

УДК 621.7.044.4+539.374.4

Нарыжный А. Г.
Тараненко М. Е.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Электрогидравлическая штамповка (ЭГШ) основана на действии электрического разряда в жидкости. При электрическом разряде в жидкости возникает парогазовая полость (ПП), которая оказывает импульсное воздействие на окружающую жидкость, в результате чего в жидкости распространяется волна давления, а затем мощный конвективный поток, сообща деформирующие тонкостенную заготовку. Для интенсификации действия ПП на заготовку часто используют разрядную полость (РП), имеющую вид короткого ствола (стакана), который канализирует и концентрирует волну давления и поток жидкости [1].

Действия волны давления и потока на заготовку имеют местный ограниченный характер. Пластические деформации заготовки также имеют локальный характер как на этапе свободного движения, так и при столкновении с матрицей. Для придания необходимой формы большеразмерной детали применяется последовательность локальных импульсных действий; при этом напряженное и деформированное состояние (НДС) детали получает накопленный упруго-пластический характер и сопровождается многочисленными упругими разгрузками. От последовательности и размещения мест приложения импульсных действий зависит структура и величины полей остаточных НДС, другими словами, полями остаточных НДС можно управлять.

Жидкость, выполняя роль пуансона, деформирует заготовку. Изменение формы заготовки, в свою очередь, существенно изменяет характер движения (поле скоростей) жидкости в сравнении, например, с таковым при жесткой и неподвижной заготовке.

Окончательная форма детали, а также остаточное НДС имеют характер завершающего стационарного состояния, итога движений технологической системы ЭГШ. Остаточное НДС устанавливается по окончании процессов движения, имеющих упруго-пластический ударно-волновой, а в конце – ударно-колебательный характер во взаимодействии с жидкостью. Остаточные НДС детали отражают как историю вынуждающего движение импульсного нагружения, так и историю вынужденного взаимодействия с матрицей.

Остаточные напряжения, в особенности имеющие растягивающий характер, оказывают негативное влияние на процессы коррозии, усталостную прочность, а также характер разрушения детали. Сжимающие остаточные напряжения вызывают коробление детали. Возникают специальные требования к остаточным НДС, обусловленные особенностями изготовления и эксплуатации, например, минимальное коробление, создание в детали зон с определенным упрочнением, минимизация времени изготовления, минимизация допусков и т. д. В связи с таким влиянием и требованиями возникает задача изучения закономерностей и особенностей формирования картины распределения остаточных напряжений и деформаций в детали, их связи с параметрами техпроцесса, управления техпроцессом для достижения поставленных целей и снижения негативных эффектов.

Исследование остаточных НДС само по себе затруднительно [2], тем более затруднительно исследование кинетики их образования, когда процессы имеют кратковременный ударно-волновой и колебательный характер и обусловлены действием движущейся жидкости. В работе [3] для исследования подобных процессов рекомендуется использовать численное компьютерное моделирование. Модели с конечно-элементной дискретизацией жидкости показывают развитие сильных вихревых течений, в результате которых происходит разрушение сетки, рост ошибки и прекращение вычислительного процесса [4]. Альтернативными методами являются бессеточные методы, например SPH [5] (Smooth Particle Hydrodynamics), однако их применение для моделирования ЭГШ не освещено в литературе.

Целью работы является описание механико-математической модели (МММ) процесса формирования остаточных напряжений и деформаций в заготовке при ЭГШ, предназначенной для реализации на компьютере в вычислительной среде LS DYNA [6], а также некоторых особенностей ее применения. Модель может быть расширена для анализа последовательного деформирования, коробления, а также деформирования и разрушения детали после выемки из матрицы в процессе эксплуатации с учетом как эксплуатационных, так и остаточных напряжений. Модель пригодна для анализа деформирования не только осесимметричных изделий, но и деталей любой сложной формы.

