

ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Д. В. Мосьпан

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: denis.mospan@gmail.com

Рассмотрены вопросы выявления перспективных направлений масштабного внедрения и реализации интеллектуальных технологий пластического деформирования. На основе анализа износа штамповой оснастки установлены пути его компенсации и адаптации к изменившимся условиям деформирования. Ряд процессов листовой штамповки рассмотрен с точки зрения повышения их управляемости и статистической обработки причин выпуска бракованных деталей и деталей с устранимыми дефектными признаками. Формирование управляющих программ основано на математическом моделировании и опытной обработке программы нагружения по «первой детали». Совершенствование процессов формообразования производится путем увеличения управляемых связей, максимального использования пластических свойств материала заготовки, законов и эффектов пластического деформирования (Practical value). Реализация адаптивного управления в кузнечно-штамповочном производстве повышает долговечность и надежность оборудования и технологической оснастки, качество получаемых деталей, мобильность производства.

Ключевые слова: пластическая деформация, методы интенсификации, классификация, дополнительное нагружение, управляемость.

ШЛЯХИ РЕАЛІЗАЦІЇ ІНТЕЛЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Д. В. Мосьпан

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: denis.mospan@gmail.com

Розглянуто питання виявлення перспективних напрямів масштабного впровадження та реалізації інтелектуальної технології пластичного деформування. На основі аналізу зносу штампового оснащення встановлено шляхи його компенсації та адаптації до умов деформування, що змінилися. Низку процесів листового штампування розглянуто з точки зору підвищення їх керованості та статистичної обробки причин випуску бракованих деталей та деталей з усуненими дефектними ознаками. Формування керуючих програм базується на математичному моделюванні й дослідній обробці програми навантаження за «першою деталлю». Удосконалення процесів формоутворення здійснюється шляхом збільшення керованих зв'язків, максимального використання пластичних властивостей матеріалу заготовки, законів та ефектів пластичного деформування. Реалізація адаптивного управління в ковальсько-штампувальному виробництві підвищує довговічність і надійність обладнання та технологічної оснастки, якість отриманих деталей, мобільність виробництва.

Ключові слова: пластична деформація, методи інтенсифікації, класифікація, додаткове навантаження, керованість.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Обработка металлов давлением по производительности, экономической эффективности и качеству получаемых деталей является наиболее прогрессивным процессом современного производства. Основные преимущества технологических процессов обработки металлов давлением связаны с обеспечением возможности улучшения состояния деформируемого материала. К настоящему времени теория и практика процессов обеспечивает возможность получения деталей методом пластического деформирования, а также достаточно высокий уровень средств автоматического управления параметрами формоизменения. Это позволяет значительно повысить эффективность рассматриваемых процессов путем их оптимизации по тем или иным параметрам, разработке средств автоматизированного и адаптивного управления для создания интеллектуальных технологий.

Цель работы – выявление перспективных направлений масштабного внедрения и реализации интеллектуальных технологий пластического деформирования.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. При проектировании процессов формообразования необходимо создать условия, которые позволяют обеспечить его максимальную управляе-

мость при минимальных затратах на производство деталей. Это в полной мере вкладывается в концепцию и законы развития технических систем [1].

Это связано с тем, что развитие технических систем происходит путем повышения числа управляемых связей. При этом следует максимально использовать пластические свойства материала заготовки, эффекты и законы пластической деформации. Практически все операции листовой штамповки – формоизменяющие и разделительные – являются благодатной почвой для освоения интеллектуальных технологий. В разделительных операциях листовой штамповки количество получаемых деталей и заготовок зависит от величины зазора между пуансоном и матрицей. Увеличение зазора, как правило, приводит к увеличению высоты заусенца, что для большинства деталей, получаемых вырубкой, и деталей, содержащих отверстия и получаемых пробивкой, не допустимо. Поэтому возникает необходимость регулирования и корректировки величины зазора между матрицей и пуансоном. Подобного рода технические задачи решаются с применением физических эффектов. В данном случае необходимо изменить размер матрицы или пуансона, что достигается посредством следующих физических явлений и эффектов:

- деформация;
- тепловое расширение;
- магнитоэлектрификация;
- пьезоэлектрический эффект.

