

#### 4. Выводы

Применение НРМ в регулярных задачах механики позволяет получить сходящееся решение, пригодное во всей области изменения естественного параметра. Это возможно при использовании схемы возмущения задачи, предложенной в модифицированном методе продолжения по параметру, и суммировании решения по схеме Паде.

**Список литературы:** 1. He, J. H. Homotopy perturbation technique. Comput. Meth [Текст] / J. H. He // Appl. Mech. Eng. - 1999. - № 178. – P. 257-262. 2. He, J. H. A new perturbation technique which is also valid for large parameters [Текст] / J.H. He // Journal of Sound and Vibration – 2000. – № 225 – P. 1257–1263. 3. Андрианов, И. В. Применение метода Паде-аппроксимант для устранения неоднородностей асимптотических разложений [Текст] / И. В. Андрианов // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1984. - №3. – С. 166-167. 4. Andrianov, I. V. A modified Adomian's decomposition method [Текст] / I. V. Andrianov, V. I. Olevskij, S. Tokazhevskij // J. Appl. Math. Mech. – 1998. – V. 62. - No.2. – P. 309-314. 5. Андрианов, И. В. Обобщение подходов Адомяна и гомотопического возмущения на основе модифицированного метода продолжения по параметру [Текст] / И. В. Андрианов, В. И. Олевский, В. В. Плетин // Теоретичні основи будівництва. – Варшава: Изд-во Варшавской Политехники, 2010. –№ 18. – С. 45-52. 6. Liao, S. J. Beyond Perturbation - Introduction to the Homotopy Analysis Method [Текст]: монография / S. J. Liao - Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2003. – 317 p. 7. Sanchez, N. E. A view to the new perturbation technique valid for large parameters [Текст] / N. E. Sanchez // Journal of Sound and Vibration. - 2005. – № 282 – P. 1309–1316.

*Поступила в редколлегию 11.01.2011*

**УДК 621.735.2.043**

**А.В. МАКОВЕЦКИЙ**, аспирант НАКУ «ХАИ», г. Харьков

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ТОЧНОСТЬ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ТИПА ВТ-20**

Определены технологические ограничения на конструкцию заготовок, получаемых методом горячей объемной штамповки в открытых штампах, и параметры, влияющие на технологическую точность горячей штамповки и качество готовой продукции. Проведено экспериментальное и компьютерное моделирование процесса штамповки поковок П-образной формы из титанового сплава типа ВТ-20. Получены допустимые значения расположения заготовки в штампе.

Визначені технологічні обмеження на конструкцію заготовок, що отримують методом гарячого об'ємного штампування у відкритих штампах, та параметрів, що впливають на технологічну гарячого об'ємного штампування та якість готової продукції. Проведено експериментальне та комп'ютерне моделювання процесу штампування поковок П-образної форми з титанового сплаву типу ВТ-20. Отримані допустимі значення розташування заготовки в штампі.

The technological limitations on the design of billets obtained by open die forging with a flash, and the parameters affecting the accuracy of hot forging and the quality of the finished product are identified. An experimental and computer simulation of forging billets П-shaped from titanium alloy such as ВТ-20 was carried out. A valid location values of billet in the die are obtained.

В условиях современного производства летательных аппаратов широко применяется горячая объемная штамповка как метод изготовления заготовок ответственных деталей. Это объясняется высокой производительностью процесса, высокими механическими свойствами деталей, достигаемой точностью в пределах установленных отклонений. Обеспечение заданной точности готовой детали определяется взаимозаменяемостью заготовок, полученных методом горячей штамповки, и как следствие, возможностью применять точные приспособления для дальнейшей механообработки [1].

Сочетание таких ценных свойств титановых сплавов, как малая плотность, высокая удельная прочность, коррозионная стойкость и ряд других, привели к их широкому использованию в самолето- и ракетостроении. Задачами горячего деформирования титановых сплавов являются, во-первых, формообразование (придание заготовке формы близкой к форме конечной детали) и, во-вторых, получение требуемого качества детали (набора механических свойств и оптимальной макро- и микроструктуры).

