

УДК 621.777.

Омаров Ш. А.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ФОРМОИЗМЕНЯЮЩИХ ОПЕРАЦИЙ

В настоящее время в машиностроении и авиастроении существует необходимость разработки новых технологий, обеспечивающих повышение производительности труда, снижение энерго- и материалоемкости, при этом необходимо, чтобы изготовленная продукция соответствовала всем техническим требованиям машиностроительных и авиакосмических производств.

Современный уровень развития вычислительной техники, их доступность для инженерных расчетов при проектировании процессов листовой штамповки позволяет с высокой точностью прогнозировать параметры напряженно-деформированного состояния заготовки.

В большинстве работ по исследованию предельного деформирования отмечается, что при динамическом нагружении диаграмма предельных деформаций лежит ниже по сравнению со случаем статических испытаний [1]. Поэтому целью настоящей работы было создание методики получения диаграммы предельных деформаций тонколистового металла для процессов формовки подвижными средами.

Впервые С. Келер (Stuart P. Keeler) предложил эмпирический критерий разрушения, базирующийся на измерении двух главных деформаций в плоскости листа в момент, предшествующий разрушению [2]. Келер построил кривую предельных деформаций для ряда углеродистых сталей при обеих положительных деформациях. Под началом разрушения в данном случае понимается потеря устойчивости листа при растяжении или, иными словами, момент начала видимого шейкообразования. Позднее Г. Гудвин (Gorton M. Goodwin) получил аналогичную кривую для случая, когда одна из деформаций отрицательна [3].

В настоящее время различают диаграммы предельных деформаций для вариантов, когда деформации измеряются в начале шейкообразования и когда измерение осуществляется при нарушении сплошности материала [4].

Существует достаточно много способов получения диаграмм предельных деформаций. Все они сводятся к тому, чтобы достичь разрушения листового материала при различных предсказуемых или измеримых деформированных состояниях [5].

Опыт показал, что применение традиционных технологий с сугубо механическими действиями для решения технологических задач по деформации металлических изделий, например, обжим, раздача, штамповка, доведение изгиба заготовки до необходимого уровня четкости, внешнее устранение вмятин на поверхности корпусов транспортных средств существующими традиционными методами обработки становится уже неприемлемым [6].

Магнитно-эластоимпульсная штамповка (МЭИШ) позволяет на магнитно-импульсных установках (МИУ) получать детали независимо от проводимости материала заготовки.

Интенсификации формоизменяющих операций, как правило, связаны с повышением предельной степени формоизменения. На предельную степень формоизменения листовых материалов в общем случае влияют большое число факторов, определяемых химическим составом материала, структурным состоянием, количеством неметаллических включений, состоянием поверхности и наличием микротрещин, а также другими физико-механическими характеристиками материала заготовки; детали и технологической оснастки; технологическими процессами, определяемыми видом напряженно-деформированного состояния деформируемой части заготовки, характером трения, скоростью деформирования, а также рядом других факторов, определяющих процесс проектирования и изготовления детали [7].

В рамках статьи проведен анализ особенностей магнитно-импульсной обработки металлов в современных обрабатывающих технологиях.

Так, основной помехой становится недостаточная пластичность обрабатываемого металла. При достижении определенного уровня механических нагрузок, необходимых для реализации поставленной производственной задачи, в зоне нагрузки происходит разрыв металла.

Не менее значимой и актуальной проблемой магнитно-импульсной обработки является проблема эффективности силового воздействия на тонкостенные металлы. Последнее определение объектов обработки, как известно, объединяет в совокупности их геометрические и электрофизические характеристики, а также временные параметры действующего поля. Фактически, тонкостенность означает режим интенсивного проникновения. Здесь имеет место не только известное из классики ослабление сил магнитного давления, но и проявление целого ряда сопутствующих физических эффектов, обусловленных «прозрачностью» обрабатываемой заготовки [8].

