

УДК 621.7.044

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ЛОКАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ

О. В. ТроцкоКременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Приводится методика определения деформируемости слоистых материалов в процессах штамповки. Установлены основные виды потерь устойчивости ограничивающие штампуемость. Даны рекомендации для устранения возникающих потерь устойчивости. Для оценки деформируемости слоистых материалов проведена адаптация метода определения штампуемости по коэффициенту локального использования. Определены условия потери устойчивости, зависимости критической интенсивности деформации и предельных главных деформаций, критерий А.Д. Томленова для оценки локального деформированного состояния. Проведены экспериментальные исследования штампуемости слоистых материалов. Установлено, что данный метод определения деформируемости позволяет произвести штампуемости слоистых материалов, а при наличии данных о разрушении заготовок указывает пути устранения брака.

Ключевые слова: слоистый материал, штампуемость, интенсивность деформаций, отслоение.

ОЦІНКА ДЕФОРМОВАНОСТІ ШАРУВАТИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА КОЕФІЦІЄНТОМ ЛОКАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ

О. В. ТроцкоКременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Приведена методика визначення деформованості шаруватих матеріалів у процесах штампування. Встановлено основні види втрат стійкості, що обмежують штампованість. Дано рекомендації для усунення виникаючих втрат стійкості. Для оцінки деформованості шаруватих матеріалів зроблена адаптація методу визначення штампованості за коефіцієнтом локального використання. Визначені умова втрати стійкості, залежності критичної інтенсивності деформації й граничних головних деформацій, критерій А.Д. Томленова для оцінки локального деформованого стану. Проведено експериментальні дослідження штампованості шаруватих матеріалів. Установлено, що даний метод визначення деформованості дозволяє зробити оцінку штампованості шаруватих матеріалів, а при наявності даних про руйнування заготовок вказує шляхи усунення браку.

Ключові слова: шаруватий матеріал, штампованість, інтенсивність деформацій, відшарування.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. При решении вопросов деформируемости материалов, в том числе и многослойных, возникает необходимость в оценке явлений, ограничивающих штампуемость. К этим явлениям относятся потеря несущей способности, сплошности, расслоение и потеря устойчивости. Основные виды потери устойчивости монолитных металлов присущи также слоистым материалам. Для слоистых материалов основными видами потерь устойчивости являются [1]:

- а) появление полос скольжения на начальных стадиях деформирования;
- б) складкообразование (появление гофров);
- в) значительные сосредоточенные деформации.

В первом случае происходит потеря устойчивости при пластическом растяжении с образованием локального интенсивного утонения, сосредоточенного симметрично относительно главных осей напряжений. Разрыв листа зависит от напряженного состояния, скорости деформаций, дефектов металла (структурного и геометрического характера). Если заготовка слоистая, то возникновение сосредоточенных утонений в одном и том же месте маловероятно, особенно из-за дефектов металла. Кроме того, сосредоточенное утонение экранируется рядом расположенным слоем. Многочисленные эксперименты по штамповке слоистых заготовок в условиях двухосного растяжения (процесс раздачи, формовка) показали, что практически никогда не наблюдается

потери устойчивости. Эксперименты проводились в штамп-приборе [2] при взрывной вытяжке с жестким заземлением фланца. Формоизменение пакета заготовок с нулевой прочностью сцепления слоев, а также использование присоединенных масс практически исключает потерю устойчивости подобного типа.

