора при МИО распределяется неравномерно: падающая волна с индукцией  $B(0,t)$  проникает в металл заготовки и наводит в нем индукционный ток, плотность которого  $i$  и результирующее магнитное поле зависят от глубины  $x$  и времени  $t$ :

$$B(x,t) = B_m \cdot \exp\left(-\frac{x}{\Delta}\right) \cdot \sin\left(\omega t - \frac{x}{\Delta}\right), \quad (1)$$

где  $\Delta$  – это глубина проникновения электромагнитного поля в материал, равная такому расстоянию  $x$ , на котором амплитуда магнитной индукции и плотности тока уменьшаются в  $e$  раз;  $\omega$  – круговая частота электромагнитного поля. Величина  $\Delta$  получила название “скин-слой” и приближенно можно считать, что все токи, проходящие через спираль индуктора и материал заготовки концентрируются в нем. Величина  $\Delta$  вычисляется по формуле

$$\Delta_{\text{инд}} = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \gamma \omega}}, \quad (2)$$

где  $\mu_0$  – это магнитная постоянная, равная  $1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м,  $\gamma$  – проводимость, величина обратная удельному сопротивлению См/м.

Частота тока при МИОМ находится в пределах 10...20 кГц, при этом толщина скин-слоя для медных сплавов не превышает 1 мм. Исходя из написанного выше, можно сделать вывод, что основная масса спирали индуктора предназначена для обеспечения жесткости индуктора, существенно не влияя на его электрические характеристики. Учитывая низкие механические

характеристики медных сплавов, индуктор приходится изготавливать достаточно массивным и ограничивать максимальное давление на заготовку, что, в свою очередь, снижает технологические возможности индуктора. Кроме того, для повышения электробезопасности индуктора применяются специальные бандажы из электроизоляционных материалов. Однако если разделить спираль индуктора на электрическую и силовую составляющие, то можно существенно повысить прочность и долговечность индуктора, в этом случае по проводящему контуру будет идти электрический ток, а силовое воздействие будет восприниматься прочным основанием.

Первой реализацией данной концепции был одновитковый разъемный индуктор для обжима трубчатых заготовок (наконечников электрожгутов, см. рис. 7) [10]. Данная схема была выбрана из-за простоты ее реализации. Токоведущая часть (3 и 4) представляет собой сменные медные полосы, всю силовую и тепловую нагрузку воспринимает массивный стальной корпус (1 и 2). Испытания данного индуктора не показали существенных различий по сравнению с режимами, полученными для индуктора, изготовленного полностью из бронзы [11]. Данный индуктор показал свою работоспособность и высокую ремонтпригодность, при этом он не требует дополнительного изменения технологических параметров процесса обжатия трубчатых наконечников.

Второй реализацией вышеназванной концепции был плоский многovitковый индуктор с биметаллической спиралью (медь–сталь), полученной сваркой взрывом (см. рис. 8). Токоведущая часть (1 и 7) представляет собой медную полосу на поверхности биметаллической спирали и приваренные к спирали медные полоски, используемые в качестве токовыводов. Всю силовую и тепловую нагрузку воспринимает стальная часть биметаллической спирали (1) и корпус индуктора (2–6) с винтами (8). Для электрической изоляции витков индуктора наиболее просто применять лавсановую пленку или ленту и пропитку эпоксидными смолами.

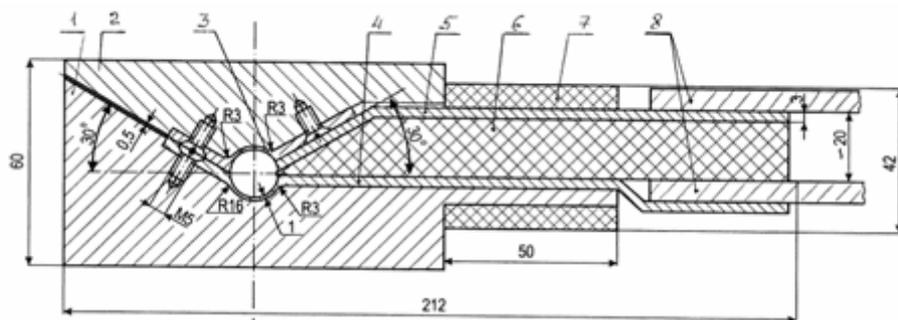


Рис. 7. Схема разъемного одновиткового индуктора:

1, 2 – полукорпус (сталь 30ХГСА); 3 – токовод рабочей зоны (бронза БрБ2); 4 – токовод рабочей зоны и МИУ (бронза БрБ2); 5 – токовывод к МИУ; 6 – изолирующая проставка (текстолит); 7 – бандаж (стеклоткань, пропитанная эпоксидным компаундом); 8 – токовыводы установки МИУ 20/5