Действительно, существует известное техническое решение [2, 3], в котором увеличение поперечных размеров пуансона достигается путем упругой деформации его стенок, например, с использованием конической внутренней вставки и винта. Однако в этом случае увеличение размеров изменяется в большую сторону на величину упругой деформации. Более эффективным является способ, в основу которого положено тепловое управление.

Для осуществления адаптивного программного управления процессом необходимо измерение размеров пуансона. Традиционно это достигается путем либо измерения собственной частоты колебаний объекта, либо нанесением и считыванием магнитных и электрических сигналов. Известные устройства и приспособления, построенные с использованием этих физических эффектов, громоздкие и дорогие [2, 3]. Значительно проще использовать контактные датчики, сигнализирующие о нарушении контакта между изношенным пуансоном и упорным элементом датчика. В результате включается система подогрева пуансона до температуры, при которой восстанавливается его размер и оптимальный зазор. При этом температура нагрева пуансона не должна превышать температуры низкого отпуска материала пуансона. Резервом управляемости является охлаждение матрицы до температуры, которая не вызывает хладноломкость материала матрицы.

Следует отметить, что износ элементов технологической оснастки (пуансона и матрицы) характерен и для формоизменяющих операций листовой штамповки: отбортовки, вытяжки, формовки, раздачи, обжима и гибки. Наиболее подвергнуты износу перетяжные ребра матрицы и радиусы скругления пуансона при вытяжке и отбортовке. В меньшей степени в этих процессах износу подвергнуты формообразующие поверхности пуансона и матрицы, а также в процессах обжима, раздачи, формовки, правки и чеканки. В процессах локального пластического формирования листовых деталей (сферодвижная и валковая штамповка, обкатка, радиально-ротационное профилирование и т.д.) несмотря на обилие методов упрочняющей обработки, интенсивный износ характерен формообразующему инструменту (роликам, валкам, раскатникам и т.д.).

Для импульсных высокоскоростных методов листовой штамповки помимо износа формообразующих поверхностей штамповой оснастки в значительной мере характерно возникновение необратимых пластических деформаций. Последние в большинстве случаев приводят к неустраняемому браку получаемых деталей. В процессах сложной вытяжки листовых деталей, кроме износа формообразующих поверхностей, изнашиванию подвержены тормозные элементы штампа (тормозные пороги и ребра).

Касательно зазора между пуансоном и матрицей при вытяжке и отбортовке его функциональное назначение, в какой-то степени, отличается от назначения зазора в процессе разделения листовых материалов.

Зазор между пуансоном и матрицей при резании оказывает существенное влияние на качество поверхности среза, сопротивление срезу и стойкость штампов. Компенсация изменения зазоров при операциях пробивки и вырубки крайне необходима. Кроме того, в существующих системах, компенсирующих увеличение зазора [2, 3], необходимы элементы регистрирующие предельную, т.е. неустраняемую степень износа пуансона.

При вытяжке с прижимом и отбортовке увеличение зазора между пуансоном и матрицей приводит к уменьшению:

- сил трения;
- растягивающих напряжений в опасном сечении, т.е. увеличению степени деформации;
- сопротивления вытяжке [4].

В целом увеличение зазора при вытяжке и отбортовке в рамках его граничных значений положительно сказывается на процессе формоизменения и не имеет смысла его компенсировать. Значительное влияние на процесс формоизменения при вышеуказанных операциях оказывают радиусы скруглений вытяжных кромок пуансона и матрицы. Оптимальное значений этих параметров лежит в пределах 5–8 толщин заготовки. Увеличение радиуса матрицы свыше этой величины в результате износа приводит к увеличению участка заготовки, который находится вне контакта с поверхностью прижима. В результате этого может начаться складкообразование. Компенсировать износ кромки возможно:

- путем установки на этой кромке утапливаемого торозного ребра;
- увеличением площади поверхности фланцевой части заготовки;
- увеличением давления прижима;
- изменением вязкости применяемой смазки;
- охлаждением формообразующих поверхностей пуансона и т.д.