Описание механико-математической модели. Полная МММ ЭГШ должна отражать следующие взаимосвязанные процессы как в элементах, так и между элементами технологической системы, находящимися в различных фазовых состояниях, протекающие на границах раздела фаз:

- образование ПГП, ее взаимодействие с электрическим разрядом, жидкостью и стенками РП;
- взаимодействие жидкости и стенок камеры;
- взаимодействие жидкости и заготовки;
- взаимодействие заготовки и матрицы.

По результатам ранее проведенных экспериментов [1] сделаны выводы:

- фронт волны давления и граница ПГП в РП плоские;
- ПГП заполняет РП равномерно, граница ПГП движется по стволу со скоростью 30–70 м/с;
- длина разрядной полости в рабочих условиях должна быть достаточной, чтобы ПГП не выходила за пределы РП.

Следовательно, взаимодействие разряда и ПГП, ПГП и РП, а также действие ПГП на жидкость суммарно можно заменить действием жесткого поршня с плоской поверхностью,двигающегося в РП по некоторому закону и тем значительно упростить состав модели технологической системы и ее теоретическую сложность. Ниже использовано данное упрощение

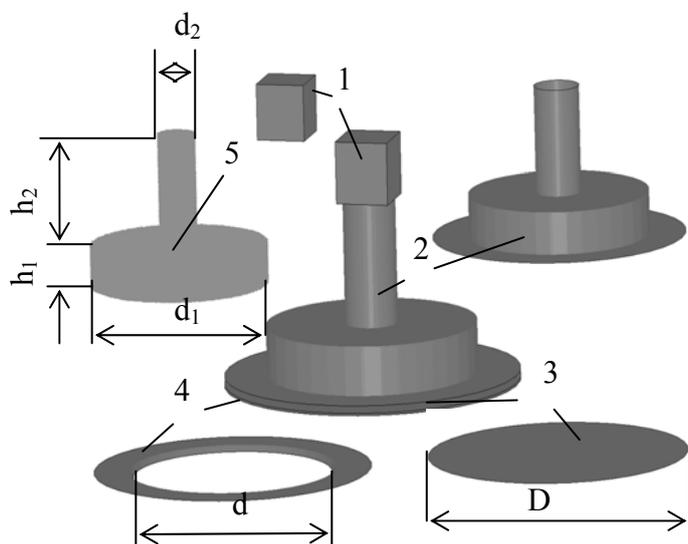


Рис. 1. Система (в центре), ее элементы и их основные размеры:

1 – поршень; 2 – камера; 3 – заготовка;
4 – матрица-кольцо; 5 – объем жидкости; D – диаметр заготовки; d – диаметр проема в матрице; d_1 , d_2 – диаметры столба жидкости; h_1 , h_2 – высоты столба жидкости

На рис. 1 показана схема предлагаемой поршневой МММ технологической системы ЭГШ, которая включает следующие элементы: поршень (1), камеру (2), заготовку-оболочку (3), матрицу (4) и жидкость (5).

Камера представляет собой тело вращения, в верхней части которого расположена РП. Камера недеформируема и неподвижна.

Поршень имеет сечение, превосходящее сечение РП для предотвращения истечения жидкости, его форма несущественна. Поршень недеформируемый, движется по заданному закону или испытывает действие заданной переменной по времени силы. Его радиальное движение или повороты исключены.

Матрица (на рис. 1 показана матрица для свободной вытяжки) представляет жесткое недеформируемое и неподвижное кольцо.

Заготовка представляет собой круглую тонкую пластину диаметром D и толщиной δ , выполненную из упруго-пластического материала с нелинейным степенным упрочнением вида:

$$\sigma_Y = A\varepsilon^n, \quad (1)$$

где σ_Y – текущее значение предела текучести; ε – пластическая деформация; A , n – коэффициенты. При снижении напряжений учитывается линейно-упругая разгрузка.