Наиболее важной особенностью горячего деформирования титановых сплавов является получение благоприятной структуры материала на каждой из предварительных стадий обработки, что обеспечивает получение заготовок требуемого качества на окончательной стадии и эффективность термообработки. При этом весьма ограниченной является область благоприятных условий деформирования. Так температурные интервалы штамповки довольно узки и регламентируются положением точки  $\beta/\alpha+\beta$  превращения, имеющим большое значение в процессе горячего деформирования. При этом титановые сплавы при объемной горячей штамповке деформируются крайне неравномерно, причем образуется разнотекучая макроструктура. Штамповку рекомендуется осуществлять в открытых штампах. Следствием приведенных выше фактов является необходимость применения многопереходной штамповки с многократным промежуточным нагревом заготовки для получения поковки требуемых размеров, заданной точности и структуры материала. Таким образом, процесс горячей обработки титановых сплавов требует более жесткого контроля, что приводит к дополнительной сложности процесса штамповки [2].

В результате проведенного исследования номенклатуры горячештампованных заготовок из труднодеформируемых титановых сплавов была выделена одна из наиболее распространенных групп таких поковок. К ней относятся заготовки штампованные сложной формы с высокими тонкими ребрами, малыми радиусами сопряжений, тонкими полотноми большой площади (детали типа фитингов, кронштейнов, балок, панелей и т.д.). Классификационная группировка таких заготовок приведена в табл. 1. Поковки этой группы также относятся к заготовкам штампованным с ориентированным направлением волокон металла, влияющим существенным образом на однородность деформирования и, следовательно, качество детали. Материалом для заготовок таких деталей широко используется титановый сплав типа ВТ-20 [1,3]. Получение поковок с тонкими полотноми и высокими тонкими ребрами представляет значительную технологическую трудность. Неправильно выбранные соотношения геометрических размеров элементов поковки приводят в

процессе штамповки к возникновению следующих дефектов: складок, зажимов, незаполнений и т.д. Приведенные выше данные о сложности получения заготовок и особенностях деформирования титановых сплавов определяет необходимость и востребованность разработки процессов объемной штамповки для получения деталей заданной формы, точности и с требуемой структурой.

Для горячей штамповки деталей 1-ой группы авторами работы [4] предложена следующая технологическая схема, включающая штамп, состоящий из двух ручьев. При этом предварительный ручей штампа имеет гравюру, обладающую дополнительными (направляющими) выступами на верхней стороне гравюры, соответственно выступам формирующим ребрение. Скругленный профиль направляющего выступа обеспечивает преимущественное затекание металла в сторону ребер. Окончательный ручей штампа выполняется в форме приближенной к форме готовой детали. Эскизы заготовки в предварительном ручье штампа, соответствующие разработанной схеме штамповки в штампах с дополнительными элементами формы приведены в табл.1.

При экспериментальном исследовании процессов горячей объемной штамповки поковок из труднодеформируемых титановых сплавов довольно существенные трудности и затраты вызывает необходимость использования оборудования высокой мощности, изучение деформированного состояния отдельных элементов крупногабаритных поковок типа балок, кронштейнов, панелей, проведение эксперимента в равномерных температурных условиях. Поэтому при исследовании и отработке техпроцесса штамповки целесообразно проводить предварительное моделирование процесса на пластичных образцах с целью исследования влияния конструктивных характеристик штамповой оснастки на процесс деформирования заготовок.

Известна методика качественного моделирования процессов обработки металлов давлением, в частности объемной штамповки [5,6]. Эксперимент проводится с использованием мягких материалов (пластилина, глины). Его цель – качественное изучение возможного механизма формоизменения заготовки. При этом к материалу модели предъявляются следующие требования:

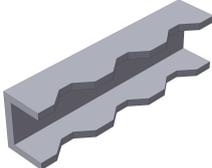
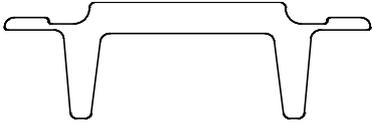
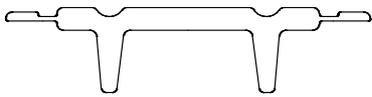
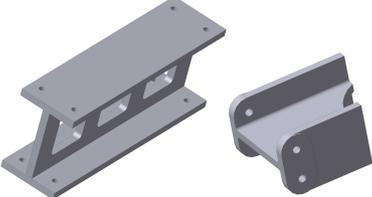
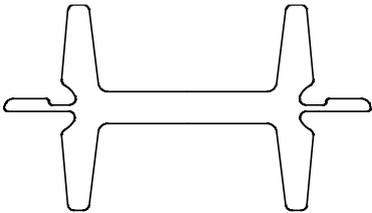
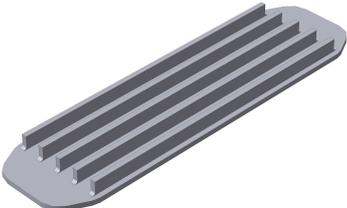
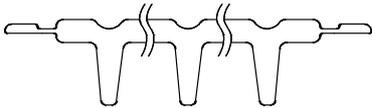
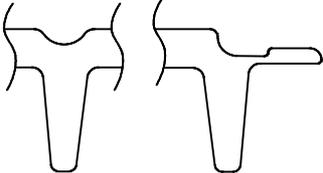
- его пластичность при комнатной температуре должна быть близкой к пластичности металла при температуре горячей штамповки;
- усилия деформирования должны быть небольшими.

Для этого необходимо близкое совпадение кривой текучести (напряжение в зависимости от величины и скорости деформации) для модели и реального материала. В нашем случае предлагается, в качестве модельного материала, использовать пластилин, свойства которого подробно изучены.

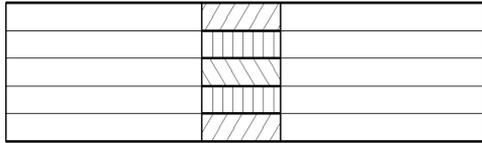
Для того чтобы смоделировать соответствующие условия трения при горячей штамповке, используется мел и вазелин [5,6]. В соответствии с методикой Кука [6] применяются образцы из разноцветных слоев пластилина для моделирования процессов горячей штамповки.

В качестве заготовки используется образец прямоугольного сечения, который набирается из разноцветных отдельных пластин пластилина, толщиной 5...7 мм, имеющими сечение аналогичное заданному, (рис.1).

Таблица 1 – Классификационная группировка штампованных заготовок с оребрением

Группа	Модель детали	Эскиз заготовки в предварительном ручье	Характеристика штампованных заготовок
1	<p>Подгруппа а</p> 		<p>Заготовки штампованные П-образной в сечении и удлинённой в плане формы с односторонним расположением выступов относительно полотна</p>
	<p>Подгруппа б</p> 		
2			<p>Заготовки штампованные Н-образной в сечении и удлинённой в плане формы с разносторонним расположением выступов относительно полотна</p>
3			<p>Заготовки штампованные с тонкими полотнами большой площади, тонкими высокими рёбрами</p>
4		<p>Комбинация элементов</p> 	<p>Заготовки штампованные сложной формы с тонкими полотнами и рёбрами</p>

При разработке конструкции оснастки следует учитывать соответствие принципу подобия, связанному с протеканием подобных физических явлений в геометрически подобных системах, как говорится в первой теореме подобия [7]. Или отношения размеров чернового ручья штампа являются инвариантами подобия.



а  
б- образец из мягкого материала

Рис. 1 – Заготовка из пластилина

Геометрические параметры поковки 1-ой группы, подгруппы а в предварительном ручье штампа, соответствующие разработанному автором приему штамповки, приведены на рис. 2.

При сравнении схемы заполнения полости штампа для титановых сплавов (рис.3) и картины распределения слоев заготовки (рис.4, а), полученной при экспериментальном моделировании процесса штамповки поковки П-образной формы, была установлена адекватность принятой модели для качественного исследования механизма формоизменения заготовки.