Высокую управляемость процесса вытяжки деталей сложной формы (кузова, коробчатые детали, облицовочные детали транспортных средств и др.) обеспечиваются путем изменения конфигурации и размеров исходной заготовки, а также применением тормозных порогов и ребер различной конфигурации и их количества. При этом их расположение должно быть таким, чтоб каждая повторная деформация была противоположного знака (рис. 1). В этом случае максимально снижается предел упругости и увеличивается резерв пластичности материала заготовки. Однако тормозные пороги и ребра подвергаются интенсивному износу, т.е. быстро срабатываются. Затраты на профилактический ремонт и замену сработавшихся перетяжных порогов довольно значительны. Применение порогов, высота которых изменяется по мере износа, например, с использованием клиновых элементов (рис. 2), позволяет существенно снизить эти затраты.

Таким образом, рассмотрение ряда процессов листовой штамповки с точки зрения повышения их управляемости и адаптации к изменившимся условиям формоизменения невозможно без многофакторной оптимизации процесса и автоматизации теоретического анализа.

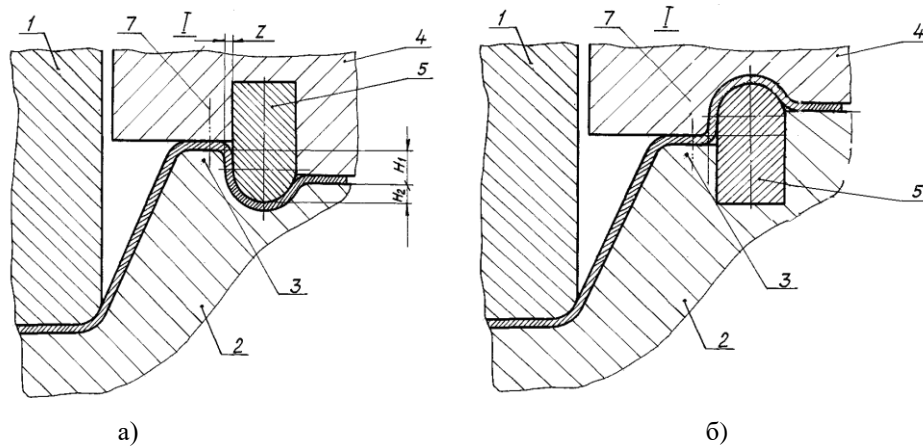


Рисунок 1 – Схема елемента штампa: а – сущесwующая конструкция элемента штампa; б – новая конструкция; 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – тормозной порог; 4 – прижим; 5 – тормозное ребро

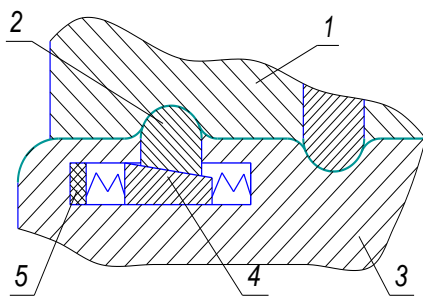


Рисунок 2 – Регулируемое тормозное ребро: 1 – прижим; 2 – тормозное ребро; 3 – матрица; 4 – клин; 5 – расширяющийся по мере износа элемент

В настоящее время оптимизационные задачи, решаемые с помощью математических моделей конкретных технологических процессов формоизменения, подразделяют на качественно- и количественно оптимизационные [4–6].

