

УДК 621.77

В. Н. ЛЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;
И. В. ГАЛАСЬ, магистрант, НТУ «ХПІ».

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Проведено численное моделирование процесса комбинированного выдавливания, дополнительно проведены расчеты процессов прямого и обратного выдавливания. На основе энергетического метода разработана математическая модель процесса комбинированного выдавливания, позволяющая определить энергосиловые параметры процесса как функции от основных параметров. Разработанная математическая модель реализована в математическом пакете SKYLAB и в виде программного продукта (подсистемы САПР) в среде Visual Basic.

Ключевые слова: выдавливание комбинированное, модель математическая, параметры энергосиловые.

Введение. По мере развития современного производства и расширения номенклатуры изделий все большую актуальность приобретают проблемы разработки и внедрения малоотходных технологий.

К таким технологиям можно отнести процессы холодной объемной штамповки (ХОШ) и в частности изготовление деталей класса втулок методом комбинированного выдавливания. К деталям данного класса (рис. 1) относятся собственно втулки, гильзы, стаканы, вкладыши, т.е. детали, образованные наружными и внутренними поверхностями вращения, имеющие общую прямолинейную ось. Некоторые основные виды подшипниковых втулок служат как опоры вращающихся валов. Наиболее часто применяют втулки с $L/D \geq 3$.



Рис. 1 – Детали типа втулок

Перспективным направлением развития современного производства металлических изделий в машино- и приборостроении является применение ресурсосберегающих технологических процессов, повышающих производительность труда и качество продукции. Этим требованиям в полной

мере удовлетворяют процессы объемной штамповки штучных заготовок, полученных малоотходными способами разделительных операций. Однако, в отличие от хорошо изученных процессов листовой штамповки, до сих пор не существует алгоритма, руководствуясь которым можно назначить оптимальные технологические параметры, обеспечить требуемое формоизменение, а также приемлемую для производства прочность и стойкость рабочего инструмента. В большинстве случаев разработка технологии с использованием того или иного вида выдавливания представляет уникальный в своём роде процесс, результаты коего во многом зависят от квалификации технолога. Традиционные методы проектирования, отладки и освоения технологии предусматривают проверку множества вариантов с использованием метода «проб и ошибок». При этом каждый вариант требует экспериментальной проверки, а значит, изготовления нового инструмента, штампа или даже модернизации штампового оборудования, что приводит к дополнительным затратам времени и средств. Экономическая нецелесообразность такого подхода наиболее очевидна в случае изготовления небольшой партии деталей, когда затраты на отработку технологии сделают производство не рентабельным. Конкурентоспособной в современных условиях является только мобильная технология, которую можно быстро и оптимально перестроить под изменяющиеся параметры формы и материала штампуемых деталей. Для интенсификации процесса разработки технологических операций объёмной штамповки необходима информация о напряжённно-деформированном состоянии (НДС) материала заготовки, полуфабриката (детали), а также сведения об откликах системы штамп – инструмент – деформируемый образец на изменение технологических параметров. Для получения соответствующей информации могут быть использованы методы экспериментального исследования и теоретического моделирования, а также их комбинация.

Однако применение таких экспериментальных методов исследования НДС, как метод делительных сеток, моделирования на многослойном материале, метод твёрдости, метод микроструктурных измерений к процессам объёмной штамповки с большой величиной деформации в очаге сопряжено с определёнными трудностями. Методы делительных сеток, моделирования на многослойном материале и микроструктурных измерений требуют однородного и монотонного протекания деформации. В процессах объёмной штамповки в значительной части заготовки деформация неоднородна и

немонотонна. Кроме того, при использовании метода делительной сетки для исследования НДС необходимо изготавливать разъёмные образцы, испытывающие сжимающие напряжения в плоскости разъёма. Для метода микроструктурных измерений необходимо подготовить равноосную структуру материала деформируемого образца до деформации. Использование метода твёрдости при большой величине деформации ограничено тем, что кривые зависимостей имеют, так называемый участок насыщения, на котором небольшому изменению величины показателя твёрдости соответствует значительное изменение интенсивности напряжений и деформации. При большой величине деформации результаты, полученные с помощью метода твёрдости, будут неполными и малодостоверными.

Альтернативой экспериментальному исследованию и теоретическому анализу является использование имитационного моделирования процессов объёмной штамповки с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [1, 2].