Жидкость – линейно-сжимаемая, вязкая, кавитирующая. Скорость изменения давления обусловлена упругостью:

$$\dot{p} = -K\dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (2)$$

где K – модуль объемного сжатия; $\dot{\varepsilon}$ – тензор скоростей деформаций. Скорость дивергента напряжений обусловлена вязкостью:

$$\dot{S}_{ij} = \nu \Delta l a \rho \dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (3)$$

где ν – вязкость; Δl – характерный размер; a – скорость звука; ρ – плотность. Кавитация учитывается посредством ограничения растягивающего напряжения:

$$p > p_0, \quad (4)$$

где p_0 – (отрицательное) напряжение разрыва столба жидкости. При увеличении давления выше указанного предела происходит схлопывание кавитационных пустот.

Между элементами системы предполагается взаимодействие контактного типа, которое включает условия непроницания (5), сжимающего характера нормальных напряжений (6) и ограничения касательных напряжений силами трения (7):

$$\Delta = \Phi_a(x_b, y_b, z_b) \geq 0; \quad (5)$$

$$\sigma_n \leq 0; \quad (6)$$

$$|\sigma_\tau| \leq f|\sigma_n|, \quad (7)$$

где Δ – величина зазора между контактирующими телами a и b ; $\Phi_a(x_a, y_a, z_a) = 0$ – уравнение поверхности тела a ; x_b, y_b, z_b – координаты точек поверхности тела b ; σ_n, σ_τ – нормальная и касательная компоненты тензора напряжений на поверхности тела; f – коэффициент трения.

Модель является существенно нелинейной ввиду ограничений, описываемых неравенствами (условия пластичности, разгрузки, кавитации и контакта) и не имеет решений в конечных вычислимых функциях.

В данной работе для дискретизации жидкости использован бессеточный метод SPH, для дискретизации прочих элементов системы – метод конечных элементов, а для дискретизации временных операторов – явный метод конечных разностей [7].

Ниже приведены и обсуждаются результаты, полученные для модели с жесткой заготовкой и заготовкой из материала типа Д16АМ: коэффициенты закона упрочнения $A = 3,008 \cdot 10^{10}$ Па; $n = 0,177$, модуль упругости первого рода $E = 6,9 \cdot 10^{10}$ Па; коэффициент Пуассона $\mu = 0,33$; плотность $\rho = 2,78 \cdot 10^3$ кг/м³; начальное значение предела текучести $\sigma_{Y0} = 10^8$ Па. Жидкость – вода с характеристиками: $K = 2 \times 10^9$ Па; $\theta = 0,1$; $\rho = 1000$ кг/м³. Размеры (см. рис. 1) $D = 280$ мм; $d = 200$ мм; $\delta = 1$ мм; $h_1 = 40$ мм; $h_2 = 100$ мм. Статический коэффициент трения $f = 0,1$. Возмущение создается силой, приложенной к поршню.

Изначально SPH частицы располагаются в узлах регулярной кубической сетки с шагом 2 мм, вследствие чего фактически между поверхностью камеры и SPH моделью жидкости существует начальный неоднородный зазор.

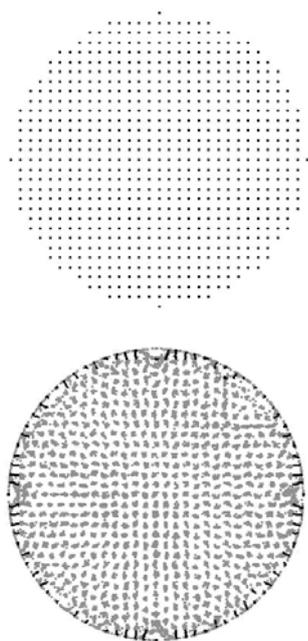


Рис. 2. Изменение структуры SPH частиц при осадке

На рис. 2 на виде сверху показаны серыми точками структуры SPH частиц в начальном ненагруженном состоянии (вверху) и после нагружения (внизу). Видно, что при нагружении система SPH частиц потеряла регулярность, что особенно заметно вблизи границы. Траектории граничных частиц, показанные черными линиями, имеют разную длину и ориентацию, близкую к нормали к поверхности контейнера. Начальный этап деформирования (осадка жидкости) протекает при малом сопротивлении, обусловленном вязкостью и инертностью жидкости, но не ее упругим сопротивлением.