Во втором случае сжато-растянутые участки листовой слоистой или монолитной заготовки склонны к потере устойчивости при пластическом формообразовании вследствие пластического выпучивания с образованием волнистости (гофров). При одинаковой толщине слоистой и монолитной заготовок склонность к потере устойчивости практически одинакова. При варьировании свойствами материалов слоев можно изменить характер гофрообразования или исключить его полностью. Например, помещение пластичного слоя между жесткими или способными к значительному упрочнению слоями повышает устойчивость к выпучиванию. Так, осуществление вытяжки медных заготовок, помещенных между слоями и лагуни Л62 и заготовок из стали 08КП со слоями из нержавеющей стали Х18Н10Т, предотвращало образование гофров до степеней вытяжки 1,58 и 1,61 соответственно. При штамповке монолитных заготовок, имеющих толщину пакета, потеря устойчивости происходила при степени вытяжки соответственно 1,28 и 1,32. Толщина слоев была одинакова. Одной из причин по-

вышения устойчивости является выдавливание более пластичного слоя менее пластичными, и чем выше упрочняемость материала обкладок, тем этот эффект ощутимее, т.е. выдавливание пластичного слоя вплоть до начала совместной пластической деформации слоев приводит к возникновению дополнительных растягивающих напряжений, препятствующих гофрообразованию. Аналогичная ситуация наблюдается при выпучивании листового металла при правке растяжением. Происходит потеря устойчивости с образованием волнистости. Одной из основных причин выпучивания полосы является ее поперечное сужение, связанное с наличием увеличивающихся сжимающих напряжений. Мероприятия, направленные на уменьшение продольных деформаций, уменьшают волнистость, в том числе и использование более жестких слоев.

Последний вид потери устойчивости связан с формоизменением пологих панелей, изготовленных вытяжкой. При некотором критическом давлении панель скачкообразно переходит в новое устойчивое равновесное состояние с образованием хлопка, связанного с изменением знака кривизны и выворачиванием участка панели. Особенно это явление характерно для процессов гидровзрывной штамповки. Волна разгрузки усугубляет процесс выворачивания панели. Поэтому в этих процессах существуют дополнительные ограничения на штампуемость, т.е. вытяжка слоистых панелей, сопряжена с дополнительными ограничениями. Так, при встрече падающей и отраженной волны напряжений в зависимости от их знака, определяемой акустической жесткостью слоев, устойчивость к выворачиванию либо возрастает, либо падает. Обозначим акустическую жесткость металла нижнего слоя r_{0c_0} , а предыдущего – r_{nc_n} . Возможны три случая взаимодействия волны сжатия с поверхностью раздела слоев и свободной поверхности. При отражении падающих ударных волн сжатия от свободной поверхности сжимающие деформации меняют свой знак, и в случае интерференции отраженных волн резко поднимается уровень растягивающих напряжений, при этом резко возрастает и происходит расслоение или разрушение.

В случае, когда $r_{nc_n} = r_{0c_0}$, волна сжатия преодолевает границу соединения слоев и переходит в последующий слой. При встрече отраженных от свободной поверхности волн на границе раздела возрастает вероятность расслоения. При $r_{nc_n} > r_{0c_0}$ волна сжатия частично переходит в последний слой и частично отражается от поверхности соединения слоев в виде волны растяжения. Отраженная волна сохраняет свой знак при $\rho_n c_n < \rho_0 c_0$, т.е. падающая и отраженная волна являются волнами сжатия. При встречном взаимодействии волн сжатия не наблюдается изменения конфигурации ударных фронтов, при этом увеличение давления более чем вдвое [3]. При интерференции волн сжатия не наблюдается значительного изменения скорости распространения ударных волн.

Таким образом, штампуемость слоистых композиций в условиях волнового нагружения зависит от сочетания слоев и их акустических свойств. Огра-

ничения на штампуемость связаны с возможностью расслоений и откольных разрушений.

Целью работы является адаптация метода определения штампуемости по коэффициенту локального использования пластичности для слоистых материалов.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. При штамповке монолитных заготовок штампуемость оценивают, в основном, по коэффициенту локального использования пластичности, по критерию ресурса пластичности и по диаграммам предельных деформаций. Произведем адаптацию метода определения штампуемости по коэффициенту локального использования пластичности для слоистых композиций. В методе оценки штампуемости по коэффициенту локального использования пластичности возможно возникновение неустойчивых состояний, которые приводят к появлению областей локализации и образованию местных недопустимых деформаций, после достижения которых происходит разрыв металла. Метод расчета критических (недопустимых) деформаций для пропорционального нагружения изотропного жесткопластического упрочняющегося тела рассмотрен для монослоя в работах [1, 4, 5].