Схема заполнения штампа при экспериментальном моделировании штамповки соответствует ожидаемой для титановых сплавов [3], и, следовательно, модель адекватно описывает течение металла с учетом предъявленных требований к материалу модели и конструкции модельной оснастки.

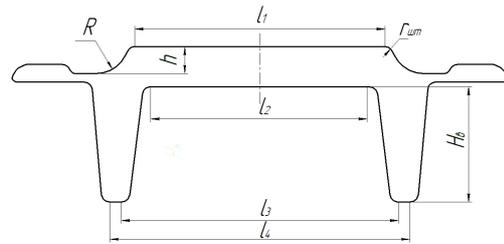


Рис. 2 - Геометрические параметры поковки 1-ой группы, подгруппы а, на предварительной стадии штамповки

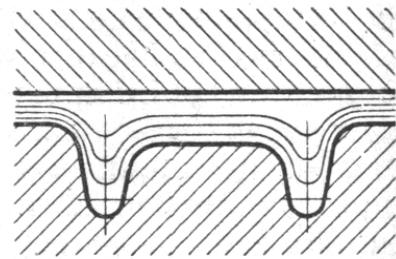
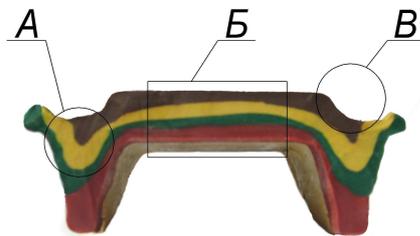


Рис. 3 – Схема заполнения полости штампа при штамповке



а

б

А – область формирования П - образного выступа; Б – область формирования полотна; В – полость сформированная в теле поковки за счет создания дополнительного (направляющего) выступа на верхней гравюре штампа; Г – область незаполнения ручья штампа; Д – область чрезмерного вытекания материала заготовки в облой; h – величина недоштамповки выступа по высоте

Рис. 4 - Окончательная форма заготовки в предварительном ручье (а) и форма заготовки в случае установки заготовки со смещением (б)

В результате проведенных исследований определены предварительные размеры заготовки для штамповки, обеспечивающие заполнение ручья по высоте, установлена эффективность заполнения самого выступа за счет изменения направления скорости течения металла, равномерность деформации слоев пластилина в теле поковки и их эквидистантность контуру заготовки (рис.4, а).

Материал заготовки полностью заполнил ручей штампа, выбранная ширина мостика облойной канавки позволила создать нужное сопротивление течению материала, обеспечивающее заполнение П-образных выступов по высоте. Выбранные геометрические параметры направляющих выступов (радиус и расстояние между ними) обеспечили преимущественное затекание материала заготовки в П-образный выступ (рис.4, а область А) до вытекания металла в облой. При этом установлено, что благодаря разработанному приему штамповки обеспечивается проработка труднодеформируемых средних слоев материала. На рис. 4,а видно, что средние слои заготовки участвуют в формировании как полотна так и оребрения детали и вытекают в облой, а верхний и нижний слой участвуют лишь в формировании полотна и оребрения соответственно (что соответствует схеме заполнения полости штампа, приведенной в литературе).

В результате экспериментального моделирования процесса штамповки показана важность базирования и правильной установки заготовки в полости штампа. Так на рис.4, б приведена форма заготовки в случае неправильной установки со смещением вертикальной оси симметрии заготовки на величину  $\delta/a = \pm 0,036$  от оси симметрии штампа (где  $\delta$  - величина смещения,  $a$  - расстояние между ребрами). Заготовку в данном случае следует отнести к браку ввиду того, что недоштамповка по высоте ребра (рис.3, б зона Г) достигает величины 12% от заданной высоты. Также следует отметить чрезмерное вытекание металла в облой с противоположной стороны (рис.3, б зона Д). При этом смещение заготовки в полости штампа оказывает наибольшее влияние на область формирования П-образного выступа (рис. 4,б зона Г, Д), приводя в приведенным выше дефектам. В тоже время практически отсутствует влияние неправильной установки на формирование области полотна.