Постановка задачи исследования. Для проверки адекватности математической модели, положенной в основу подсистемы САПР ХОШ деталей типа втулки, провести численные эксперименты с использованием метода конечных элементов и сравнить полученные результаты.

В основу МКЭ положено разбиение сплошной среды (в частности объёма деформируемого тела) на множество простых геометрических элементов (плоские элементы: прямолинейные и криволинейные, правильные и произвольные треугольники и четырёхугольники; объёмные элементы: прямолинейные и криволинейные четырёхгранники и шестигранники). Элементам в целом и каждому узлу в частности придают определённые степени свободы, а каждый элемент обладает свойствами материала дискретизированной среды.

При применении МКЭ точность полученных результатов напрямую зависит от выбранных значений базы элемента и шага по времени. Для решения задач ОМД с помощью МКЭ выбор базы элемента и величины шага по времени зависит от поставленной задачи. Если преследуется цель получения общей картины формоизменения металла в процессе ОМД, то эти два параметра можно устанавливать максимально возможными, насколько это позволяют сделать особенности геометрии инструмента и заготовки (в этом случае время решения существенно уменьшается за счет снижения точности решения). Но для получения точной картины формоизменения металла и информации по

основным параметрам ОМД базу элемента и шаг необходимо выбирать минимально возможными (в этом случае расчетное время возрастает за счет повышения точности решения).

Применение МКЭ при исследовании процесса выдавливания позволяет рассчитать большое число вариантов. Кроме того, отладка технологии на компьютере позволяет избежать материальных и временных затрат на изготовление натурной технологической оснастки и доводки технологии, а в ряде случаев отказаться от применения ошибочного или неэффективного технологического процесса.

В настоящее время существует достаточно много специализированных и общинженерных пакетов (программных комплексов) конечноэлементного анализа. Более простые в использовании пакеты, такие как FastForm, DaуnaForm, специально адаптированы к процессам холодной штамповки. Расчёт процесса формоизменения при выдавливании с большими деформациями требует, как правило, использования специализированных программ, например, *AutoForm*, *Qform*, *Deform 3D*. Основной сложностью при применении пакетов, использующих МКЭ – анализ, является постановка задачи адекватная физической природе исследуемого процесса. Это положение в полной мере относится и к исследованию пластической деформации, в том числе и процессу выдавливания. Необходимым условием эффективного применения ПК для расчета технологических процессов ОМД является требование корректности результатов компьютерного моделирования процессов, адекватности их реальному процессу.

Математический эксперимент процесса комбинированного выдавливания выполняли методом конечных элементов с использованием пакета Deform-3D. Данный пакет позволяют моделировать широкий спектр процессов обработки давлением, имеет дружелюбный пользовательский интерфейс и хорошо зарекомендовал себя на практике.

Считали, что деформации пуансона и матрицы по сравнению с деформациями заготовки пренебрежимо малы, поэтому они моделируются как жёсткие тела. Контактное взаимодействие заготовки с рабочими инструментами моделируется кинематическим условием непроникновения, условием равенства нормальных сил на контактных поверхностях штампа и заготовки, касательным напряжением, обусловленным трением между контактирующими телами. В ходе отработки задачи при появлении зон

затруднённого деформирования металла программа в автоматическом режиме перестраивала сетку конечных элементов.

Для выдавливания использовали штучную заготовку с размерами: высота $h=50$ мм, диаметр $d=50$ мм. Материал заготовки – сталь 40. Выдавливание производилось нахолодно. Рабочий инструмент (матрица и пуансон) имел постоянную температуру, равную 20°C . Сетка конечных элементов для них не строилась. В качестве оборудования, при моделировании, использовался гидропресс.

Исходные данные, необходимые для моделирования данного процесса занесены в табл. 1. Моделирование процесса проводилось в 5 этапов:

1. Геометрическое моделирование заготовки (рис. 2) и инструмента в системе ProEngineer.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

Процесс	Комбинированное выдавливание
Размеры заготовки	$d = 50$ мм, $h = 50$ мм, $h/d=1$
Материал заготовки	Сталь 40
Температура начала выдавливания	20°C
Температура рабочих инструментов	20°C
Коэффициент трения	0,2

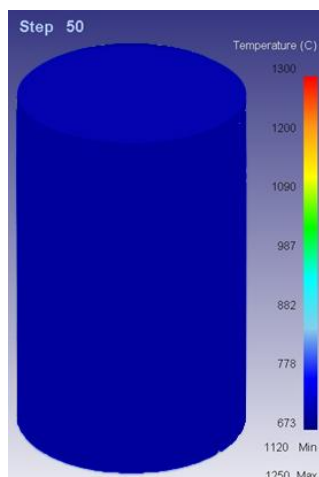


Рис. 2 – Исходная заготовка

2. Исходное положение заготовки и рабочего инструмента (матрицы и пуансона) показаны на рис. 3.