Рассмотрена вычислительная устойчивость модели на большом промежутке времени. На рис. 3 показана зависимость от времени общей контактной силы давления на жесткую заготовку (верхняя кривая *A*) и на поршень (нижняя кривая *B*); силы измерены в ньютонах, время – в секундах. Обе кривые, в общем, повторяют закон изменения внешней силы, действующей на поршень, но направлены в противоположных направлениях, поскольку жидкость сжата. Силы линейно меняются на трех этапах длительностью 0,01 с каждый, а затем поддерживаются на постоянном максимальном уровне. Вначале сила растет от 300 Н до 3000 Н, затем – от 3000 Н до 30000 Н и, наконец, – от 30000 Н до 74460 Н, что соответствует ожидаемому давлению 300 ат. в сжатой жидкости.

Сила давления на заготовку заметно осциллирует при больших значениях. Осцилляции связаны с массовым проникновением SPH частиц сквозь стенки камеры, что является недостатком метода. При исчезновении SPH частицы локально нарушается равновесие по типу схлопывания кавитационного пузыря и ближайшие SPH частицы начинают колебаться; при массовом истечении частиц в колебательный процесс вовлекается весь объем жидкости.

Позже, примерно в момент времени 0,052 с, на этапе выдержки максимального давления происходит массовый выброс частиц в окружающее пространство, что объясняется ростом скоростей частиц в результате численной неустойчивости вычислительного процесса. По-видимому, у вычислительной неустойчивости есть механическая аналогия с разогревом вещества при его сжатии, сопровождающимся ростом средних скоростей частиц.

На рис. 4 показана зависимость осевых перемещений поршня (кривая *B*) и SPH частицы из верхнего уровня жидкости под ним (кривая *A*) при действии на поршень сжимающей силы, описанной выше; перемещения даны в метрах, время в секундах.

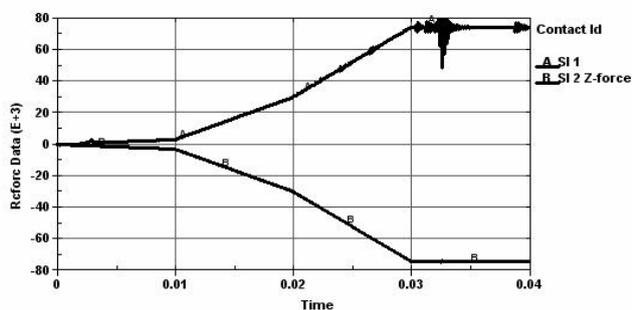


Рис. 3. Зависимость сил давления от времени

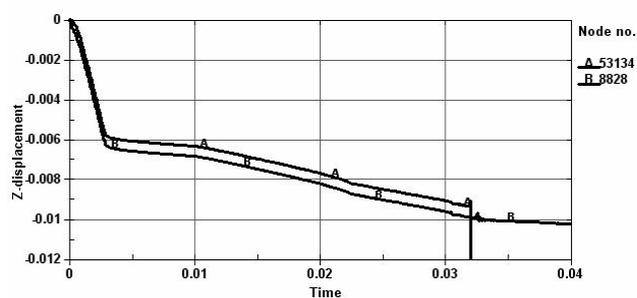


Рис. 4. Зависимость перемещений от времени

До момента времени 0,032 с кривые эквидистантны, что объясняется начальным зазором величиной около 0,5 мм между верхним слоем SPH частиц и поверхностью поршня. В указанный момент времени в результате неравновесного процесса при покидании SPH частицами объема возникают интенсивные хаотические движения с большими скоростями и перемещениями, что и наблюдается на рис. 4 (см. также осцилляции силы на рис. 3). Общая

кинетическая энергия системы самопроизвольно интенсивно растет, что объясняется вычислительной неустойчивостью вычислительного процесса. Возникают ложные решения, что порождает необходимость борьбы со специфической неустойчивостью системы SPH частиц.