Для слоистого тела показатель схемы напряженного состояния, принимаем:

$$m = \frac{\sum_{n=1}^k s_2^{(k)} \cdot \bar{h}^{(k)}}{\sum_{n=1}^k s_1^{(k)} \cdot \bar{h}^{(k)}}, \quad (1)$$

где \bar{h}^k – относительная толщина k-го слоя;
 $s_2^{(k)}, s_1^{(k)}$ – главные нормальные напряжения k-го слоя.

Считаем, что для слоистых материалов также справедливы соотношения:

$$\frac{e_1^m}{2-m} = \frac{e_2^m}{2m-1} = -\frac{e_3^m}{1+m} = \frac{e_i^m}{2\sqrt{1-m+m^2}}, \quad (2)$$

где e_1^m, e_2^m, e_3^m – главные логарифмические средние деформации пакета; e_i – интенсивность логарифмических деформаций.

Считаем, что деформации слоев равны между собой и совпадают со средними деформациями пакета.

Местное нарушение сплошности при плоском напряженном состоянии в случае локальной деформации определяется из условия равенства нулю приращения внешней деформирующей нагрузки в направлении алгебраически большего напряжения. При распределенной деформации – определяется из условия равенства нулю приращения деформирующих нагрузок в направлении главных деформаций e_1^m и e_2^m . При плоском напряженном состоянии, когда $S_1 > 0$ и $S_2 > 0$, местная потеря устойчивости

характеризується тем, що приращення нагрузки dP в напрямленні главной деформации удлинения равно нулю, т.е.

$$dP = d\left(\sum_{n=1}^k s_i^{(k)} \bar{h}^{(k)} \cdot F\right) = 0, \quad (3)$$

где F – площадь поперечного сечения пакета.

В этом случае условие потери устойчивости имеет вид:

$$\frac{d\left(\sum_{n=1}^k s_i^{(k)} \cdot h^{(k)}\right)}{de_i^m} = \sum_{n=1}^k s_i^{(k)} \cdot h^{(k)} \cdot \frac{2-m}{2\sqrt{1-m+m^2}} = \sum_{n=1}^k s_i^{(k)} \cdot h^{(k)}, \quad (4)$$

где $z_1 = \left(2\sqrt{1-m+m^2}\right)/(2-m)$ – подкаса- тельная кривой упрочнения пакета, соответствующая предельной интенсивности деформаций в точке начала образования шейки кривой упрочнения сло- истого тела.

Построение этой кривой осуществляется по пра- вилу рычага [6–8]. Отрезок «вертикалей деforma- ции» между кривыми упрочнения компонентов М (мягкий материал) и Т (твердый материал), для двухслойного композита разбит на части, обратно пропорциональные толщинам слоев Y_T и Y_M , т.е. $m'k'/k'n' = m''k''/k'n'' = Y_M/Y_T$. В случае большего числа слоев поступаем следующим обра- зом: строим кривую упрочнения двух слоев, напри- мер, m_1n_1 , и получаем кривую k_1 , после этого строим новую кривую k_2 , объединив кривые k_1 и k_2 и т.д. [6]. Критическая интенсивность деформаций и предель- ные главные деформации равны:

$$e_{кр}^\Sigma = z^\Sigma (n^\Sigma + k^\Sigma)$$

$$e_{1кр} = \frac{2m-1}{2-m} \cdot (n^\Sigma + k^\Sigma) \quad (5)$$

$$-e_{3кр} = \frac{1+m}{2-m} (n^\Sigma + k^\Sigma)$$

Предельные деформации при плоском разно- именном напряженном состоянии:

$$e_{1кр} = \frac{2-m}{1+m} n^\Sigma$$

$$e_{2кр} = \frac{2m-1}{1+m} n^\Sigma \quad (6)$$

$$-e_{3кр} = n^\Sigma + k^\Sigma$$

Критерий А.Д. Томленова [1] оценки локального деформированного состояния имеет вид:

$$h = e_i / e_{кр}, \quad (7)$$

где e_i – накопления интенсивность логарифми- ческих деформаций; $e_{кр}$ – критическая деформа- ция, носящая название коэффициента локального использования пластичности.

