

УДК 621.979.1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШТАМПУЕМОСТИ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ДИАГРАММАМ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

**О. В. Троцко**

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

Рассматривается возможность применения методики определения штампуемости слоистых материалов по диаграммам предельных деформаций. Приведена последовательность оценивания штампуемости и порядок построения диаграмм. Определен критерий деформируемости материалов без разрушения. Для построения диаграмм выполнены испытания образцов на растяжение. Получены теоретические и экспериментальные диаграммы предельных деформаций биметаллов. Произведены сравнения результатов и корректировка зависимостей для возможности определения штампуемости слоистых материалов по диаграммам. Показано, что введение фиктивных слоев дает более точную оценку надежности композиции. Установлено, что предложенная методика приемлема для определения штампуемости слоистых материалов по диаграммам предельных деформаций, что подтверждено полученными результатами при проведении экспериментов для этих материалов.

**Ключевые слова:** штампуемость, слоистый материал, диаграмма предельных деформаций.

## ВИЗНАЧЕННЯ ШТАМПОВАНІСТІ ШАРУВАТИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДІАГРАМАМИ ГРАНИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

**О. В. Троцко**

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

Розглядається можливість застосування методики визначення штампованості шаруватих матеріалів за діаграмами граничних деформацій. Наведено послідовність оцінювання штампованості й порядок побудови діаграм. Визначено критерій деформованості матеріалів без руйнування. Для побудови діаграм виконані випробування зразків на розтягання. Отримано теоретичні й експериментальні діаграми граничних деформацій биметаллів. Зроблено порівняння результатів і коректування залежностей для можливості визначення штампованості шаруватих матеріалів за діаграмами. Показано, що введення фіктивних шарів дає більш точну оцінку надійності композиції. Встановлено, що запропонована методика прийнятна для визначення штампованості шаруватих матеріалів за діаграмами граничних деформацій, що підтверджено отриманими результатами при проведенні експериментів для цих матеріалів.

**Ключові слова:** штампованість, шаруватий матеріал, діаграма граничних деформацій.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Оптимизация процессов листовой штамповки предусматривает обеспечение необходимых перемещений в пластически деформируемой заготовке, докритических деформаций и напряжений и получение изделия с заданным качеством, которое во многом определяется штампуемостью металла, его прочностными и пластическими характеристиками [1, 2].

С.П. Келер, а позже Г.М. Гудвин [1] предложили оценивать штампуемость не по моменту окончания равномерной деформации, а по окончанию сосредоточенной деформации листового металла, т.е. по разрушению. С.П. Келер заметил, что между изменениями деформаций, ортогональных друг к другу, в момент разрушения существует связь. По экспериментальным данным были построены графические зависимости  $e_1 = e_1(e_2)$ , названные диаграммами предельных деформаций (предельной штампуемости) при разрушении заготовки. Диаграммы Келера–Гудвина отражают границы предельных деформаций, т.е. геометрическое место точек таких сочетаний главных деформаций, действующих в плоскости заготовки, которые соответствуют моменту начала локализации очага пластической деформации или разрушения. Сначала диаграммы были построены в главных относительных деформациях. Позже начали строить в главных логарифмиче-

ских деформациях, зависящих от соотношения главных напряжений. С.П. Келером был сформулирован критерий в виде предельных деформаций на поверхности листа, возникающих в момент разрушения. Г.М. Гудвин расширил диаграмму Келера до области деформаций сжатие–растяжение  $e_1 = e_1(-e_2)$ , т.е. в области отрицательных значений, применив матрицы эллиптической формы с разными соотношениями главных осей, пуансоны имели полусферические торцы. В результате была получена диаграмма предельных деформаций, с помощью которой можно определить критический уровень деформаций.

Методика оценки штампуемости заключается в следующем [1]:

- 1) строят диаграмму предельных деформаций;
- 2) с помощью деформационных сеток, нанесенных на производственную деталь, определяют значения максимальных деформаций  $e_1$  и  $e_2$  в опасных местах;
- 3) наносят их на предельную кривую штампуемости, определяя запас пластичности, принимая ординату в той точке, где происходит измерение до нижней границы диаграммы, за 100 %;
- 4) назначают меры уменьшения  $e_1$  и  $e_2$  за счет регулирования прижима при вытяжке, увеличения

радиусов закруглений матрицы, улучшения трибологических факторов, изменения конфигурации заготовки и ориентировки ее в штампе с учетом анизотропии, замены металла более пластичным и др. Если запас пластичности достаточно велик и качество детали удовлетворительное, то можно заменить материал более дешевым или, если возможно, уменьшить толщину листа.