Общий характер кривых – монотонное убывание, что связано с ростом нагрузки. На начальном этапе (осадка жидкости) скорость перемещения очень высока, что объясняется тем, что первоначально между фактической общей поверхностью регулярной системы SPH частиц и поверхностью камеры наблюдается неравномерный зазор, который и наполняется в первую очередь. В дальнейшем наблюдается три этапа практически линейного со временем изменения перемещений, которые по времени совпадают с тремя этапами изменения силы и давления. На этапе выдержки максимального давления наблюдается малое изменение перемещений, что объясняется уменьшением количества SPH частиц и их общей массы в результате проникания через стенки камеры и заготовку наружу.

Следует отметить, что осадка жидкости происходит без каких-либо проявлений числовой неустойчивости. Значительная величина перемещений при осадке указывает на целесообразность этого подготовительного этапа моделирования штамповки. Моделирование осадки жидкости исключает ложные решения, связанные со свободой движения в зазорах.

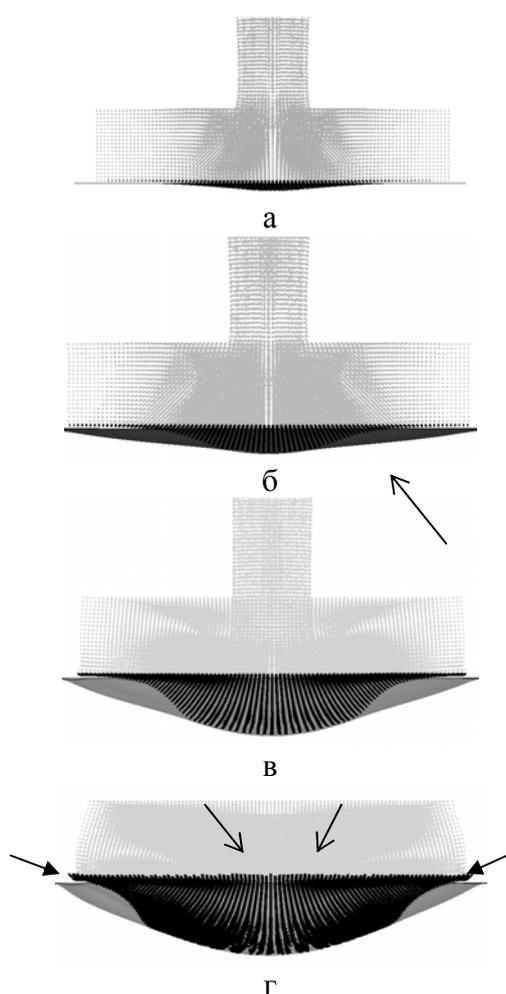


Рис. 5. Деформация заготовки

На рис. 5 показаны особенности деформирования заготовки на этапе совместного движения элементов системы в результате импульсного возмущения. Показан профильный вид системы без камеры и поршня в четыре последовательные момента времени (а, б, в, г). Серым светлым тоном показана структура SPH частиц. Серым темным тоном показана заготовка. Черные линии отмечают траектории движения SPH частиц, первоначально граничивших с заготовкой. Огибающая траекторий отмечает поверхность жидкости.

Видно, что жидкость на периферии отделяется от заготовки (например, рис. 5, б, стрелкой указан контур заготовки). Жидкость оказывает локальное центральное действие на заготовку, причем зона действия увеличивается со временем; ее размер определяется относительным движением струи и заготовки. В этой части деформации заготовки имеют характер двухосного растяжения. В той части, где заготовка не контактирует с жидкостью, возникают сжимающие окружные напряжения, что приводит к потере устойчивости и образованию гофров.