Как показано в работах по обработке давлением, высокоскоростное импульсное действие приводит к появлению нового качества в поведении обрабатываемого металла. Это новое качество получило название гиперпластичности. Практическое использование эффекта гиперпластичности позволяет деформировать без разрушения и штамповать изделия, производство которых невозможно известными методами.

Высокоскоростные методы формовки позволяют увеличить степень предельного формоизменения путем выхода за пределы диаграммы пластической неустойчивости. Это удобно иллюстрировать применением диаграммы предельной деформации по Смирнову-Аляеву, схема которой представлена на рис. 1. Эта диаграмма состоит из двух ветвей (1; 2), которые характеризуют: 1 – физическое разрушение металла за счет нарушения сплошности; 2 – начало пластической неустойчивости.

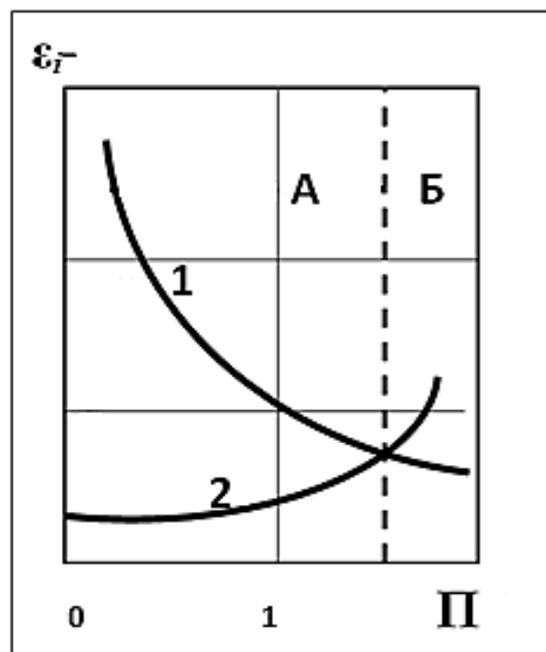


Рис. 1. Диаграмма предельной деформации:

1 – физическое разрушение металла за счет нарушения сплошности;
2 – начало пластической неустойчивости

Диаграмма строится в координатах: ε_i – предельная интенсивность логарифмических деформаций и $\Pi = \frac{3\sigma_0}{\sigma_i}$ – показатель жесткости схемы напряженного состояния.

Условно по величине показателя жесткости схемы напряженного состояния Π диаграмму можно разделить на две части по точке пересечения кривых 1 и 2. Увеличение предельного формоизменения может быть достигнуто в зоне Б, где пластическая неустойчивость

наступает раньше физического разрушения. Если в процессе деформирования вести нагружение за пределами пластической неустойчивости, но не достигая начала физического разрушения, то можно добиться увеличения предельного формоизменения. Все это может быть реализовано при импульсной формовке, за счет сообщения заготовке ограниченной кинетической энергии, и принципиально не достигнуто при статической формовке эластичными средами, когда запас потенциальной энергии деформируемой системы превышает работу пластического деформирования заготовки, необходимую для преодоления участка от кривой 2 до кривой 1. За счет этого в процессах высокоскоростного деформирования и значительной степени достигает увеличения предельного формоизменения по сравнению с квазистатическими процессами в среднем на 10–25 % [9].

На параметры предельного деформирования металла в значительной степени влияют факторы, определяемые схемой нагружения заготовки. К ним можно отнести схемы, обеспечивающие уменьшение показателя П, а также схемы, обеспечивающие более равномерный характер деформирования по всей поверхности заготовки.

Одной из возможных схем, обеспечивающих уменьшение показателя П, является схема с противодавлением, которая может реализована и в процессах МЭИФ. Увеличение степени однородности деформации при формовке эластичной средой может быть осуществлено формовкой в два этапа (реверсивная формовка). На первом этапе используется вкладыш и осуществляется реверсивная формовка за счет подтяжки фланцевой части заготовки. Далее осуществляется формовка основного рельефа.