В последнее время возрастающее применение слоистых композиционных материалов требует проведения оценки штампуемости для расчета параметров формоизменения и обеспечения необходимых эксплуатационных характеристик получаемых изделий [3, 4].

Целью данной работы является определение штампуемости слоистых материалов по диаграммам предельных деформаций компонент композиций.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.**

Штампуемость по данному методу оценивается по окончанию сосредоточенной деформации, т.е. по разрушению. Установлено, что между изменениями деформаций, ортогональных друг к другу, в момент разрушения существует связь. Для оценки штампуемости по этому методу необходимо строить по экспериментальным данным графические зависимости  $e_1 = e_1(e_2)$ , названные диаграммами предельных деформаций (диаграммами предельной штампуемости или диаграммами Келера–Гудвина) и отражающие границы предельных деформаций.

Испытания производили для композиций нержавеющей сталь-медь, слоистая заготовка из набора пластин ВНС–17, сваренных взрывом.

Использовали полосы шириной от 20 до 60мм, которые растягивали на испытательной машине и получали область диаграммы в сжато–растянутой области. Полученные данные хорошо согласуются в пределах 10–15% с известными зависимостями [1]:

$$\begin{aligned} e_{кп}^{\Sigma} &= z^{\Sigma} (n^{\Sigma} + k^{\Sigma}) \\ e_{1кп} &= \frac{2m-1}{2-m} \cdot (n^{\Sigma} + k^{\Sigma}) \\ -e_{3кп} &= \frac{1+m}{2-m} (n^{\Sigma} + k^{\Sigma}) \end{aligned} \quad (1)$$

где  $m = \frac{\sum_{n=1}^k S_2^{(k)} \cdot \bar{h}^{(k)}}{\sum_{n=1}^k S_1^{(k)} \cdot \bar{h}^{(k)}}$  – показатель схемы на-

пряженного состояния;  $\bar{h}^{(k)}$  – относительная толщина k-го слоя;  $S_2^{(k)}, S_1^{(k)}$  – главные нормальные напряжения k-го слоя.

Поэтому комплекс испытаний для построения диаграммы при двухосном растяжении не имеет смысла, и вполне достаточно пользоваться зависимостями (1). Следовательно, построение диаграмм предельной деформации – наиболее удобный метод оценки штампуемости слоистых заготовок, и имеет смысл для используемых в промышленности биметаллов.

Пластичность оценивается величиной накопленной интенсивности деформаций (параметр А.А Ильюшина) к моменту разрушения [3]:

$$e_i = \int \&_i dt, \quad (2)$$

где  $\&_i$  – интенсивность скорости деформаций.

Зависимость пластичности от схемы напряженного состояния характеризуется параметром [3]:

$$\bar{h} = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{S_i}, \quad (3)$$

где  $S_1, S_2, S_3$  – главные напряжения;  $S_i$  – интенсивность напряжений.

Критерий деформируемости металлов без разрушения, базирующийся на нелинейной теории накопления повреждений [3], имеет вид:

$$y = \int \left( 1 + a \frac{dh}{d\bar{e}_i} \right) \frac{e_i(h)}{[\bar{e}_{np}(h)]^{1+a \frac{dh}{d\bar{e}_i}}} \cdot d\bar{e}_i \leq 1, \quad (4)$$

где  $a$  – константа.

При  $h = const$  критерий  $y$  обращается в критерий, предложенный В.Л.Колмогоровым [5, 6]. Используя критерий  $y$ , можно рассчитать ресурс пластичности  $\bar{y} = \frac{\bar{e}_i}{\bar{e}_{np}}$ , либо предельную деформацию

$\bar{e}_{np}$  в момент разрушения. Предельную деформацию, когда параметр  $h$  изменяется незначительно, можно определить из диаграмм пластичности компонент биметалла по показателю  $h$  вблизи опасной области деформируемой заготовки.

