

С.С. Добротворский, С.С.Гнучих, Л.Г. Добровольская

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ДВУХСЛОЙНЫХ ТИТАНОВОАЛЮМИНИЕВЫХ ПАКЕТОВ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ СТАЛЬНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ САЕ СИСТЕМ

Для повышения прочности и ударной стойкости, при одновременном снижении материалоемкости машин, в современном машиностроении необходимо увеличение числа тонкостенных деталей, имеющих многослойную (сендвич) структуру. Многослойные структуры, как правило, позволяют получить изделия с характеристиками, превосходящими свойства отдельных входящих в них материалов. Однако обработка таких многослойных структур представляет определенные трудности, так как в структуру могут входить материалы с совершенно различной степенью обрабатываемости, в частности, титан и алюмомагниевого сплава. На наш взгляд, преодолеть эти противоречия можно путем использования высокоскоростных методов обработки. Однако исследования по этим вопросам крайне ограничены. В данной работе предлагается решать эту проблему путем моделирования процессов высокоскоростного деформирования сендвич-пакетов с использованием метода конечных элементов.

**Ключевые слова:** высокоскоростная обработка, титан, алюминий, САЕ системы.

**Введение.** Для повышения прочности и ударной стойкости, при одновременном снижении материалоемкости машин, в современном машиностроении необходимо увеличение числа тонкостенных деталей, имеющих многослойную (сендвич) структуру. Многослойные структуры, как правило, позволяют получить изделия с характеристиками, превосходящими свойства отдельных входящих в них материалов. Однако обработка таких многослойных структур представляет определенные трудности, так как в структуру могут входить материалы с совершенно различной степенью обрабатываемости, в частности, титан и алюмомагниевого сплава. Оптимальные технологические режимы механической обработки этих материалов отличаются на 1-2 порядка. На наш взгляд, преодолеть эти противоречия можно путем использования высокоскоростных методов обработки, которые в определенной мере уравнивают шансы на хорошую обрабатываемость различных материалов сендвич-пакетов и сендвич-структур.

**Анализ последних исследований и литературы.** Из обзора работ зарубежных и отечественных авторов установлено [1], что мировые тенденции поиска повышения производительности и качества механообработки состоят в резком повышении скоростей обработки. В традиционных областях механообработки, таких как фрезерование, точение скорости обработки с обычных поднялись до высокоскоростных. Нормой становится наличие на фрезерных обрабатывающих центрах шпинделей, имеющих 40 000 об/мин и более. Классические модели процессов резания при таких условиях не совсем адекватно описывают происходящие процессы.

Процесс резания необходимо рассматривать с учетом позиций высокоскоростного ударного взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом. Аналогичная проблема возникает в случае необходимости получения из листового сендвич-пакета изделия сложной формы путем многократного ударного контактного воздействия твердосплавного или деформирующегося инструмента.

**Целью** данной статьи является исследование степени деформации двухслойного металлического пакета из титана и алюминия при ударном воздействии деформирующегося инструмента методом имитационного моделирования с использованием САЕ систем.

**Постановка проблемы.** В настоящей работе мы рассматриваем двухслойный пакет, состоящий из плоских пластин титана и алюминия переменной толщины. Он подвергается высокоскоростному воздействию стального пробойника. Нам необходимо определить допустимую степень величины деформации пакета, при которых отсутствует его катастрофическое разрушение. Максимальное давление, возникающее при соударении метаемой среды с твердой поверхностью, можно оценить по формуле [2]:

$$p = \rho_0 C_0 v \left( 1 + k \frac{v}{C_0} \right),$$

где  $\rho_0$ ,  $C_0$  – плотность метаемой среды и скорость звука в ней;  $v$  – скорость частиц метаемой среды;  $k$  – постоянная, характеризующая увеличение скорости волны при ударном сжатии.

При определении давления при соударении потока частиц со стальной преградой используется линейное уравнение ударной адиабаты[3]:

$$D = a + bu,$$

где  $D$  – скорость ударной волны,  $u$  – массовая скорость,  $a$  и  $b$  – значения коэффициентов ударной адиабаты веществ.