Кроме того, возможна подтяжка фланца заготовки за счет специальной формы эластичного блока (фрикционная формовка). Данные схемы достаточно просто реализуются в условиях МЭИФ. В значительной степени такие технологические решения использованы в ранее известных исследованиях процессов МЭИФ.

Увеличить предельную степень формоизменения можно за счет характеристики самого материала заготовки, а именно повышая его пластичность и уменьшая его прочностные характеристики путем применения рекристаллизационного отжига, локального деформирования, дрессировкой, использованием эффектов электропластичности и сверхпластичности. С точки зрения применения МЭИФ особенно перспективной представляется предоперационная обработка пульсирующим импульсным магнитным полем. В работах, посвященных этим методам, сделано предположение, что влияние на характеристики материала можно достичь увеличением предельной степени формоизменения или уменьшением статистического разброса величины критической степени деформирования, а также путем управления остаточными напряжениями.

Особенностью МЭИФ является то, что она осуществляется на МИУ, которую можно использовать не только для деформирования, но и для влияния на характеристики материала путем предварительной обработки материала заготовки ИМП. Очевидно, что на одной и той же конденсаторной батарее можно создавать два различных разрядных контура.

Вопросы, касающиеся влияния сильных импульсных магнитных полей на свойства проводящих материалов, начали освещаться в литературе, начиная с начала семидесятых годов. Они носили в основном характер описания экспериментальных исследований электропластической деформации моно- и поликристаллических чистых металлов. Достаточно полное описание этих работ отражено в обзорной информации [10], где объяснен электропластический эффект и показано, что реально он достигается при плотностях тока не ниже 10^3 А/мм². Это с точки зрения восстановления запаса пластичности весьма важно в процессах ОМД с большими степенями пластических деформаций, где время восстановления занимает сотые доли секунды (τ). Хотя на микроуровне разогрев может быть незначительным, в зонах дефекта возможно осуществление адиабатического процесса при скоростях разогрева порядка 10^4 К/с. Энергия выделяется в тех зонах, где необходимо «исправить» для получения оптимальных свойств материала. При этом влияние тока большой плотности

(выше 10^3 А/мм²) вызывает концентрацию электромагнитного поля на дефектах кристаллической решетки, что приводит к возникновению мощных локальных температурных полей. Помимо возможного локального адиабатического разогрева металла эффекты воздействия магнитного поля могут проявляться через действие пондеромоторных сил, термических напряжений, ударных волн, теплового удара.

Исходя из физики процесса, отметим: ИМИ, взаимодействуя с материалом детали, обуславливает возникновение вихревых токов. При прохождении импульса электрического тока через металл происходит повышение его температуры за счет джоулева разогрева. Диссипация тепловой энергии в металле может снизить сопротивление деформированию в момент действия импульса электрического тока в результате резкого повышения пластичности материала (термическое разупрочнение) и оказывать остаточные действия – изменять механические характеристики, определяемые после разгрузки.

Разными авторами предложены различные гипотезы о механизмах воздействия магнитного поля на металл. Как наиболее общую следует отметить гипотезу Б. В. Малыгина [11]. Согласно ей МИО представляет комплексное воздействие на металл магнитно-стрикционных процессов и механических деформаций, тепловых и электромагнитных вихревых потоков, локализованных в местах концентрации магнитного потока, а также систему процессов, направленно ориентирующих «спин-характеристики» внешних электронов атомов металлов пограничной зоны контакта зерен (перегруженного участка кристаллита). В целом МИО предусматривает сочетание электромагнитного и термодинамического способов управления неравновесной структурой вещества.

Таким образом, можно ожидать, что предварительная обработка заготовок пульсирующим импульсным магнитным полем может оказывать влияние на увеличение пластичности металлов с различными магнитными свойствами, проявляющейся в интенсификации процессов ползучести, релаксации напряжений, снижения напряжения течения при активном растяжении, а также снижении прочности [9].