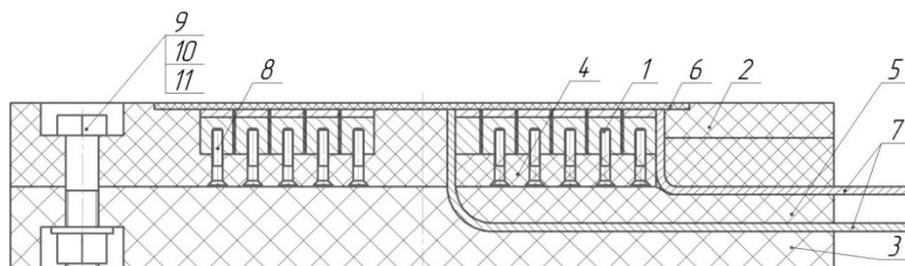


Рис. 8. Типовая конструкция многovitкового индуктора:

1 – спираль; 2 – обойма; 3 – корпус; 4, 5 – вставки; 6 – прокладка изоляционная; 7 – токовыводы; 8 – детали, соединяющие спираль с корпусом; 9–11 – детали, соединяющие обойму и корпус

Предполагается, что при МИО, уменьшающей объем дефектов сплошности, данный индуктор будет иметь высокую долговечность и высокий КПД.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показано уменьшение объема технологических дефектов сплошности в материалах кольцевых тонколистовых образцов при МИО. Результаты по уменьшению объема пор при МИО отличаются от результатов численного моделирования приблизительно в 1,3 раза, что свидетельствует об удовлетворительном соответствии расчетных данных с экспериментом. Предложены новые схемы индукторов для МИО, уменьшающей объем дефектов сплошности, со спиралью типа медь–сталь для обеспечения как высокой электропроводности по верхним слоям (медь), так и конструкционной прочности (сталь).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Белый И.В.** Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с.
- [2] Магнитно-импульсная обработка материалов. Производственная инструкция № 1. Основы МИОМ. Физические основы и область применения. – Самара: СГАУ, 2007. – 100 с.
- [3] **Mala Seth.** Formability of steel sheet in high velocity impact / Mala Seth, Vincent J. Vohnout, Glenn S. Daehn // *Journal of Materials Processing Technology*. – 168(2005). – P. 390–400.
- [4] **Гулидов А.И.** Влияние импульсной обработки на дефекты сплошности и долговечность материалов / А.И. Гулидов Н.В. Курлаев, Л.А. Мерзиевский, Н.А. Рынгач // *Научный вестник НГТУ*. – 2005. – № 1(19). – С. 97–110.
- [5] **Хардин В.Б.** О возможности взаимодействия дислокаций с электронным потоком в процессе действия сильных импульсных токов / В.Б. Хардин // *Теория и технология обработки металлов давлением: Межвузовский сборник*. – 1975. – Вып. 71. – Куйбышев. – С. 86–90.
- [6] **Курлаев Н.В.** Влияние импульсной обработки на технологические дефекты деталей / Н.В. Курлаев, А.И. Гулидов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 168 с.
- [7] **Курлаев Н.В.** Уменьшение дефектов сплошности в материалах штампуемых авиационных деталей / Н.В. Курлаев, А.И. Гулидов, К.Н. Бобин, Н.А. Рынгач // *Авиационная промышленность*. – 2009. – № 2. – М. – С. 42–46.
- [8] **Талалаев А.К.** Индукторы и установки для магнитно-импульсной обработки металлов / А.К. Талалаев. – М.: Информтехника, 1992. – 143 с.
- [9] **Барвинок В.А.** Выбор материалов для изготовления индукторных систем / В.А. Барвинок, Ю.Е. Паламарчук, А.Н. Кирилин и др. // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева*. – 2008. – № 1. – С. 97–102.
- [10] **Гулидов А.И.** Численное моделирование процесса сборки наконечников с электрожгутами давлением импульсного магнитного поля / А.И. Гулидов, Н.В. Курлаев, Ю.С. Покалохин, Н.А. Рынгач, В.Б. Юдаев // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. – 2001. – № 8. – С. 38–42.
- [11] **Рынгач Н.А.** Определение эффективных режимов магнито-импульсной обработки для уменьшения объема пор в металлах и сплавах / Н.А. Рынгач // *Материалы Российской науч.-технич. конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (НГТУ, 21–23 апреля 2004 г.)*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 67–68.