Для экспериментального построения диаграммы используем методику, основанную на растяжении образцов различной ширины и образцов с круговыми выточками. В экспериментах использовали образцы из стали 12Х18Н9Т, латуни Л76, а также биметалла сталь–латунь. Диаграмма для стали 12Х18Н9Т аппроксимируется зависимостью и практически соответствует данным, приведенным в работе [4]:

$$y_p = 1,517 - 0,159 \left( \frac{S}{T} \right) - 0,052 \left( \frac{S}{T} \right)^2, \quad (5)$$

Для латуни Л76:

$$y_p = 1,04 - 0,342 \left( \frac{S}{T} \right) - 1,02 \left( \frac{S}{T} \right)^2. \quad (6)$$

Диаграмма биметалла Л76+12Х18Н10Т (толщина слоев одинакова):

$$y_p = 1,34 - 0,24 \left( \frac{S}{T} \right) - 0,88 \left( \frac{S}{T} \right)^2. \quad (7)$$

Сопоставление этой диаграммы с приведенной диаграммой, построенной по ранее изложенной методике, дает существенные расхождения. Видимо, это связано с неравномерностью деформаций по толщине слоев и межслойным взаимодействием. Последнее можно учесть путем введения дополнительного идеально пластического слоя с пределом текучести, соответствующим предельной сдвиговой прочности менее прочного слоя (М) (рис. 1, 2).

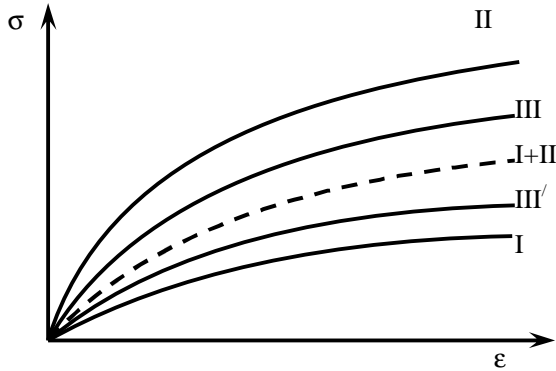


Рисунок 1 – Построение кривой упрочнения двухслойной композиции, полученной сваркой взрывом: I – первый компонент; II – второй компонент; I+II – околосшовная зона; III – биметалл

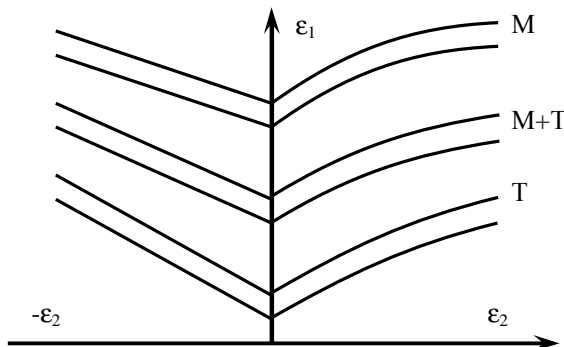


Рисунок 2 – Диаграмма предельных деформаций биметалла: М – мягкий; Т – твердый; М+Т – биметалл

Зависимости для учета предельных деформаций, содержащие компоненты напряжений, определяемые в рамках классической теории слоистых материалов, должны содержать дополнительные слагаемые

$$t_s = \sum_{n=1}^{k-1} t_s^{n,k-1}, \text{ где } t_s - \text{ предельная сдвиговая деформация, т.е. абстрагируемся от закона распределения касательных напряжений по толщине слоя (как это делается в модели Тимошенко), а сдвиговые деформации стягиваем в межслойную зону. Такая модель объясняет характер разрушения слоистых материалов при деформации.}$$

Оценить деформируемость слоистых композитов возможно в рамках вероятностного подхода предложенного В.Л. Колмогоровым [2].

Известно, что при построении диаграммы пластичности и при исследовании разрушения материала

лов в процессах обработки металлов давлением неизбежен разброс данных, связанный с содержанием случайно распределенных дефектов различного размера и происхождения. В слоистых материалах эти дефекты частично компенсируются и устраняются. Поэтому, видимо, этот метод требует в дальнейшем более детальной разработки.

При таком подходе степень деформации сдвига  $\Lambda$  определяется случайной величиной с законом распределения  $Q(\Lambda) = P[g < \Lambda]$ , где  $P$  – вероятность,  $g$  – случайная величина. Плотность вероятности разрушения  $q(\Lambda) = Q(\Lambda)$ .