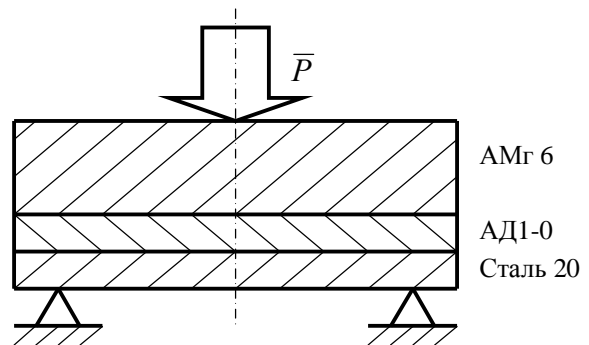
Считаем его пригодным и для оценки деформи- рованного состояния слоистых композиций.

По данному методу оценивали штампуемость слоистых материалов: сталь20+М2Р; ВТ1–0+АД1–0; Х18Н10Т+М2Р; сталь20+Л62.

Предварительно штамповали заготовки из ста- лей: 20; 08КП; Х18Н10Т и титана ВТ1–0. На заго- товки были нанесены сетки в виде окружностей. Расчет главных деформаций e_1 , e_2 и $-e_3 = e_1 + e_2$ проводили, пользуясь номограммой, приведенной в работе [1]. При использовании биметаллов, содержа- щих слой из высокопластичного материала (АД1–0, М2Р), повышали деформируемость материала и предотвращали образование трещин и локального снижения ресурса пластичности.

Образцы из биметалла нержавеющей сталь Х18Н10Т+медь М2Р испытывали на изгиб вовнутрь плакирующим слоем (медью) вплоть до разрушения (рис. 1).

Рисунок 1 – Схема испытаний на изгиб



Размеры образцов, в мм: 3+5×120×8, где первая цифра толщина стали Х18Н10Т, а вторая – толщина меди М2Р. Отслоений в биметалле не наблюдалось. До и после испытаний определяли изменение мик- ротвердости и оценивали напряженное состояние биметалла при изгибе. На образец наносили парал- лельные риски и наблюдали их искажение, связан- ное с действием касательных напряжений. Анало- гичные испытания проводились для композиции Сталь20+АД1-0+АМг6 размерами 4+4+20×15×120 плакирующим слоем вовнутрь до полного разруше- ния. В этом случае наблюдалось отслоение в меж- слойной зоне Сталь20+АД1–0. Площадь отслоений не превышала 50 % и находилась в пределах допус- ка (рис. 2).

ВЫВОДЫ. Данный метод позволяет произвести оценку штампуемости слоистых материалов. Кроме того, при наличии данных о разрушении заготовок указывает пути устранения брака. Это достигается изменением характеристик h , m .

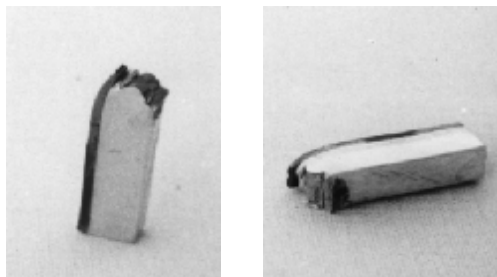
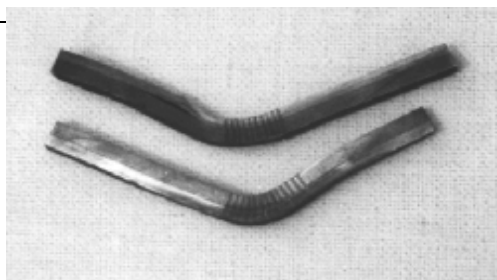


Рисунок 2 – Образці после испытаній на изгиб

Если эти характеристики находятся в пределах допустимых для материала подвергаемого деформации и не увеличивают до необходимого значения критическую интенсивность деформаций $\epsilon_{кр}$, тогда возникает потребность в создании на его основе слоистых материалов. В случае, когда это не дает нужного результата, тогда увеличивают степень слоистости до необходимой величины $\epsilon_{кр}$.