Уравнение сохранения импульса:

$$P = p_0 D u.$$

Подставляя уравнение ударной адиабаты в уравнение сохранения импульса, получаем:

$$P = p(a + bu) \cdot u.$$

Распишем уравнение сохранения импульса для стальной преграды и ударника:

$$P_{Fe} = p_{Fe}(a + bu) \cdot u;$$

$$P_{yd} = p_{yd}(a + b(u - w)) \cdot (u - w),$$

где  $u$  – массовая скорость частиц ударника,  $w$  – массовая скорость в стальной преграде.

Использование этих зависимостей дает предостережение о физических процессах происходящих при ударном взаимодействии. Однако они не позволяют выполнить точные расчеты. В связи с этим возникает необходимость привлечения более точных методик расчета основанных на методе конечных элементов.

**Материалы исследований.** Для решения задачи определения степени деформации сэндвич-пакета при высокоскоростном воздействии на него инструмента, решено использовать компьютерное проектирование и моделирование образов исследуемых технологических объектов на базе вычислительных логических алгоритмов с применением метода конечных элементов с среде CAE-модуля ANSYS.

В пакете ANSYS Движение сплошной среды может быть описано используя: закон сохранения массы, закон сохранения импульса, закон сохранения энергии, модели материала, начальных условий, граничных условий.

Математическая модель движения сплошной среды, описанная с использованием перечисленных выше уравнений, численно решается в ANSYS, используя явное интегрирование по времени и различные методики решения.

Для Лагранжевых формулировок в настоящее время в системе ANSYS плотность в любой момент может быть определена из текущего объема зоны и ее первоначальной массы

$$\frac{p_0 V_0}{V} = \frac{m}{V}.$$

Частные дифференциальные уравнения, которые выражают закон сохранения импульса связывают ускорение и тензор напряжений  $\sigma_{ij}$ .

$$p\ddot{x} = b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z};$$

$$p\ddot{y} = b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z};$$

$$p\ddot{z} = b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}.$$

Сохранение энергии выражается через:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} +$$

$$+ 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx})$$

Эти уравнения решаются в явном виде для каждого элемента в модели, основанной на входных значениях в конце предыдущего шага по времени. Малое время приращения используются для обеспечения стабильности и точности решения.

В корректном моделировании, масса, импульс и энергия должны быть сохранены.

При интегрировании применяются метод центральных разностей. Ускорения оцениваются для  $t$ :

$$\{a_t\} = [M]^{-1} ([F_t^{ext}] - [F_t^{int}]),$$

где  $\{a_t\}$  – вектор ускорения  $[M]$  – матрица масс,  $\{F_t^{ext}\}$  вектор приложенных внешних сил,  $\{F_t^{int}\}$  вектор внутренних сил:

$$F_t^{int} = \sum \left( \int_{\Omega} B^T \sigma_n d\Omega + F^{hg} \right) + F^{contact},$$

где  $F^{hg}$  – сила hourglass-сопротивления,  $F^{contact}$  – сила контакта.

Затем вычисляются скорости и перемещения:

$$\{v_{t+\Delta t/2}\} = \{v_{t-\Delta t/2}\} + \{a_t\} \Delta t;$$

$$\{u_{t+\Delta t}\} = \{u_t\} + \{v_{t+\Delta t/2}\} \Delta t;$$

$$\Delta t_{t+\Delta t/2} = 0.5(\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t});$$

$$\text{и } \Delta t_{t-\Delta t/2} = 0.5(\Delta t_t - \Delta t_{t+\Delta t}).$$

Геометрия обновляется добавлением приращений перемещений к исходной геометрии  $\{x_0\}$ :

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_0\} + \{u_{t+\Delta t}\}.$$

Для упрощения обращения матриц требуется диагональная матрица масс. Уравнения становятся несвязанными и могут решаться напрямую (явно)

Не требуется обращения матрицы жесткости. Все нелинейности (включая контакт) учитываются в векторе внутренних сил. Основное время занимает вычисление вектора внутренних сил. Для устойчивости решения требуются очень малые шаги. Переменные интегрируются по времени, основываясь на значениях, полученных на предыдущем временном шаге. Явная схема решения проста в реализации.

**Результаты исследования.** Поиск области существования оптимальных деформации сэндвич-пакета осуществляли с помощью многочисленных экспериментов с изменением толщины пластин (мм), сравнивая их с поведением одинарных плас-

тин. В статье проведено сравнительное исследование величины деформации листовых материалов титана и алюминия. На рисунке 1 представлены результаты моделирования деформации листового титана при разных толщинах пластины.