Со временем траектории, а, следовательно, и скорость движения частиц жидкости, приобретают радиально-касательное к оболочке направление, длина траекторий достигает 40 мм. Течение жидкости переходит от наиболее эффективного нормального к менее эффективному касательному движению, при котором количество движения уже не переходит в импульс нормальной силы, деформирующей заготовку.

В конце периода струя полностью покидает РП и скрывается в объеме, освобожденном деформирующейся заготовкой, жидкость с периферии вовлекается в воронку, образованную струей (показано стрелками на рис. 4, г), перемещения точек струи достигают 90 мм. Основная масса жидкости малоподвижна. В результате возникает мощный торообразный вихрь, охватывающий всю массу жидкости. Этот вихрь совершенно непродуктивен для деформирования заготовки, его кинетическая энергия и количество движения рассеиваются по вязкому типу, а также за счет трения жидкости с твердыми элементами модели.

Максимальные перемещения заготовки (рис. 5, г) достигают 40 мм, максимальные пластические деформации в вершине купола – 9,5 %. Характер формоизменения заготовки полностью соответствует особенностям кинетики, наблюдаемым в экспериментах [1], что говорит об адекватности модели.

При импульсном действии поршня в РП первоначально различима граница зоны возмущения, которая перемещается вниз со скоростью 1460 м/с. Выше границы возмущения SPH частицы образуют течение со скоростью 20–50 м/с. На рис. 6 показаны этапы формирования струи на выходе из РП в четыре последовательные моменты времени. На рис. 6, а показаны светло серыми точками SPH частицы. Черными линиями показаны траектории частиц жидкости, первоначально находившихся в сечении, разделяющем разрядную полость и камеру. Уже в самые ранние моменты по выходе жидкости из разрядной камеры наблюдается сильное боковое движение, что приводит к расширению струи в сравнении с сечением РП. Огибающая траекторий отмечает фронт струи, имеющий форму криволинейной поверхности. Позже боковое движение затихает (рис. 6, б–в) и струя принимает почти цилиндрическую форму. В конце процесса струя встречается и взаимодействует с «погранслоем» из SPH частиц на поверхности заготовки, в результате чего частицы струи вновь получают боковое движение. Длины траекторий достигают 70 мм. В общем, пучок траекторий принимает колоколообразную форму. Жидкость, расположенная вне струи, имеет значительно меньшие скорости, что говорит о сильных градиентах скорости и вихрях на границе струи.



Рис. 6. Образование струи

В экспериментах с помощью теневой скоростной фоторегистрации зафиксированы подобные фронты струи на выходе ее из РП [1], что говорит об адекватности модели.

Деформация заготовки начинается с приходом волны давления. На рис. 5, а видно, что образующая траекторий SPH частиц внизу, отражающая положение заготовки, уже имеет криволинейную форму, хотя струя только вышла из РП. Наибольшие значения перемещений и деформаций наблюдаются в конце периода времени действия струи (рис. 5, г).

ВЫВОДЫ

Предложенная модель адекватна, в ее решениях воспроизводятся известные и наблюдаемые в эксперименте свойства и особенности поведения элементов в составе гетерогенной технологической системы как в динамике при импульсном возбуждении, так и в квазистатическом и статическом режимах. При анализе решений не обнаружены особенности, противоречащие наблюдаемым при ЭГШ явлениям. В частности, наблюдаются в правильной последовательности волновой и струйный этапы нагружения заготовки; локальный характер нагружения и деформирования заготовки; пошаговое накопление пластических деформаций и напряжений в заготовке; большие перемещения и конечные деформации; большие скорости заготовки и жидкости; волновой, струйный и вихревой характер движения жидкости; образование и последующее схлопывание кавитационных разрывов в жидкости; отрыв жидкости от твердых поверхностей; постоянство давления при медленном изменении или постоянстве внешней силы; правильное соотношение объемных деформаций и давления и др.