Таким образом, установлена важность точности расположения заготовки в штампе, пренебрежение которой приводит к получению некачественной продукции и увеличению доли брака. По мнению автора статьи это является недопустимым в условиях современного рынка и не позволит обеспечить конкурентоспособность авиационной техники. Назначение технологического допуска в аэрокосмической отрасли еще не нашло должного развития. Это связано с тем, что он не имеет вполне определенного и единственного значения в количественном представлении (в отличие от конструкторского и эксплуатационного допуска), а имеет множество значений соответствующих построению конкретного операционного технологического процесса. Поэтому актуальным на данный момент представляется развитие работы по определению технологического допуска на установку заготовки в предварительном ручье штампа (1-ой группы, подгруппы а) с помощью компьютерного моделирования. Целью данного исследования является выявление конкретных значений допустимого смещения заготовки, не приводящего к образованию недоштамповки

ребер, а также не приводящему к неравномерному распределению напряжений и деформаций в теле поковки и как следствие возникновению остаточных напряжений, короблению и более интенсивному износу инструмента.

Проведено компьютерное моделирование процесса штамповки поковки 1-ой группы, подгруппы а с заданным смещением заготовки в предварительном ручье штампа с направляющими выступами в конечно-элементной (КЭ) системе. Установлено, что данная КЭ система адекватно описывает напряженно-деформированное состояние поковки с точностью до 15 %. Проверка производилась путем сравнения расчетных данных с результатами эксперимента, проведенного авторами работы [8].

Разработана конечно-элементная модель в которой, приложение нагрузки к заготовке моделируется путём задания перемещения вдоль вертикальной оси верхней половинки штампа за один шаг (процесс штамповки в предварительном ручье был разбит на 100 шагов). Начальная скорость движения инструмента задана равной 0,25 м/с.

Деформации обеих частей штампа по сравнению с деформациями заготовки пренебрежимо малы, поэтому они моделируются как жёсткие тела. Контактное взаимодействие заготовки с частями штампа моделируется кинематическим условием непроникновения, условием равенства нормальных сил на контактных поверхностях штампа и заготовки, касательной силой, обусловленной трением между контактирующими телами (коэффициент трения для случая горячей штамповки со смазкой  $\mu = 0,5$ ).

Форма оснастки и исходной заготовки приведены на рис.5. На рис. 6 приведены форма заготовки и распределение интенсивности напряжений и деформаций на окончательной стадии штамповки.

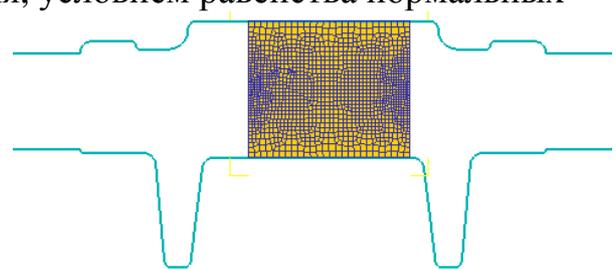


Рис. 5 - Начальное состояние КЭ модели штамповки

При проведении компьютерного моделирования установлено, что при смещении заготовки в полости штампа на величину  $\delta/\dot{a} = \pm 0,036$  (рис.6,в г) на окончательной стадии процесса мы получаем недоштамповку П-образного выступа на 9% по высоте (при моделировании с использованием мягких материалов данная величина достигала 12%, что может быть вызвано различным заданием механизма деформирования материала и контактных условий). Полученную деталь в данном случае следует отнести к браку. Распределение напряжений и деформаций носит неравномерный характер, максимальные наблюдаются в зоне перехода полотна в П-образный выступ и достигают значения 360...450 МПа при интенсивности деформаций 2,6...3,1.

В случае смещения заготовки на величину  $\delta/\dot{a} = \pm 0,018$  геометрия поковки оформлена полностью без дефектов формы, однако анализ распределения напряжений и деформаций не позволяет считать ее годной, ввиду того, что в области перехода полотна в П-образный выступ (противоположно заданному смещению) также наблюдается зона повышенных напряжений и деформаций.