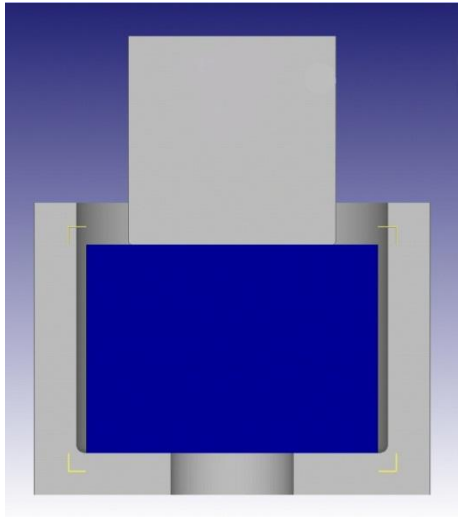


Рис. 3 – Исходное положение заготовки и рабочего инструмента

3. Разбивка заготовки на конечные элементы (генерация сетки) (рис. 4).

4. Выбор шага расчетов. Для проведения математического эксперимента был выбран шаг 3 мм, с сохранением каждого 5 шага операции.

5. Собственно расчет процесса комбинированного выдавливания (рис. 5). Расчет останавливался, когда пуансон и матрица находились на расстоянии 30 мм друг от друга.

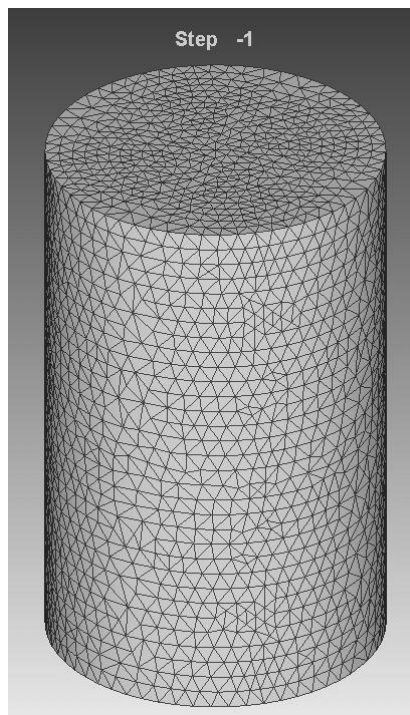


Рис. 4 – Генерация сетки

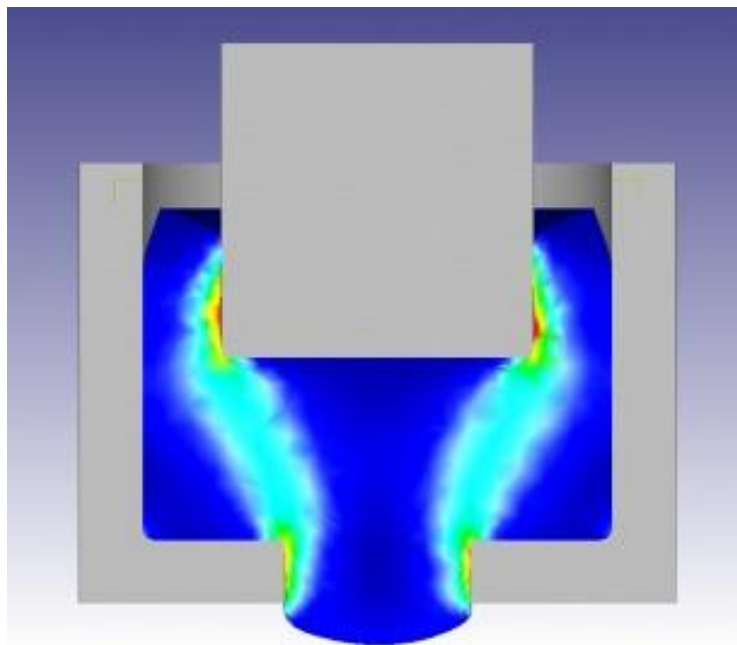


Рис. 5 – Процесс комбинированного выдавливания

На рис. 6 показаны напряжения и деформации в деформируемой заготовке при комбинированном выдавливании, полученные в результате моделирования в пакете Deform 3D.