степени подвержен деформации по сравнению с титаном. На рисунке 3 представлен сэндвич-пакет алюминий– титан 1-6 мм и 1-9 мм. На рисунке 4 представлен сэндвич-пакет алюминий– титан 2-6 мм и 2-9 мм.

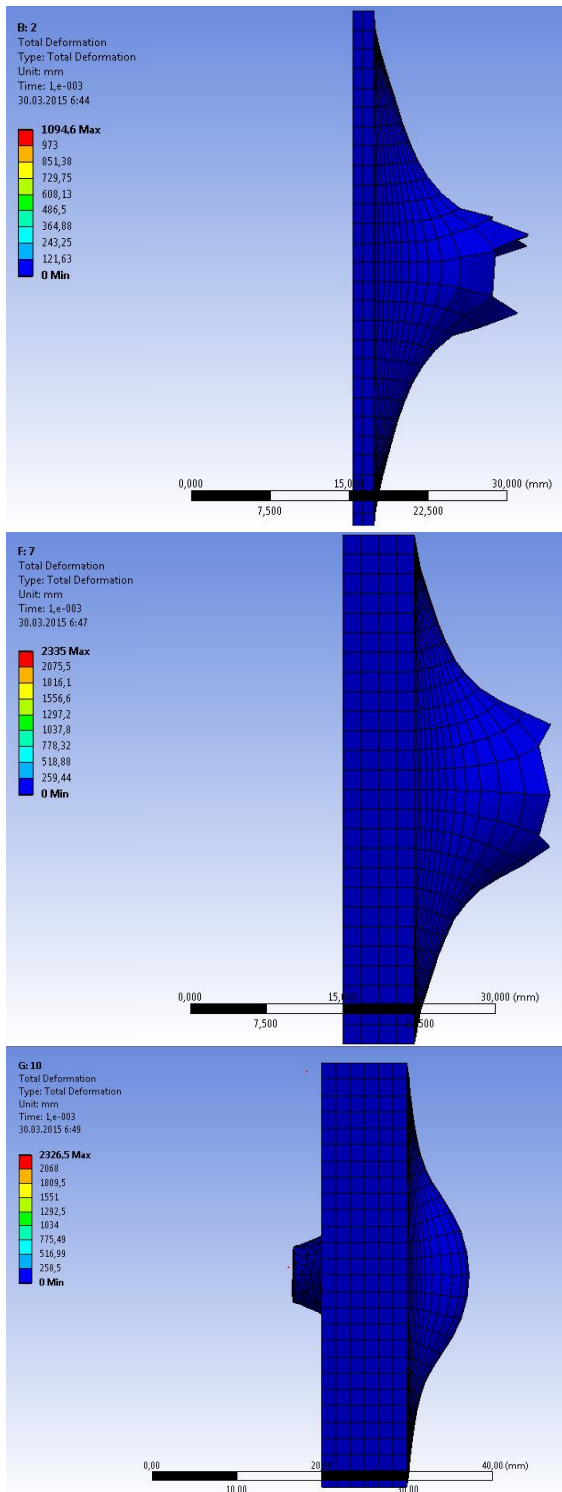


Рис. – 1 Деформация Алюминия при толщине 2 мм, 7 мм, 10 мм.

На рис. 2 представлены результаты моделирования деформации листового алюминия. Результаты моделирования показывают что алюминий в большой