ЛИТЕРАТУРА

LAYERED MATERIALS DEFORMABILITY EVALUATION BY THE COEFFICIENT OF PLASTICITY LOCAL UTILIZATION

O. Trotsko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

The paper presents the deformability analysis technique of layered materials being stamped. The main instabilities limiting the formability of materials are determined. The guidelines for clearing of instability occurring are presented. Adaptation of the method of formability determination by the coefficient of local utilization is made for evaluation of layered materials deformability. The following parameters are determined: buckling conditions, performances of deformation critical intensity and ultimate main deformations, A. D. Tomlenov's criterion for evaluation of local strain state. The experimental research of layered materials formability is conducted. It is found that the offered method of deformability analysis allows for layered materials to be stamped and indicates the ways of defects elimination, if blanks destruction data are available.

Key words: layered material, formability, deformation intensity, exfoliation.

REFERENCES

1. Isachenkov E.I. *Contact friction and lubricant when processing metals by pressure*. – Moscow: Mechanical engineering, 1978. – 208 p. [in Russian]

2. Features of explosive stamping of welded cylindrical blanks made off deformation-resistant alloys / V.V. Dragobetsky, V.N. Voronin, V.A. Krivtsov // *Working of materials by pressure by pulse loadings*. – Kharkiv: KhAI, 1988. – PP. 19–22. [in Russian]

3. Experimental probe of a field of pressure of concentrated charges / V.P. Sabelkin, S.N. Solodyankin // *Pulse processing of metals by pressure*. – Moscow: Mechanical engineering, 1977. – PP. 96–102. [in Russian]

4. Averkiyev A.Yu. *Methods of an assessment it is stampability of sheet metal*. – Moscow: Mechanical engineering, 1985. – 176 p. [in Russian]

1. Исаченков Е.И. Контактное трение и смазка при обработке металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.

2. Особенности взрывной штамповки сварных цилиндрических заготовок из труднодеформируемых сплавов / В.В. Драгобецкий, В.Н. Воронин, В.А. Кривцов // *Обработка материалов давлением импульсными нагрузками*. – Харьков: ХАИ, 1988. – С. 19–22.

3. Экспериментальное исследование поля давления сосредоточенных зарядов / В.П. Сабелькин, С.Н. Солодянкин // *Импульсная обработка металлов давлением*. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 96–102.

4. Аверкиев А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.

5. Пластичность и разрушение / Под ред. В.Л. Колмогорова. – М.: Metallurgy, 1977. – 336 с.

6. Теория пластичности: Учебное пособие / Г.Э. Аркулис, В.Г. Дорогобид. – М.: Metallurgy, 1987. – 352 с.

7. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений / Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.

8. Кан Р. Физическое материаловедение. – М.: Мир, 1968. – 340 с.

5. Plasticity and destruction / Ed. of V.L. Kolmogorov. – M: Metallurgy, 1977. – 336 p.

6. *Plasticity theory: Tutorial*/ G. E. Arkulis, V.G. Dorogobid. – Moscow: Metallurgy, 1987. – 352 p. [in Russian]

7. *Materials technology: The textbook technical higher educational institutions* / B.N. Arzamasov, I.I. Sidorin, G.F. Kosolapov. – Moscow: Mechanical engineering, 1986. – 384 p. [in Russian]

8. Kan R. *Physical metallurgical science*. – Moscow: Mir, 1968. – 340 p. [in Russian]

Стаття надійшла 03.12.2012.

Рекомендована до друку
д.т.н., проф. Драгобецьким В.В.