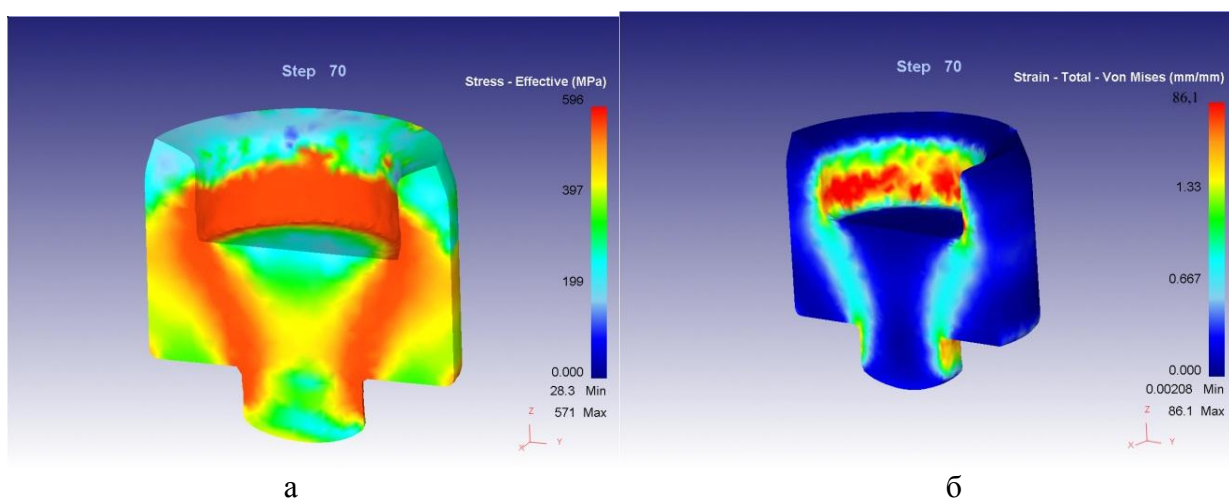


Рис. 6 – Распределения напряжений и интенсивности деформаций на конечной стадии выдавливания: а – распределение напряжений; б – интенсивности деформаций

Распределение напряжений по телу заготовки показаны на рис. 6, а. Высокая нагрузка появляется в местах контакта поверхностей заготовки с режущей кромкой рабочих инструментов.

Интенсивность деформаций при этом (рис. 6, б) не превышает 8,6.

В процессе выполнения работы была разработана математическая модель для комбинированного выдавливания энергетическим методом. Так как

расчеты произведены в общем виде, модель работает как для комбинированного, так и для прямого и обратного выдавливания. Для этих же схем также были проведены расчеты с помощью в пакете Deform 3D.

Моделирование процесса проводилось в 5 этапов:

1. Геометрическое моделирование заготовки и инструмента в системе ProEngineer.

2. Задание исходного положения заготовки и рабочего инструмента (матрицы и пуансона) для прямого и обратного выдавливания (рис. 7).