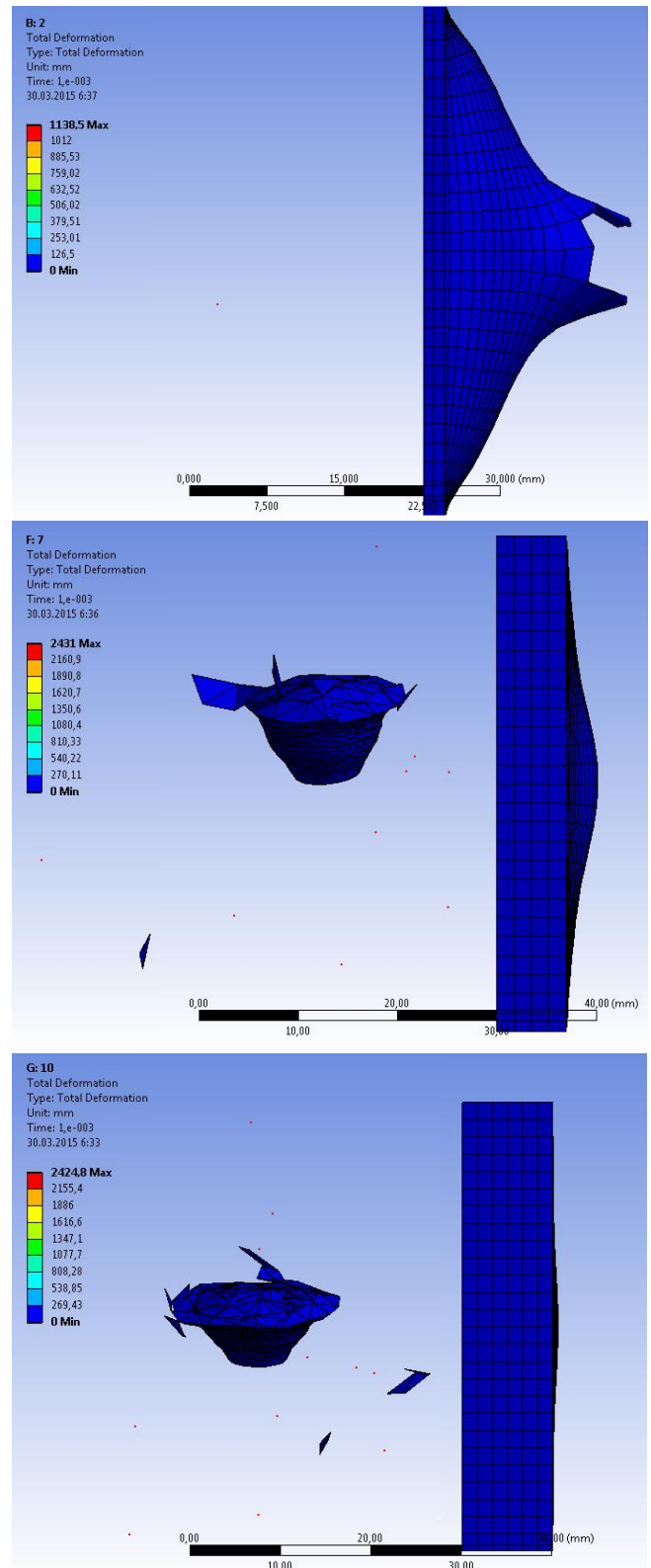


Рис. – 2 Деформация Титана при толщине 2 мм, 7 мм, 10 мм.

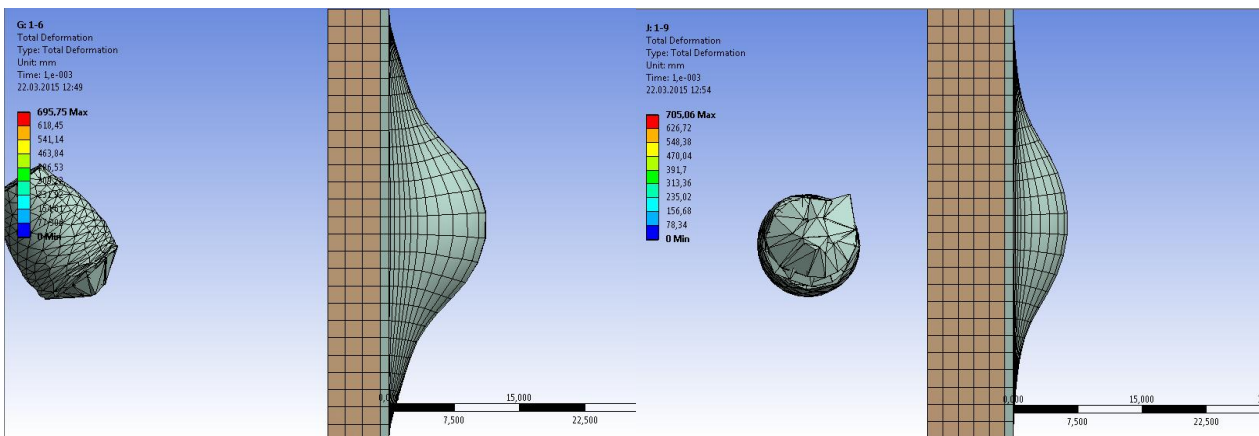


Рис. – 3 Деформация сендвич-пакетов при толщине 1-6 мм,1-9мм.