Первая группа моделей связывает между собой регулируемые $P_i^{(p)}$, нерегулируемые $P_i^{(u)}$ учетные определяющие параметры и параметры отклика U_i процесса зависимостями монотонного вида. Примером качественно-оптимизационных задач в листовой штамповке могут служить зависимости [4] для определения оптимальной толщины смазочного слоя, контура оптимальной заготовки [4, 5], оптимальной поверхности перетяжного ребра матрицы и давления прижима [4–8] и т.д. На основании полученных зависимостей можно рассчитать конкретное значение параметров процесса и дать качественную оценку связей.

Количественно-оптимизационные модели позволяют дать количественные рекомендации по выбору параметров $P_i^{(p)}$ в связи с решением некоторой оптимизационной задачи. Решение количественно-оптимизационных задач широко представлено в работах В.К. Борисевича, В.П. Сабелькина, В.В. Третьяка и др. [4, 5]. Для получения оптимального решения использован метод градиентов второго порядка. Решение задачи произведено из условия минимума функционала Φ , характеризующего отличие между действительным и требуемым значениями энергетического

параметра в заданных точках. При формообразующих операциях деталей сложной конфигурации, когда величина вытяжки велика, определяющими факторами являются: удельный импульс i и удельная энергия e . при калибровочных операциях, когда деформационные параметры незначительны определяющим фактором является давление на заготовку. Решению оптимизационной задачи в данном случае предшествует задача моделирования процесса импульсного формообразования, построенная на конечно-разностной аппроксимации уравнений механики сплошных сред и критерия текучести Мизеса–Генки при расчете пластического поведения заготовки. Эта методика позволяет моделировать и решать комплекс качественных и количественных оптимизационных задач. В частности, она нашла применение при определении оптимальных граничных условий на фланцевой части заготовки [4–10] и перетяжном ребре матрицы [5] в рамках гидродинамической и обобщенной теории трения. Однако эти разработки ограничиваются процессами гидровзрывной штамповки. Следует заметить, что эта модель в зависимости от объекта и задачи оптимизации может быть как качественно-, так и количественно-оптимизационной.

Интересна методика выбора рационального профиля деформирующего инструмента по критерию минимума наибольшей поверхностной нагрузки на участках контакта с заготовкой [5]. Исследования направлены на снижение вероятности получения некачественной продукции и увеличения срока возможной эксплуатации инструмента.

Приведенный анализ позволяет констатировать факт возможности описания различными математическими зависимостями одних и тех же явлений, процессов и объектов. Это дает возможность для варьирования сложностью разрабатываемых моделей в зависимости от тех целей, для которых они создаются. Это открывает широкие перспективы в плане варьирования сложностью разрабатываемых моделей.

В целом, основное предназначение математических моделей – оказание помощи технологам в выбо-

ре таких воздействий (управление), которые обеспечивали бы получение более высокой производительности, минимальных затрат, лучших качественных показателей отштампованных деталей и т.п. Результатом процесса формоизменения является получение детали с заданными размерами и механическими характеристиками при наименьших затратах, хотя в ряде случаев производственные затраты не идут ни в какое сопоставление с эксплуатационными. Получение экстремального значения параметра возможно только при определенных значениях всех факторов. Это значительно усложняет вычисления и получение конечных результатов. Поэтому рядом исследователей [4–10] предложено учитывать только наиболее значимые факторы. Для определения значимости факторов фиксируются значения нескольких из них при изменяющихся других. Затем определяют значения последних, минимизирующих полную мощность формоизменения [4, 5]. Процесс протекает в несколько этапов, пока не будут определены значимости всех факторов. Однако возможно это излишняя процедура, трудоемкость которой совместима с процедурой перебора всех параметров.

Ряд практических задач теории обработки металлов носят альтернативный характер. Например, снижение расхода материала повышает вероятность брака отштампованных изделий. Решение таких задач требует привлечения математического аппарата теории вероятности [9, 10].

Множество задач оптимизации технологических процессов вытяжки сводится к условиям оптимального распределения ограниченного ресурса некоторого параметра. К этому классу можно отнести задачи по оптимальному распределению деформационных параметров между переходами вытяжки.