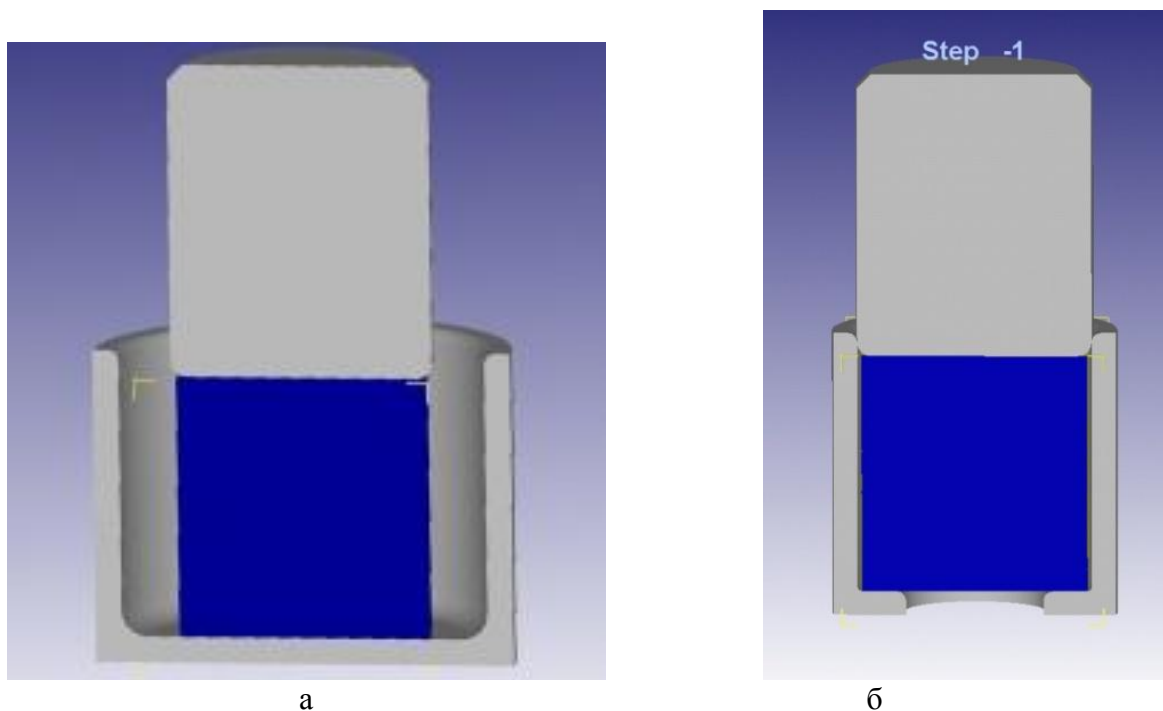


Рис. 7 – Исходное положение заготовки и рабочего инструмента:
а – обратное выдавливание; б – прямое выдавливание

3. Разбивка заготовки на конечные элементы (генерация сетки).

4. Выбор шага расчетов. Для проведения математического эксперимента был выбран шаг 3 мм, с сохранением каждого 5 шага операции.

5. Процесс моделирования прямого и обратного выдавливания (рис. 8).

Расчет останавливался, когда пуансон и матрица находились на расстоянии 10 мм друг от друга при обратном выдавливании и на расстоянии 25 мм при прямом.

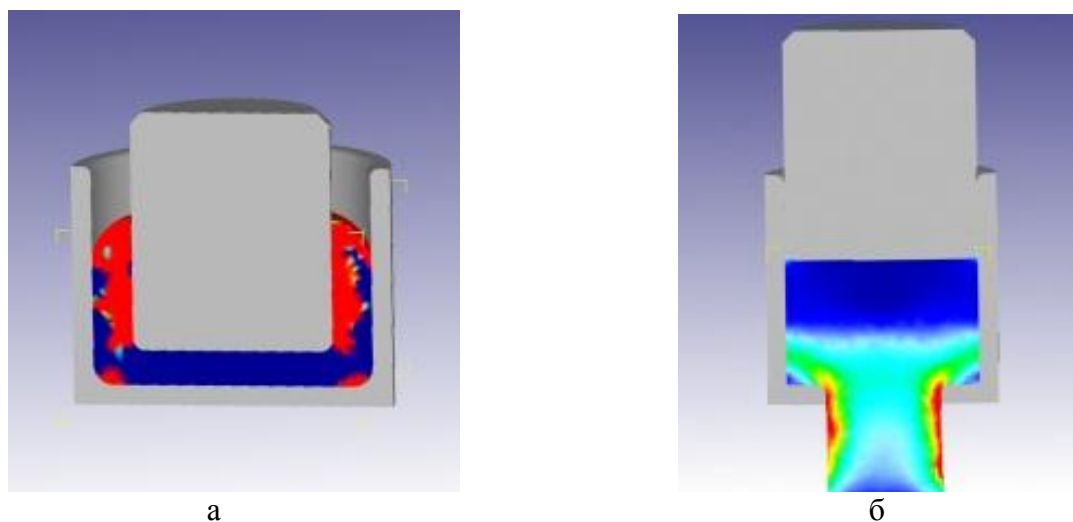


Рис. 8 – Процессы прямого и обратного выдавливания: а – процесс обратного выдавливания; б – процесс прямого выдавливания

На рис. 9 показаны распределения напряжений и деформаций в заготовке при обратном выдавливании.