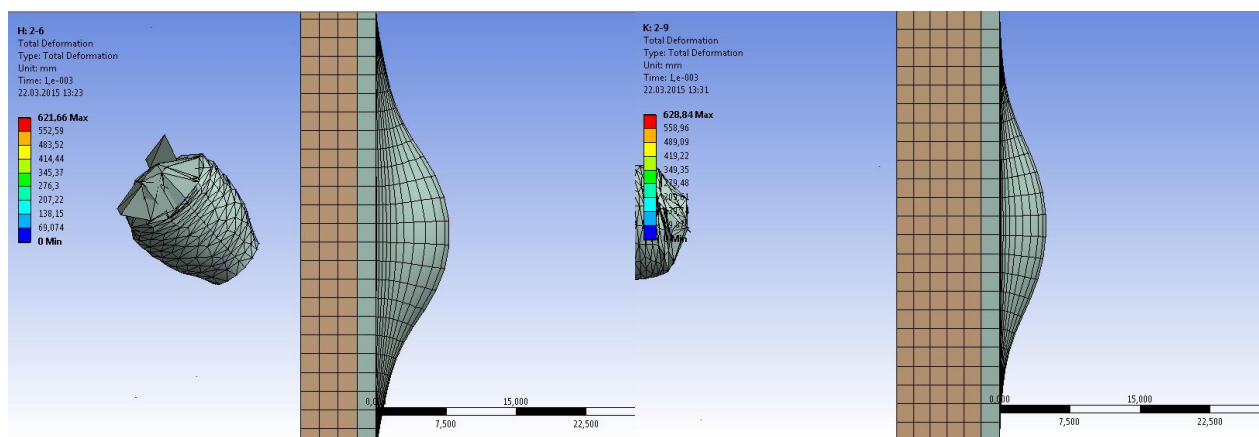


Рис. – 4 Деформация сендвич-пакетов при толщине 2-6 мм,2-9мм.

**Выводы.** Результаты моделирования позволяют сделать заключение что ударная прочность изделий из чистого листового материала меньше чем сендвич-пакетов титан-алюминий.

Таким образом исследование сендвич-пакетов из различных по свойствам материалов является перспективным научным направлением, а также имеет практическую ценность, так как позволяет получить изделия с характеристиками, превышающими характеристики исходных материалов при меньшем весе и размере.

**Список литературы:** 1. Добротворский С.С. Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях // С.С. Добротворский, Е.В. Басова, Л.Г. Добровольская, А.К. Мялица // Сборник научных трудов "Вестник НТУ «ХПИ» : Технологии в машиностроении. Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – Вып.5542. – С. 25-31. 2 Драгобецкий В.В. Совершенствование свойств инструментальных материалов методами взрывной обработки / Драгобецкий В.В Пирогов В.В. Наумова Е.А.// Вісник

СевНТУ. Вип. 107: Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. 3. Петров Е.В. Воздействие на стали потока тугоплавких частиц, Разогнанных энергией взрыва: автореферат ... кандидата технических наук: 02.02.11 / Петров Евгений Владимирович.– Черноголовка, 2011.– 21 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Dobrotvorskiy S.S., Basova E.V., Dobrovol'skaja L.G., Mjalica A.K. *Povyshenie konkurentosposobnosti otechestvennogo mashinostroitel'nogo proizvo-dstva v sovremennyh usloviyah.* Kharkov: NTU «KhPI», 2014. pp. 25-31. Print.2. Dragobetskiy V.V. *Sovershenstvovaniye svoystv instrumental'nykh materialov metodami vzryvnoy obrabotki* Dragobetskiy V.V Pirogov V.V. Naumova Ye.A. *Visnik SevNTU. Vip. 107: Mashinopriladobuduvannya ta transport: zb. nauk. pr. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2010. Print 3. Petrov E.V. Vozdeystviye na stali potoka tugoplavkikh chastits, Razognannykh energiyey vzryva: avtoreferat ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 02.02.11 Petrov Yevgeniy Vladimirovich.– Chernogolovka, 2011.– 21 p. Print*

Поступила (received)29.03.2015

Добротворский Сергей Семенович – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: sdbro@mail.ru;

Гнучих Сергей Сергеевич – магистр НТУ «ХПИ» тел.: (057)-720-66-25 e-mail: gny4ix@mail.ru;

Добровольская Людмила Георгиевна –канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ» тел.: (057)-720-66-25.