При выборе технологического оборудования для получения конкретной детали в процессах МЭШ важным этапом является расчет энергоёмкости процесса. Для постановки такой технологической задачи нужно рассматривать взаимодействие элементов сложного физического комплекса: разрядного контура МИУ; системы индуктор – подвижный элемент, преобразующего энергию разрядного тока в энергию магнитного поля и далее в кинетическую энергию подвижного элемента; системы подвижный элемент – эластичная среда; системы эластичная – среда – деформируемая заготовка.

Сложностью для математического моделирования и численного решения является переменность диффузионных процессов в спирали индуктора и подвижном элементе технологического устройства.

МЭИШ, а также волновые явления в эластичной среде, а именно, механические переходные процессы в элементах технологических устройств. Это обусловлено также тем, что все электромеханические явления взаимосвязаны. Учитывая сложность математического моделирования процессов МЭИШ, определяющих связанное влияние всех параметров процесса, а также технологическую направленность моделирования, допускающую достаточно большие погрешности в прогнозировании заданных параметров, целесообразным является принятие ряда допущений, облегчающих сам процесс моделирования и его практическое применение.

Вид расчетной модели зависит от величины допустимой погрешности прогнозирования данного параметра. Опыт инженерных расчетов процессов МЭИШ позволяет оценить предельную допустимую погрешность величиной (15–25) %. Такое значение предельной ошибки вполне согласуется с величиной статистического разброса справочных характеристик кривой деформационного упрочнения материала заготовки, входящих в исходные данные для расчета. Разработка и практическая реализация математической модели с меньшей

ошибкой прогнозирования энергоемкости не эффективна из-за ее относительной сложности. Достижимая погрешность определяется приближением физической модели к реальному процессу и адекватным математическим описанием этой физической модели. Методика моделирования, отдельные компоненты моделей и результаты расчетов в значительной степени отражены в работах [4, 6, 7, 8]. Технологическое устройство МЭИШ, наиболее характерное в практическом применении, представлено на рис. 2.

Вопросам оценки волновых переходных процессов в отдельных элементах технологических устройств МЭИШ и математическому моделированию таких устройств большое внимание было уделено в работе [9, 11]. При этом в результате экспериментальных и теоретических исследований преобразования давления в устройстве для МЭИШ показано, что параметры давления существенно отличаются от параметров ударной волны, как это полагалось в ранних работах [4, 7]. Решение одномерных волновых задач для подвижного элемента, контейнера, эластичного пуансона и сравнение результатов со случаями, когда волновыми процессами можно пренебречь, показали, что в условиях МЭИШ с допустимой для технологических расчетов погрешностью волновыми процессами в элементах технологической оснастки можно пренебречь. Такой анализ позволил упростить процедуру моделирования технологического устройства для МЭИШ и рассматривать его как механическую систему с сосредоточенными параметрами. При этом входными являлись параметры магнитного давления, действующего на один из торцов подвижного элемента, а выходным являлись параметры давления в эластичной среде, что представляется не совсем удобным для практики технологических расчетов, так как при переходе от параметров магнитного давления к запасаемой энергии имелись неопределенности в функции перехода, а также в некоторых других параметрах. Это вызвано тем, что моделирование магнитного поля индуктора осуществлялось в одной усредненной точке факторного пространства.

Дальнейшим усовершенствованием процесса математического моделирования технологического устройства МЭИШ являлась расчетная модель, в которой применительно к разделительным операциям МЭИШ связно учтены процессы в разрядном контуре, диффузия магнитного поля и переходные процессы в механической части технологического устройства [11]. Однако для формоизменяющих операций МЭИШ, где связность отдельных параметров может оказывать более существенное влияние по сравнению с разделительными операциями, так как перемещение подвижного элемента велико, подобная расчетная модель не разработана.