Проектирование технологических процессов как правило сводится к решению многовариантной задачи с полной или частичной формализацией критерия оптимальности сравниваемых вариантов [4–10]. Полностью формализованным, комплексным критерием может быть стоимость продукции. Однако широкое применение стоимостного критерия в проектировании процессов листоштамповочного производства затруднено как ввиду отсутствия необходимого информационного обеспечения зависимости стоимости продукции от технологии ее производства, так и от эксплуатационных показателей.

Следует отметить, что процессам листоштамповочного производства присуще многообразие задач теории оптимального и адаптивного управления и то, что применение методов этой теории к формообразующим технологиям находится в стадии своего развития.

Интеллектуальные технологии прежде всего нацелены на расширение возможностей процессов листовой штамповки, ограничивающихся обычно разрушением или потерей устойчивости заготовки. В некоторых случаях ограничивающими факторами являются недопустимая локализация деформаций, предельный перепад толщин в отдельных зонах дета-

ли, качество поверхности, достигаемая точность и др.

Основные проблемы, возникающие и не нашедшие полного разрешения до настоящего времени, следующие:

1. *Формоизменение деталей с минимально возможными радиусами сопряжения прямолинейных элементов сечения.* Суть задачи состоит в предотвращении разрушения материала в угловых зонах, а также в предотвращении потери устойчивости листового материала в зоне тангенциального сжатия. Минимально допустимый радиус угловой зоны определяется, в основном, механическими свойствами материала заготовки и способом осуществления процесса.

Во многих случаях из-за уменьшения поля допуска на толщину стенки и увеличения временного сопротивления можно снизить массу конструкции на 10–15 % при тех же прочностных показателях.

2. *Устранение утонения материалов в переходной зоне.* В зависимости от относительного радиуса изгиба утонение колеблется от 1–2 до 15–16 %. Утонение приводит к двум нежелательным последствиям: во-первых, уменьшается жесткость детали и, во-вторых, снижается усталостная прочность, т.к. зона изгиба является в большинстве случаев концентратором напряжений, и уменьшение толщины в этом месте приводит к значительному росту напряжений, возникающих при эксплуатации изделия.

3. *Устранение пружинения детали после снятия нагрузки.* Пружинение приводит к необходимости доработки деталей или оснастки, что весьма нежелательно, в особенности при мелкосерийном характере производства, поскольку увеличивает трудоемкость и стоимость изготовления детали и удлиняет цикл подготовки производства. Учет пружинения при проектировании оснастки связан с определенными трудностями, потому что механические свойства материала (в особенности новых титановых, алюминиевых и других сплавов) значительно различаются даже в пределах одной партии. Особенно значительное увеличение трудоемкости из-за ручной доводки имеет место при изготовлении гнутых деталей из прессованных профилей с большей площадью поперечного сечения. Объем ручных работ достаточно велик даже при производстве деталей из широко распространенных и освоенных материалов.

Все проблемы, возникающие при вытяжке, органически присущи этому процессу и определяются характером напряженно-деформированного состояния.

Если дефекты определяются механической схемой деформаций, то наиболее естественным способом их устранения является изменение этой схемы. Это возможно при нагружении очага деформации некоторыми дополнительными видами внешних нагрузок (нормальных и касательных), наличие которых не является обязательным для осуществления заданного формоизменения, т.е. при использовании совмещенных процессов обработки давлением с адаптивным управлением и включением дополнительного нагружения.

Решение оптимизационных задач в металлообработке, в том числе в листоштамповочном производстве, в основном направлено на интеллектуальную оптимизацию с самообучением. Для реализации последней необходимо создание модулей (файлов) для статистического анализа, т.е. статистической обработки данных по методам множественной регрессии и корреляции. Также необходим и модуль или библиотека интенсифицирующих факторов процесса формообразования с учетом весовых коэффициентов их эффективности по критериям качества.