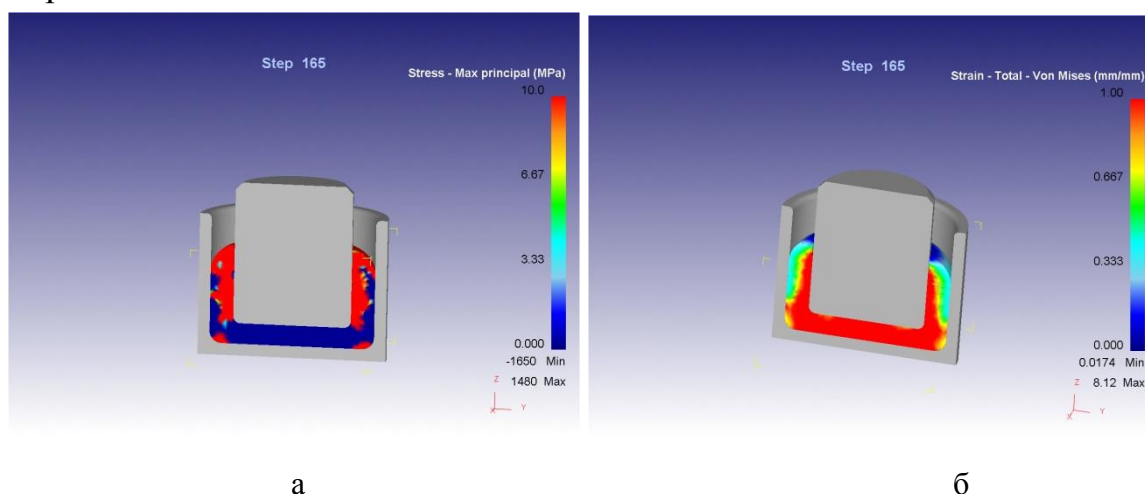


Рис. 9 – Распределения напряжений и интенсивности деформаций на конечной стадии выдавливания: а – процесс обратного выдавливания; б – процесс прямого выдавливания

Распределение напряжений по сечению заготовки показаны на рис. 9, а. Высокая нагрузка появляется в местах контакта поверхностей заготовки с режущей кромкой рабочих инструментов.

Интенсивность деформаций при этом (рис. 9) не превышает 8,12.

На рис. 10 показаны распределения напряжения и деформаций в заготовке при прямом выдавливании.

Распределение напряжений по сечению заготовки показаны на рис. 10, а.

Интенсивность деформаций при этом (рис. 10, б) не превышает 5,45. Результаты моделирования энергетическим методом и моделирования МКЭ

приведены в табл. 2. После проведенного анализа, видим, что максимальное усилие получаемое при обратном выдавливании превышает значение max усилия при прямом в 1,61 раз. А значение усилия при комбинированном выдавливании – в 2,6 раза. По этому, можно сделать вывод, что комбинированное выдавливание является оптимальным процессом холодной объемной штамповки для изготовления деталей класса втулок и имеет наименьшее максимальное усилие. Расхождение значений, полученных энергетическим методом и методом конечных элементов, колеблются в пределах 5-8%.