При таком моделировании важно знать характер деформирования заготовки, которая определяет ее жесткость. До настоящего времени в основном при этом использовались описания оболочек в безмоментной постановке и поэтому была неизвестна погрешность, возникающая за счет изгибающих моментов, определяющая границы применимости понятия тонколистовых материалов. Определение погрешности моделирования заготовки в процессах МЭИШ безмоментной оболочкой являлось задачей данного исследования.

Магнитно-эластоимпульсная штамповка (МЭИШ) деталей из особо тонколистовых материалов (толщиной менее 0,1...0,2 мм) при размерах заготовки в плане менее 30...50 мм обладает рядом особенностей, что определяет параметры технологического устройства и магнитно-импульсной установки (МИУ), требуемой для реализации процесса.

Схема технологического устройства для МЭИШ представлена на рис. 2. Между верхней и нижней плитами 1 механического прижима расположен контейнер 2, подвижный элемент 6 и плоский спиральный индуктор 7. Внутри контейнера находится подкладная плита 3 и полиуретан 4. Индуктор подключен к МИУ 8. Конденсаторная батарея *C* заряжается через повышающий трансформатор *Tr* и высоковольтный выпрямитель *B*. При разряде батареи при помощи управляемого разрядника *P* сильный импульсный ток протекает через спираль индуктора. Возникающее давление импульсного магнитного поля перемещает подвижный элемент, создает импульсное давление в полиуретане. За счет этого давления происходит штамповка заготовки, установленной на поверхности матричного блока.

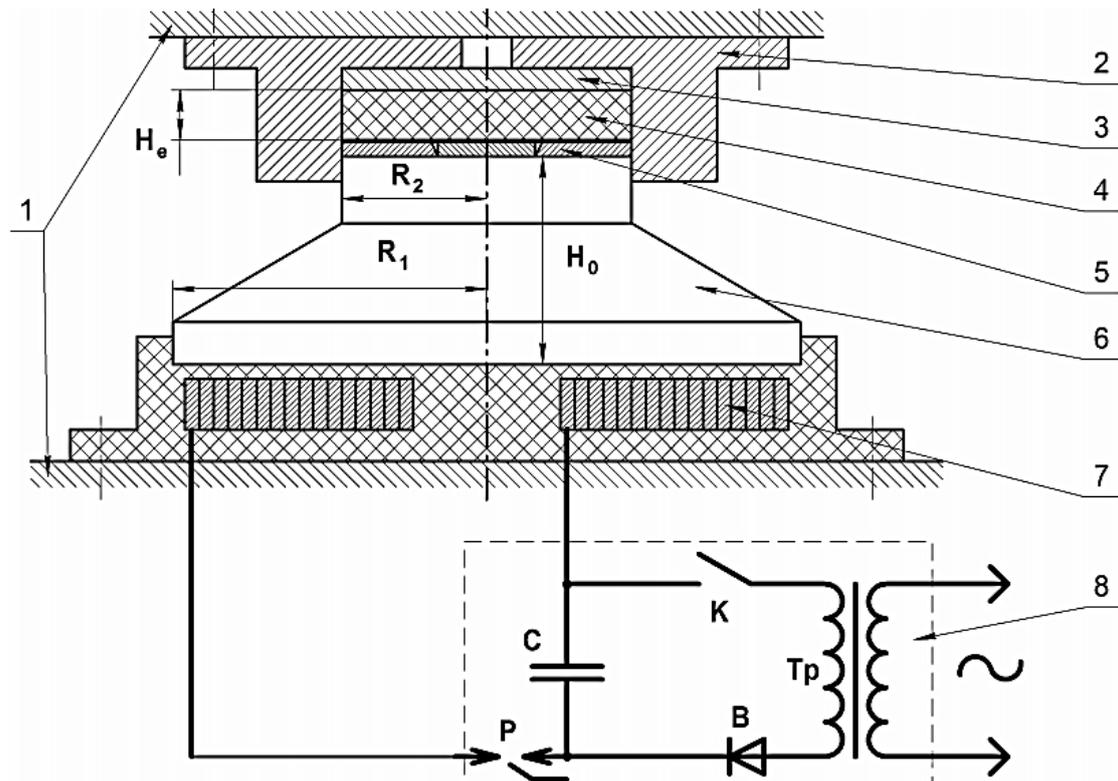


Рис. 2. Схема технологического устройства для МЭИШ и МИУ:

1 – верхняя и нижняя плиты механического прижима; 2 – контейнер; 3 – подкладная плита; 4 – полиуретан; 5 – матричный блок с заготовкой из тонколистового материала; 6 – ступенчатый подвижный элемент; 7 – плоский спиральный индуктор; 8 – блок магнитно-импульсной установки

ВЫВОДЫ

Разработана методика получения диаграммы предельных деформаций тонколистового металла для процессов формовки подвижными средами, в которой механика разрушения материала образца близка к механике соответствующего технологического процесса: нагружение и разрушение листовых образцов осуществляется при помощи полиуретана.

А также показана возможность ожидания, что предварительная обработка заготовок пульсирующим импульсным магнитным полем может оказывать влияние на увеличение пластичности металлов с различными магнитными свойствами, проявляющейся в интенсификации процессов ползучести, релаксации напряжений, снижения напряжения течения при активном растяжении, а также снижении прочности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мамутов А. В. Расчеты процессов штамповки подвижными средами при помощи комплекса LS-DYNA / А. В. Мамутов, В. С. Мамутов // *Научно-технические ведомости*. – СПбГПУ : Наука и образование, 2012. – № 2 (147). – Т. 1. – С. 127–131.
2. Keeler S. P. Rating the Formability of Sheet Metal / S. P. Keeler // *Metal Progress*. – 1966. – Vol. 90. – P. 148–153.
3. Goodwin G. M. Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop / G. M. Goodwin // *Presented at SAE Automotive Engineering Congress, Detroit, January 1968, Paper 680093*. 8 p.
4. Аксенов Л. Б. Построение диаграмм предельных деформаций для прогнозирования разрушения тонколистовой заготовки при высокоскоростной вытяжке-формовке / Л. Б. Аксенов, В. С. Мамутов, А. В. Мамутов // *КШП*. – 2002. – № 4. – С. 9–12.
5. Омаров Ш. А. Перспективные способы обработки материалов / Ш. А. Омаров // *Актуальные проблемы обработки резанием современных материалов : материалы конф. гл. спец. маш. предпр. РД, преподавателей и аспирантов фил. ДГТУ*. – Махачкала : ДГТУ, 2017. – С. 53–57.
6. Вагин В. А. Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов / В. А. Вагин, Г. А. Здор, В. С. Мамутов. – Минск : Наука и техника, 1990. – 207 с.

7. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубki пробивки тонколистовых материалов / Здор Г. Н., Мамутов А. В., Мамутов В. С. [и др.]. // *Металлообработка.* – № 2. – С. 28–32.
8. Мамутов В. С. Теория обработки металлов давлением. Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки : учеб. пособ. / В. С. Мамутов, А. В. Мамутов. – СПб. : Издательство Политехнического университета, 2006. – 189 с.
9. Омаров Ш. А. Разработка технологических процессов магнитно-эластоимпульсной формовки листовых материалов на основе математического моделирования энергосиловых и деформационных параметров : автореф. дис. канд. техн. наук / Ш. А. Омаров. – Санкт-Петербург : СПбГТУ, 1995. – 19 с.
10. Мамутов В. С. Ресурсосберегающие технологические процессы обработки материалов давлением. Импульсная штамповка : учеб. пособ. / В. С. Мамутов, А. М. Шелестеев. – Махачкала : Из-во Авиаагрегат, 2003. – 44 с.
11. Расчет взаимодействия сильных импульсных пульсирующих магнитных полей с металлами / П. В. Верещагин, Г. Н. Здор, В. С. Мамутов, Ш. А. Омаров. – Санкт-Петербург : СПбГТУ, 1992 г. – 15 с. – Деп. в ВНИИТЭМР, № 45.