В более сложных процессах листовой штамповки формирование управляющей программы основано на следующих способах:

- математическое моделирование процесса формообразования с использованием математической модели материала;

- геометрия штампуемой детали и силового напряжения.

Это позволяет оптимизировать программу силового нагружения и схему деформации штампуемого материала с максимальной реализацией пластических свойств; спроектировать технологическую оснастку, позволяющую корректировать процесс деформирования.

В конечном итоге становится возможной разработка программы деформирования и проектирование технологической оснастки на базе накопленного опыта штамповки аналогичных деталей и анализа патентной и научно-технической литературы, т.е. формирование библиотеки технических решений (банка данных).

Для этого необходим анализ причин выпуска бракованных деталей и деталей с устранимыми дефектами. Это позволяет произвести селекцию полезности дефектных признаков. При статистической обработке найденных данных гарантия полезности дефектных признаков будет в том случае, если количество информации, содержащейся в множестве возможных значений информационного признака превышает информационный барьер. Формирование дефектных признаков осуществляется на основании установления причин выпуска бракованных изделий, большинство из которых в условиях современного листоштамповочного производства на Украине подлежат устранению или предупреждению, особенно в условиях внедрения в производство интеллектуальных или адаптивных технологий. Основными из них являются:

- брак по исходному материалу;

- брак, связанный с износом штампа;

- остальные виды брака:

- брак по вине рабочего-штамповщика;

- брак, связанный с качеством изготовления и ремонта штампов;

- брак, связанный с отступлением от технологии и т.п. и зависящий от условий организации листоштамповочного производства и контроля.

ВЫВОДЫ. Для развития и реализации интеллектуальных технологий необходимо повышение технического уровня электронных средств измерения, управления и автоматизации процессами упруго-

пластического деформирования. В условиях реального состояния кузнечно-штамповочного оборудования наиболее востребованы средства адаптивного управления, позволяющие компенсировать износ штамповой оснастки, повысить управляемость процесса формоизменения, использовать многофакторную оптимизацию параметров деформирования и штамповки, производить селекцию дефектных признаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Меерович М.М., Шрагина Л.И. Технология творческого мышления. – Минск: Харвест, 2003. – 432 с.

2. Повышение стойкости разделительных штампов за счет использования механических компенсаторов / А.П. Качанов, В.Я. Мирзак, В.С. Запороженко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1996. – № 4. – С. 18–22.

3. Мирзак В.Я., Боков В.М. Вплив механічного компенсатора похибок на якість тонколистового розділового штампування // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 6/7 (78). – С. 10–15.

4. Оптимизация геометрических и технологических параметров процесса формоизменения листовых деталей с рациональным выбором интенсифицирующих факторов / В.В. Драгобецкий, Н.Н. Мороз, О.В. Троцко // Вісник Національного технічного університету «ХП»: збір. наук. праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП», 2009. – № 32. – С. 38–43.

5. Загальні підходи оптимізації технології виробництва листових заготовок / М.М. Мороз, В.В. Драгобецький, А.Г. Маркевич // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ: ДПТ, 2009. – Вип. 28. – С. 186–188.

6. Миклашевич И.А. Микромеханика разрушения в обобщенных пространствах. – Минск: Логвинов, 2003. – 208 с.

7. Development of Elements of Personal Protective Equipment of New Generation on the Basis of Layered Metal Compositions / V.V. Dragobetskii, A.A. Shapoval, V.G. Zagoryanskii // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45, iss. 1, pp. 33–37.

8. Excavator Bucket Teeth Strengthening Using a Plastic Explosive Deformation / V.V. Dragobetskii, A.A. Shapoval, D.V. Mospan, O.V. Trotsko, V.V. Lotous // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No. 4. – PP. 363–368.

9. Ensuring High Performance Characteristics For Explosion-Welded Bimetals / A.A. Shapoval, D.V. Mospan, V.V. Dragobetskii // Metallurgist. – July 2016. – Vol. 60, iss. 3. – PP. 313–317.