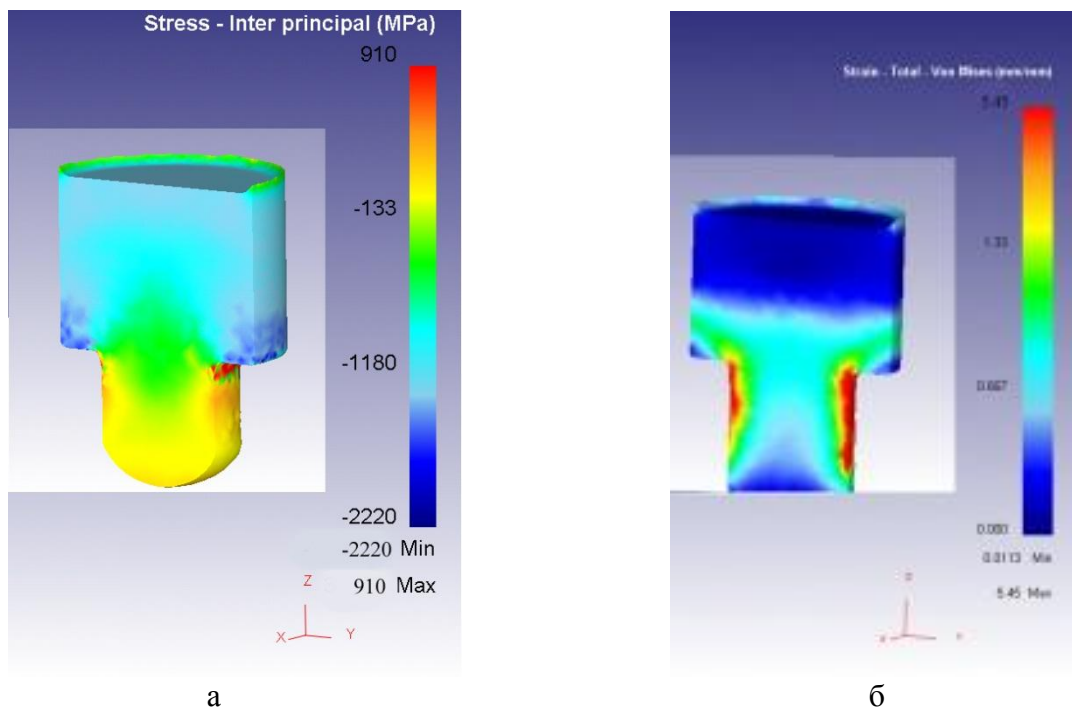


Рис. 10 – Распределения напряжений и интенсивности деформаций на конечной стадии выдавливания: а – процесс обратного выдавливания; б – процесс прямого выдавливания

Таблица 2 – Результаты математического эксперимента и математического моделирования

	Комбинированное выдавливание	Прямое выдавливание	Обратное выдавливание
Энергетический метод (усилие, МПа)	609	965	1554
МКЭ (усилие, МПа)	571	910	1480

Выводы:

1. Для проверки адекватности математической модели, построенной с использованием энергетического метода с использованием метода конечных элементов проведено численное моделирование процесса комбинированного

выдавливания, дополнительно проведены расчеты процессов прямого и обратного выдавливания.

2. Получены распределения напряжений и деформаций для этих процессов. Показано, что минимальное усилие соответствует процессу двумя степенями свободы течения металла. 3 Расчетные значения усилий деформирования, полученные в результате математического моделирования энергетическим методом, имеют погрешность 5-8% по сравнению с результатами, полученных при расчете МКЭ.

Список литературы: 1. Иванов К. М., Лясников А. В., Гуменюк Ю. И., Матвеев С. А. Исследование технологических возможностей поперечного выдавливания методом конечных элементов // Металлообработка.-2001.-№2. 2. Иванов К. М., Шевченко В. С., Юргенсон Э. Е. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД: Учебное пособие. С-Пб: Институт Машиностроения, 2000.

Поступила в редколлегию 03.04.2014

УДК 621.7.073.004

В. К. ЛОБАНОВ, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;

Г. И. ПАШКОВА, канд. техн. наук, нач. лаборатории, ГП «Завод имени В.А. Малышева», Харьков.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ШТАМПОВКИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ОБЖИМОМ

Изложены технологические особенности процесса горячей штамповки с последующим обжимом, конструкции и материалы рабочих частей штамповой оснастки, разработан классификатор поковок, рекомендуемых для штамповки с последующим обжимом. Установлено, что штамповка с последующим обжимом, характеризующаяся повышенными показателями по эффективности использования металла и качества материала поковок, рекомендуется для широкого применения при производстве предложенных групп поковок.

Ключевые слова: горячая штамповка, обжим, матрица, внеконтактная деформация

Введение. Одним из направлений совершенствования кузнечного производства является освоение прогрессивных технологических процессов штамповки на универсальном оборудовании, обеспечивающих изготовление поковок с минимальным расходом металла и высокой производительностью.

Известна высокая эффективность штамповки с последующим обжимом пустотелых осесимметричных заготовок [1]. В настоящее время такие технологические процессы освоены и внедряются на ряде предприятий.

Однако при разработке технологии штамповки некоторые параметры (высота промежуточной поковки, профиль рабочей части матрицы, диаметр