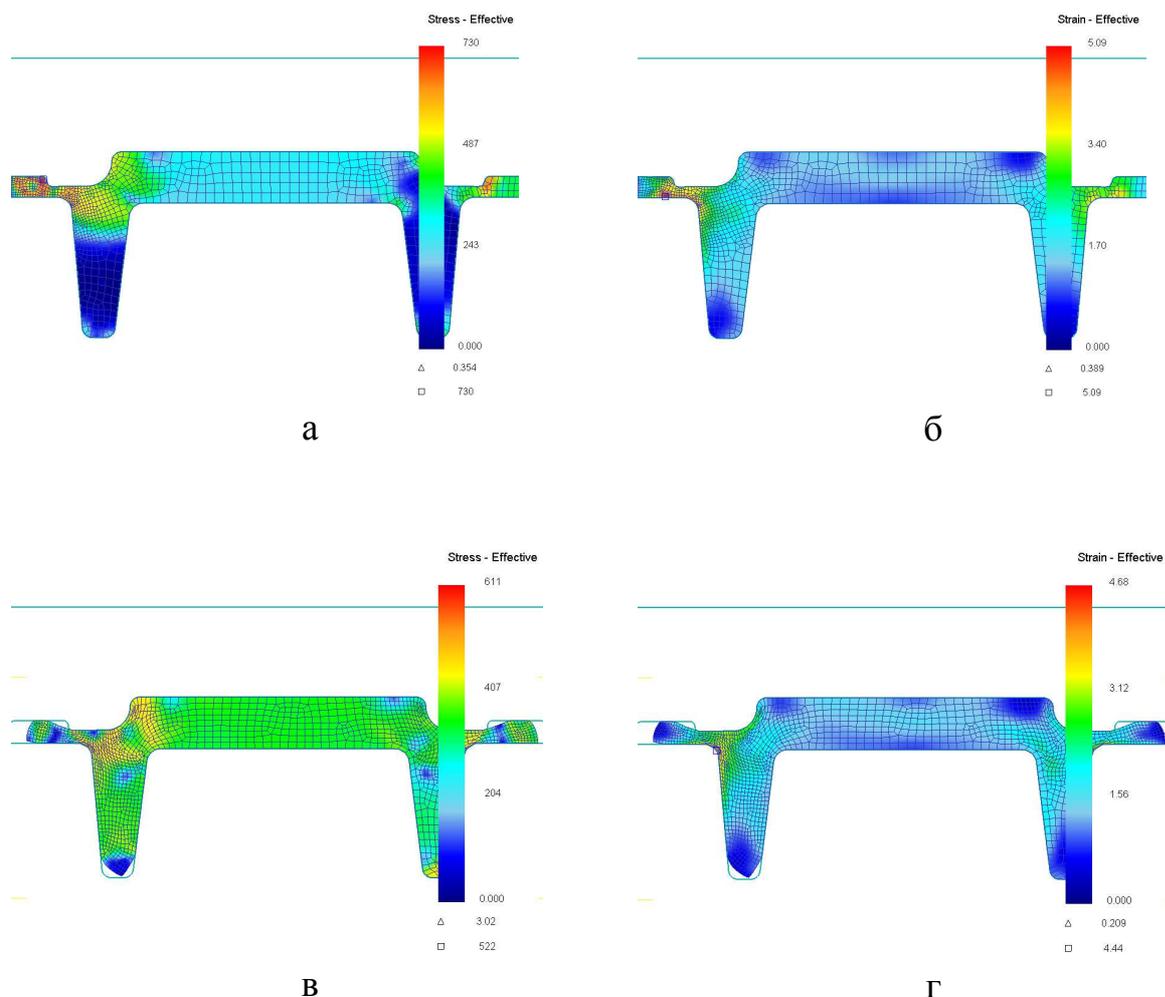


Рис. 6 - Распределение интенсивности напряжений (а,в) и деформаций (б,г) на окончательной стадии процесса при смещении заготовки:  $\delta/a = \pm 0,018$  (а,б);  $\delta/a = \pm 0,036$  (в,г)

Величина интенсивности напряжений при этом достигает 430...520 МПа при интенсивности деформаций 3,0...4,1. Такое распределение напряжений и деформаций может привести к короблению детали, также более интенсивному износу штампа в области перехода полотна в П-образный выступ и мостика облойной канавки. Таким образом использовать такую заготовку для дальнейшего деформирования возможно лишь с введением операции промежуточного отжига.