10. Production of Periodic Bars by Vibrational Drawing / S.M. Gorbatyuk, A.A. Shapoval, D.V. Mospan, V.V. Dragobetskii // Steel in Translation. – 2016. – Vol. 46, no. 7. – PP. 474–478.

WAYS OF REALIZATION OF PLASTIC DEFORMATION INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

D. Mospan

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: denis.mospan@gmail.com

Purpose. To reveal perspective directions of a large-scale introduction and realization of intellectual technologies of plastic deformation. **Methodology.** On the basis of the analysis the ways of compensation and adaptation to the changed conditions of deformation have been determined. A number of processes of sheet stamping have been considered from the point of view of increasing their controllability and statistical processing of the causes of the production of defective parts and parts with removable defective features. **Results.** The formation of the control programs is based on the mathematical modeling and experimental processing of the loading program for the "first part". **Originality.** The perfection of the shaping processes is carried out by increasing the controlling connections, maximizing the use of the plastic properties of the workpiece material, laws and the effects of plastic deformation. **Practical value.** The application of the adaptive control in the forging and stamping industry increases the durability and reliability of the equipment and technological facilities, the quality of the parts obtained, and the mobility of production. References 10, figure 2.

Key words: effects, forming, classification, shear, plastic deformation, controllability

REFERENCES

1. Meerovich, M.M., Shragina, L.I. (2003), *Tehnologiya tvorcheskogo myshleniya* [Technology of creative thinking], Harvest, Minsk, Beloruss.
2. Kachanov, A.P., Mirzak, V.Ya., Zaporozhchenko, V.S. (1996), "Increase of stability of separating stamps due to use of mechanical compensators", *Forging-stamping manufacture*, no. 4, pp. 18–22.
3. Mirzak, V.Ya., Bokov, V.M. (2015), "Influence of mechanical compensator of errors on the quality of thin sheet punching", *East-European Journal of Advanced Technologies*, no. 6/7 (78), pp. 10–15.
4. Dragobetskii, V.V., Moroz, N.N., Trotsko, O.V. (2009), "Optimization of geometrical and technological parameters of the process of shaping sheet parts with a rational choice of intensifying factors", *Transactions of the National Technical University "KhPI": collection. sciences works. Thematic issue: New solutions in modern technologies*, no. 32, pp. 38–43.
5. Moroz, M.M., Dragobetskii, V.V., Markevich, A.G. (2009), General approaches to optimizing the production technology of sheet blanks, *Transactions of Dnipropetrovsk Academician V. Lazaryan National University of Railway Transport*, iss. 28, pp. 186–188.
6. Miklashevich, I.A. (2003), *Mikromehanika razrusheniya v obobshchennykh prostranstvakh* [Micromechanics of fracture in generalized spaces], Logvinov, Minsk, Beloruss.
7. Dragobetskii, V.V., Shapoval, A.A., Zagoryanskii, V.G. (2015), "Development of Elements of Personal Protective Equipment of New Generation on the Basis of Layered Metal Compositions", *Steel in Translation*, vol. 45, iss. 1, pp. 33–37.
8. Dragobetskii, V.V., Shapoval, A.A., Mospan, D.V., Trotsko, O.V., Lotous, V.V. (2015), "Excavator Bucket Teeth Strengthening Using a Plastic Explosive Deformation", *Metallurgical and Mining Industry*, no. 4, pp. 363–368.
9. Shapoval, A.A., Mospan, D.V., Dragobetskii, V.V. (2016), "Ensuring High Performance Characteristics For Explosion-Welded Bimetals", *Metallurgist*, vol. 60, iss. 3, pp. 313–317.
10. Gorbatyuk, S.M., Shapoval, A.A., Mospan, D.V., Dragobetskii V.V. (2016), "Production of Periodic Bars by Vibrational Drawing", *Steel in Translation*, vol. 46, no. 7, pp. 474–478.

Стаття надійшла 20.11.2017.