Введем понятие функции надежности:

$$R(\Lambda) = 1 - Q(\Lambda) = P\{I \geq \Lambda\}. \quad (8)$$

Математическое ожидание пластичности совпадает с пластичностью металла  $\Lambda_p$ , и в рамках предлагаемой модели:

$$\Lambda_p = \sum_{n=1}^k I_p^n h^* + \sum_{n=1}^{k-1} \Lambda_p^{1h} \bar{\Delta}, \quad (9)$$

где  $\bar{\Delta}$  – относительная толщина межслойной зоны;

$$\bar{h}_1^* = \bar{h} - (0,5\bar{\Delta}_{i-1} + 0,5\bar{\Delta}_{i-1}) \quad (10)$$

По аналогии вводится и понятие дисперсии пластичности.

Функция надежности слоистой композиции при деформировании выше, чем при простом параллельном соединении систем. Поэтому, имея данные по вероятности разрушения каждого из слоев, простым наложением событий, нельзя судить о вероятности разрушения композиции. Следовательно, введение фиктивных слоев дает более точную оценку надежности такой системы.

Увеличение слоистости системы, состоящей из труднодеформируемых и пластичных элементов, способствует увеличению штампуемости системы в целом. Так, для штамповки вытяжки деталей типа днищ из алюминиевых спеченных порошков (САП), имеющих относительное удлинение  $\delta=5-8\%$ , достаточно применение двухстороннего плакирования технически чистым алюминием, и  $\delta$  возрастает до 15–25%.

Для штамповки-вытяжки деталей из титанового сплава ВТ15, ВТ16 ( $\delta=0,5-1,5\%$ ) в холодном состоянии необходимо использовать от семи до пятнадцати чередующихся с данным сплавом слоев из пластичного титанового сплава ВТ1–0.

Важнейшими показателями качества слоистых металлических композиций является прочность и сплошность соединения, наиболее достоверно оцениваемые механическими испытаниями. Наиболее распространенным видом испытаний на заданную пластическую деформацию являются испытания на изгиб. Пластическая деформация характеризуется углом изгиба до образования первой трещины в растянутой зоне, до параллельности сторон и до соприкосновения сторон. Испытания проводились на образцах из слоистой композиции (сталь20 + медь2Р + латунь60).

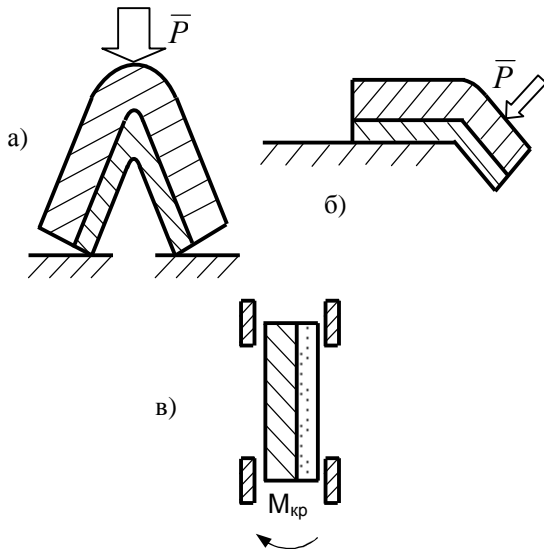
Было проведено сопоставление предельных углов сгиба до образования первой трещины монолитного материала (стали, меди и латуни) и слоистого композита (табл. 1). Для сопоставимости результатов испытаний трехслойного образца монолитные заготовки подвергались взрывному нагружению по схеме и параметрам, соответствующим процессу сварки взрывом. Образование сварного соединения предотвращали путем введения в межслойный сварочный зазор слоя промасленной бумаги.

Таблица 1 – Данные по изгибу слоистой заготовки и компонент

Материал	Уголгиба до образования первой трещины	До соприкосновения сторон
Триметалл	не образуется	трещин не образуется
Медь М2Р	нет	то же
Сталь 20	76°	образование трещин
Латунь Л60	нет	трещин не образуется

Испытания свидетельствуют о повышении штампуемости слоистого металла по сравнению с монолитным.

Находят применение испытания на изгиб с разгибом, при котором образцы загибают вокруг оправки диаметром, равным удвоенной толщине листа на угол 45, 60, 90 и 120°, а также испытания на разгиб до появления расслоения и испытания на пере-



гиб (рис. 3).

Рисунок 3 – Схемы для испытаний на способность выдерживать пластическую деформацию:

а – изгиб с разгибом; б – перегиб; в – скручивание. Последние служат для определения способности металла выдерживать заданную пластическую деформацию, характеризуемую числом перегибов.