### REFERENCES

- [1] Belyi I.V., Fertik S.M., Khimenko L.T. Spravochnik po magnitno-impul'snoi obrabotke metallov [Reference book to magnetic-pulsed processing metals]. Khar'kov: vishcha shkola, 1977, 168 p.
- [2] Magnitno-impul'snaia obrabotka materialov. Proizvodstvennaia instruktssiia №1. Osnovy MIOM. Fizicheskie osnovy i oblast' primeneniia [Magnetic-pulsed processing of materials. The Production instruction 1. The Bases of magnetic-pulsed processing. Physical bases and application]. Samara: SSAU, 2007, 100 p.
- [3] Mala Seth, Vincent J. Vohnout, Glenn S. Daehn / Formability of steel sheet in high velocity impact // *Journal of Materials Processing Technology* 168(2005), pp. 390–400.
- [4] Gulidov A.I., Kurlaev N.V., Merzhievskii L.A., Ryngach N.A. Vliianie impul'snoi obrabotki na defekty sploshnosti i dolgovechnost' materialov [Influence of the pulsed processing on porosity and life duration of materials]. Nauch. vestnik NGTU, 2005, no. 1 (19), pp. 97–110.
- [5] Khardin V.B. O vozmozhnosti vzaimodeistviia dislokatsii s elektronnyim potokom v protsesse deistviia sil'nykh impul'snykh tokov [About possibility of the dislocation interaction with electron flow in process of the action of high pulse currents]. Mezhevuzovskii sbornik «Teoriia i tekhnologiia obrabotki metallov davleniem» [Collection «Theory and technology of the metal forming»], 1975, no. 71, pp. 86–90.
- [6] Kurlaev N.V., Gulidov A.I. Vliianie impul'snoi obrabotki na tekhnologicheskie defekty detalei [Influence of the pulsed processing on technological defects of the details]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2005, 168 p.

- [7] Kurlaev N.V., Gulidov A.I., Bobin K.N., Ryngach N.A. Umen'shenie defektov sploshnosti v materialakh shtampuemykh aviatsionnykh detalei [Reduction of porosity in aircraft pressed part]. *aircraft industry*, 2009, no. 2, pp. 42–46.
- [8] Talalaev A.K. Induktory i ustanovki dlia magnitno-impul'snoi obrabotki metallov [Coils and plants for magnetic-pulsed processing]. Moscow: informtekhnik, 1992, 143 p.
- [9] Barvinok V.A., Palamarchuk Iu.E., Kirilin A.N. i dr. Vychor materialov dlia izgotovleniia induktornykh sistem [Choice of materials for coil system]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva*, 2008, no. 1, pp. 97–102.
- [10] Gulidov A.I., Kurlaev N.V., Pokaliukhin Iu.S., Ryngach N.A., Iudaev V.B. Chislennoe modelirovanie protsesssa sborki nakonechnikov s elektrozhgutami davleniem impul'snogo magnitnogo polia [Numerical simulation of the process of the assembly lugs by pressure of the pulsed magnetic field]. *Press-forging production. Metal forming*, 2001, no. 8, pp. 38–42.
- [11] Ryngach N.A. Opredelenie effektivnykh rezhimov magnitno-impul'snoi obrabotki dlia umen'sheniia ob'ema por v metallakh i splavakh [Estimation effective conditions of magnetic-pulsed processing for reduction of the pore volume in metal and alloy]. *materialy Rossiiskoi nauchn.-tekhnich. Konferentsii «Nauka. Promyshlennost'. Oborona»*, 21–23 april, 2004 [*Proc. Rus. Conf. «Science. Industry. Defence»*]. Novosibirsk, 2004, pp. 67–68.

*Бобин Константин Николаевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры самолето- и вертолетостроения Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – импульсные методы обработки материалов. Имеет 12 публикаций. E-mail: yabkn@ya.ru

*Рынгач Николай Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры самолето- и вертолетостроения Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – импульсные методы обработки материалов. Имеет более 25 публикаций. E-mail: svb@craft.nstu.ru

*Курлаев Николай Васильевич*, доктор технических наук, профессор кафедры самолето- и вертолетостроения Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – импульсные методы обработки материалов. Имеет более 70 публикаций. E-mail: kurlayev@craft.nstu.ru

**K.N. Bobin, N.A. Ryngach, N.V. Kurlayev**

*Problem-solving of application of the magnetic-pulsed processing for increasing of the durability sheet details of aircrafts*

The experimental studies of the influence magnetic-pulsed processing on technological defects of porosity in aluminum alloys were conducted. For this duralumin ring samples were made by static plastic deformation. Some of this samples was in addition processed by magnetic-pulsed field. Process conditions of magnetic-pulsed processing were based on earlier got results of numerical modeling. The results of electron microscopy of the material of ring samples in zone greater plastic deformation has shown the reduction of the volume technological defect of porosity after magnetic-pulsed processing. Reliability of previous numerical calculations of the reduction of porosity after magnetic-impulse loading is estimated. The Experimental results on reduction of the pore volume after magnetic-pulsed processing differ from result of the numerical modeling approximately in 1,3 times that is indicative of satisfactory correspondence to calculated data with experiment. The new schemes of coils for magnetic-pulsed processing including for processing reduction of the volume pores are offered. Conductor coil in inductor is offered to do including of two various metals. This allows to provide as high conduction on upper layer (by reason of using copper), so and structural strength (by reason of using stainless steel).

**Key words:** forming, magnetic-pulsed processing, coil, porosity, fatigue life, sheet components, aluminum alloys, aircrafts.