REFERENCES

1. Mamutov A. V. Raschety processov shtampovki podvizhnymi sredami pri pomoshhi kompleksa LS-DYNA / A. V. Mamutov, V. S. Mamutov // *Nauchno-tehnicheskie vedomosti.* – SPbGPU : Nauka i obrazovanie, 2012. – № 2 (147). – Т. 1. – С. 127–131.
2. Keeler S. P. Rating the Formability of Sheet Metal / S. P. Keeler // *Metal Progress.* – 1966. – Vol. 90. – P. 148–153.
3. Goodwin G. M. Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop / G. M. Goodwin // Presented at SAE Automotive Engineering Congress. Detroit. January 1968. Paper 680093. 8 p.
4. Aksenov L. B. Postroenie diagramm predel'nyh deformacij dlja prognozirovanija razrushenija tonkolistovoj zagotovki pri vysokoskorostnoj vytjazhke-formovke / L. B. Aksenov, V. S. Mamutov, A. V. Mamutov // *KShP.* – 2002. – № 4. – С. 9–12.
5. Omarov Sh. A. Perspektivnye sposoby obrabotki materialov / Sh. A. Omarov // *Aktual'nye pro-blemy obrabotki rezaniem sovremennyh materialov : materialy konf. gl. spec. mash. predpr. RD, преподаvatelej i aspirantov fil. DGTU.* – Mahachkala : DGTU, 2017. – С. 53–57.
6. Vagin V. A. Metody issledovanija vysokoskorostnogo deformirovanija metallov / V. A. Vagin, G. A. Zdor, B. C. Mamutov. – Minsk : Nauka i tehnika, 1990. – 207 s.
7. Razrabotka jeffektivnyh tehnologicheskijh ustrojstv dlja magnitno-jelastoimpul'snoj vyrubki-probivki tonkolistovyh materialov / Zdor G. N., Mamutov A. V., Mamutov V. S. [i dr.]. // *Metalloobrabotka.* – № 2. – С. 28–32.
8. Mamutov V. S. Teoriya obrabotki metallov davleniem. Komp'juternoe modelirovanie processov listovoj shtampovki : ucheb. пособ. / V. S. Mamutov, A. V. Mamutov. – SPb. : Izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta, 2006. – 189 s.
9. Omarov Sh. A. Razrabotka tehnologicheskijh processov magnitno-jelastoimpul'snoj formovki li-stovyh materialov na osnove matematicheskogo modelirovanija jenergosilovyh i deformacionnyh parametrov : avtoref. dis. kand. tehn. nauk / Sh. A. Omarov. – Sankt-Peterburg : SPbGTU, 1995. – 19 s.
10. Mamutov V. S. Resursosberegajushhie tehnologicheskije processy obrabotki materialov davleniem. Impul'snaja shtampovka : ucheb. пособ. / V. S. Mamutov, A. M. Shelesteev. – Mahachkala : Iz-vo Aviaaгрегат, 2003. – 44 s.
11. Raschet vzaimodejstvija sil'nyh impul'snyh pul'sirujushhijh magnitnyh polej s metallami / P. V. Vereshhagin, G. N. Zdor, V. S. Mamutov, Sh. A. Omarov. – Sankt-Peterburg : SPbGTU, 1992 g. – 15 s. – Dep. v VNIITJeMR, № 45.

Омаров Ш. А. – канд. техн. наук, доц. ДГТУ.

ДГТУ – Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала, Республика Дагестан, РФ.

E-mail: keger1963@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 11.03.2018 г.