**DETERMINATION OF LAYERED MATERIALS FORMABILITY BY THE CHARTS OF MAXIMUM DEFORMATIONS**

К испытаниям, определяющим способность металлов выдерживать заданную пластическую деформацию, относят и испытания на скручивание.

Испытанию подвергались образцы из композиций: титан ВТ1-0 + медь М2Р; титан ВТ1-0+ алюминий АД1-0; медь М2Р + алюминий АД1-0 и др.

Образцы из биметалла (нержавеющая сталь Х18Н10Т + медь М2Р) испытывали на изгиб внутрь плакирующим слоем (медью) вплоть до разрушения. Размер образцов 3+5×120×8. Отслоений в биметалле не наблюдалось. До и после испытаний определяли изменение микротвердости и оценивали напряженное состояние биметалла при изгибе. На образец наносили параллельные риски и наблюдали их искажение, связанное с действием касательных напряжений. Аналогичные испытания проводились для композиции Сталь 20 + АД1-0 + АМг6 размером 4+4+20×15×120 плакирующим слоем внутрь до полного разрушения. В этом случае наблюдалось отслоение в межслойной зоне. Площадь отслоений не превышала 50 % и находилась в пределах допуска (рис. 4).

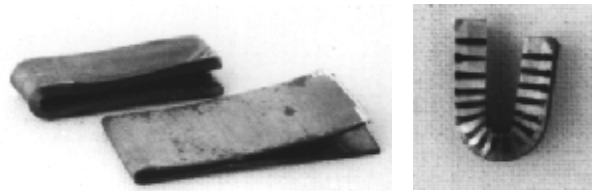


Рисунок 4 – Образцы после испытаний

**ВЫВОДЫ.** Предложенная методика приемлема для определения штампуемости слоистых материалов по диаграммам предельных деформаций и нашла подтверждение при проведении экспериментов для слоистых материалов.

Результаты испытаний свидетельствуют о высокой штампуемости полученных сваркой взрывом композиций и соответствуют требованиям, задаваемым нормативно-технической документацией, определяющей способность композитов выдерживать заданную пластическую деформацию.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Аверкиев А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
2. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
3. Факторы, определяющие надежность свариваемых взрывом композиционных соединений / В.С. Седых, Ю.П. Трыков // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Сборник научных трудов. – Волгоград: Изд-во Волг. ПИ, 1986. – С. 3–21.
4. Драгобецкий В.В. Обобщенные оценочные модели разрушения деформируемых материалов // Сборник научных трудов. Вып. 16. – Алчевск: ДГМИ, 2002. – С. 128–135.
5. Колмогоров В.Л. Обработка металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
6. Пластичность и разрушение / Под ред. В.Л. Колмогорова. – М.: Металлургия, 1977. – 336 с.

**O. Trotsko**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: [vldrag@kdu.edu.ua](mailto:vldrag@kdu.edu.ua)

The possibility of application of technique of layered materials formability determination by the charts of maximum deformations is considered. The formability estimation procedure and charts constructing scenario are presented. The criterion of nondestructive materials deformability is determined. In order to construct the diagrams specimens tension tests are performed. The theoretical and experimental charts of maximum deformation of bimetals are made. The results comparisons and correction of relations are made for layered materials formability determination by the charts. It is shown that fictitious layers introduction allows for more exact evaluation of the composition reliability. The experimental research results prove that offered technique is acceptable for determination of formability of layered materials by the charts of maximum deformations and for the materials tested.

**Key words:** formability, layered material, chart of maximum deformations.

REFERENCES

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

2. Kolmogorov V.L. *Tension, deformations, destruction*. – Moscow: Metallurgy, 1970. – 229 p. [in Russian]

3. The factors defining reliability of composite joints welded by explosion / V.S. Sedykh, Y.P. Trykov // *Welding by explosion and properties of welded connections. Coll. works*. – Volgograd: Publ. house Volgas. PI, 1986. – PP. 3–21. [in Russian]

4. Dragobetsky V.V. The generalized estimation models of destruction of deformable materials // *Coll.*

*works*. Iss. 16. – Alchevsk: DSMI, 2002. – PP. 128–135. [in Russian]

5. Kolmogorov V.L. *Processing of metals by pressure*. – Moscow: Metallurgy, 1986. – 688 p. [in Russian]

6. *Plasticity and destruction* / Ed. by V.L. Kolmogorov. – Moscow: Metallurgy, 1977. – 336 p. [in Russian]

Стаття надійшла 03.12.2012.

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