Анализ сложности изготовления и технологических ограничений на конструкцию поковки группы горячештампованных заготовок с тонкими полотнами большой площади и тонкими и высокими ребрами из титановых сплавов типа ВТ-20 позволил выявить параметры, влияющие на технологическую точность процесса штамповки и как следствие качество готового изделия (заготовки и готовой детали). К наиболее важным из этих параметров можно отнести технологические ограничения на форму и расположение элементов поковки (геометрические параметры полотен и ребер). Ниже представлены основные технологические ограничения на конструкцию поковки:

- чем больше площадь полотна  $S$ , тем больше должна быть и толщина полотна  $h_{пол}$ , т.е. технологичность при этом меньше;
- чем больше отношение длины к ширине полотна  $a_{пол}/b_{пол}$ , тем толщина полотна  $h_{пол}$  может быть меньше;
- чем больше высота ребра  $h_p$ , тем больше должна быть его ширина  $b_p$  (в производственной практике принято  $h_p/b_p=6,5...10$ );
- чем больше высота ребра  $h_p$ , тем больше должно быть минимальное расстояние между ребрами  $a_{min}$ , т.к. быстро изнашивается выступ штампа формирующий полотно (принято считать  $a/h_p=2...10$ ).

В результате выполненных экспериментального и компьютерного моделирования процесса штамповки установлена важность точности расположения заготовки в штампе, существенным образом влияющее на качество готовой продукции. Получены практические рекомендации по расположению заготовки в штампе – допустимое смещение заготовки по плоскости установки до  $\delta/a = \pm 0,012$ . Превышение приведенного допустимого значения приводит либо к появлению брака (недоштамповка ребер по высоте) либо к увеличению трудоемкости штамповки вследствие введения дополнительных технологических операций.

**Список литературы:** 1. Братухин А.Г. Современные технологии авиастроения / Под ред. А.Г. Братухина, Ю.Л. Иванова – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с. 2. Савамура И. Пластическая обработка титановых сплавов / И. Савамура // Киндзоку. – 1983. – Т.53, №9. – С. 21-26. 3. Корнеев Н.И. Ковка и штамповка цветных сплавов: справочник / Н.И. Корнеев, В.М. Аржаков, Б.Г. Бармашенко и др. – М., «Машиностроение», 1971. – 232 с. 4. Маковецкий В.В. К расчету процессов получения заготовок на основе метода Треффца / В.В. Маковецкий, А.В. Маковецкий // Вісник донбаської державної машинобудівної академії: Зб. наук. праць. №2(4) – Краматорськ: ДДМА, 2006. – С. 132–137. 5. Авано Т. Моделирование процессов объемной штамповки / Т. Авано, А. Дано // Сосэй то како. – 1972. – Т. 13, №141. – С. 768–775. 6. Cook P.M. Models from plastic of materials / P. M. Cook // Metal Treatment & Drop Forging. – 1953. – Т. 20, №11. – р. 511. 7. Кирпичев М.В. Теория подобия / М.В. Кирпичев. – М.: Изд. АН СССР, 1953. – 94 с. 8. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия. 1983. – 352 с.

*Поступила в редколлегию 25.12.2010*

**УДК 658.5.012.7**

**М.Е. ТАРАНЕНКО**, докт. техн. наук, проф., НАКУ «ХАИ», г. Харьков

**А.В. ДЕМЧЕНКО**, аспирант, НАКУ «ХАИ», г. Харьков

### **НЕОБХОДИМОСТЬ ИНТЕРАКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ЛОКАЛЬНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ**

В статье обосновывается возможность сокращения на 70...75% трудоемкости и цикла штамповки крупногабаритных листовых деталей на электрогидравлических прессах. Такой результат достигается уменьшением времени на контроль формоизменения путем внедрения