Адекватность модели обеспечена выбором различных наиболее подходящих методов дискретизации для существенно различных по механическим свойствам материалов элементов системы. Подобный подход целесообразен для моделирования систем, для которых характерны большие перемещения, конечные деформации, образование новых поверхностей или, наоборот, связывания поверхностей и образования сплошной среды.

Предложенная МММ имеет многопараметрический характер. Часть параметров имеет механическую природу, например, механические характеристики, другие – математическую, например, параметры дискретизации. Выбор определенного множества значений параметров модели определяет точность результатов моделирования, например, при анализе квазистатического процесса получена точность определения силы давления не хуже 0,6 %, объемной деформации – 1,2 %. Очевидно, существует возможность повышения точности результатов модели в конкретных применениях за счет выбора значений параметров.

Модель дееспособна в широком диапазоне изменения параметров, позволяет моделировать как существенно динамические, так и квазистатические процессы, что позволяет анализировать процессы ЭГШ непрерывно от начала до остановки. Целесообразно моделировать предварительное обжатие с последующим импульсным действием. Более того, возможно многократно-повторное импульсное действие с промежуточным успокоением и обжатием жидкости для моделирования многократной штамповки.

Анализ результатов оправдывает сложность модели. Анализ кинетики системы показывает сложный характер взаимодействия и взаимообуславливания движения элементов системы. Моделирование деформирования заготовки отдельно от жидкости потребовало бы воссоздания этого сложного действия в виде переменных во времени и пространстве граничных условий, определить которые можно, только исследуя систему в целом. Гетерогенная модель открывает возможность обоснования способов управления движением жидкости для повышения эффективности деформирования заготовки.

Использование SPH для дискретизации жидкости обуславливает особенности и ограничения применения модели. Первая особенность SPH систем – проникновение частиц сквозь стенки контейнера. Это свойство проявляется при повышенных давлениях и скорости движения жидкости. Вторая особенность проявляется как вычислительная неустойчивость решения, в результате которой растут скорости отдельных SPH частиц и кинетическая энергия SPH системы в целом, а также создаются условия для проявления первой особенности – утечки частиц. Каждая из особенностей выражается в потере точности решения. Возникают задачи исследования предельных возможностей такой схемы дискретизации и разработки систематических приемов борьбы с их проявлением. Уместно использование поверхностного, а также объемного вязкого трения для рассеяния кинетической энергии наиболее быстрых частиц.

Эти особенности имеют механическую подоплеку. SPH систему можно рассматривать как статистический ансамбль взаимодействующих материальных частиц, для которого применимы закономерности статистической механики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тараненко М. Е. Локальное последовательное деформирование при штамповке крупногабаритных деталей / М. Е. Тараненко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. – № 9. – С. 14–16.
2. Роуландс Р. Остаточные напряжения // Экспериментальная механика. Книга 2. / Р. Роуландс; под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – С. 285–335.
3. Мамутов В. С. Теория обработки металлов давлением. Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки / В. С. Мамутов А. В. Мамутов. – СПб.: Изд-во политехнич. ун-та, 2006. – 188 с.
4. Нарыжный А. Г. Моделирование процесса гидроимпульсной штамповки / А. Г. Нарыжный // Динаміка, надійність і довговічність механічних і біомеханічних систем та елементів їхніх конструкцій: матеріали міжнародної науково-технічної конференції 8-11 вересня 2009 р. – Севастополь, 2009. – С. 35–38.
5. Belytschko T. Meshfree and Particle Methods / T. Belytschko, J. S. Chen. – John Wiley and Sons Ltd, 2007. – 384 p.
6. LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 971. – Livermore: LSTC, 2006. – 2130 p.
7. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

Нарыжный А. Г. – канд. техн. наук, доц. НАКУ «ХАИ»;

Тараненко М. Е. – д-р техн. наук, проф. НАКУ «ХАИ».

НАКУ «ХАИ» – Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков.

E-mail: narizniyag@ukr.net