



DOI 10.5862/JEST.219.17

УДК 621.73.011

*К.С. Арсентьева, С.Н. Кункин,  
А.В. Мамутов, В.С. Мамутов*

## **ДИАГРАММЫ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ТОНКОЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА ПРИ ФОРМОВКЕ ПОДВИЖНЫМИ СРЕДАМИ**

*X.S. Arsentyeva, S.N. Kunkin,  
A.V. Mamutov, V.S. Mamutov*

### **FORMING LIMIT DIAGRAM FOR THIN SHEET METAL AT METAL FORMING BY MOVABLE MEDIA**

Разработана расчетно-экспериментальная методика получения диаграммы предельных деформаций тонколистового металла для процессов формовки подвижными средами. Суть методики заключается в разрушении образцов давлением полиуретана при вариации размеров эллиптических матриц для создания требуемого деформированного состояния. Измеряется толщина образца вблизи зоны разрушения или шейкообразования и вычисляется деформация по толщине. Соотношения между главными деформациями определяются конечно-элементным расчетом на основе известной кривой деформационного упрочнения материала. Простота измерений, отсутствие сетки на поверхности образца являются достоинствами предлагаемой методики. Получены точки диаграммы предельных деформаций тонколистовой стали 12X18H10T.

ЛИСТОВАЯ ФОРМОВКА ПОДВИЖНЫМИ СРЕДАМИ; ДИАГРАММА ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ; РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА; РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ПОЛИУРЕТАНОМ; ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИННОЙ ДЕФОРМАЦИИ; КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ РАСЧЕТ СООТНОШЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ.

The authors developed a combined numerical-experimental technique to obtain a Forming Limit Diagram of thin sheet metal for metal forming by movable media. The technique is based on deforming sheet samples until failure by pressure of polyurethane into a variety of elliptical dies. The required strain state is defined by the proportion of the elliptical die window. Through-thickness strain of the sample near a zone of failure or necking was measured, and major in-plane strains were obtained by finite-element simulation based on the familiar metal properties. Simplicity of measurements and absence of a grid on the surface of the sample are the advantages of the suggested technique. Points of the Forming Limit Diagram for the specific thin sheet stainless steel were obtained.

METAL FORMING BY MOVABLE MEDIA; FORMING LIMIT DIAGRAM; COMBINED NUMERICAL-EXPERIMENTAL TECHNIQUE; DESTRUCTION OF SAMPLES BY PRESSURE OF POLYURETHANE; SAMPLE THICKNESS MEASUREMENT; FINITE ELEMENT CALCULATION OF RELATIONSHIPS BETWEEN THE DEFORMATIONS.

#### **Введение**

Современный уровень развития вычислительной техники и конечно-элементных (КЭ) комплексов, их доступность для инженерных расчетов при проектировании процессов листовой штамповки позволяют с высокой точностью

прогнозировать параметры напряженно-деформированного состояния заготовки. Применение таких универсальных КЭ комплексов, как *LS-DYNA*<sup>®</sup>, дает возможность определять все компоненты тензора деформаций в любой точке заготовки и для любого момента деформирования [1]. Это позволяет решать одну из важных

задач проектирования процесса листовой формовки — прогнозирование разрушения заготовки с помощью диаграммы предельных деформаций (*Forming Limit Diagram — FLD*) [2]. В процессах формовки исходно твердыми подвижными средами (например, полиуретаном), в отличие от штамповки жидкостью, существует особенность разрушения листовой заготовки. Она связана с некоторой избыточной энергией нагружающей системы (упругая энергия подвижной среды, технологической оснастки и прессы). До начала пластической неустойчивости, не обязательно связанной с началом шейкообразования, идет процесс квазистатического деформирования, а затем заготовка разгоняется до высоких скоростей, и разрушение происходит при скоростях деформаций, достигающих  $d\varepsilon/dt = (1-5) \times 10^3 \text{ с}^{-1}$  [3]. В большинстве работ по исследованию *FLD*, например [4], отмечается, что при динамическом нагружении диаграмма предельных деформаций лежит ниже по сравнению со случаем статических испытаний. Корректно для компьютерных расчетов процессов штамповки подвижными средами использовать *FLD*, соответствующую данному технологическому процессу. Поэтому **целью настоящей работы** было создание методики получения диаграммы предельных деформаций тонколистового металла для процессов формовки подвижными средами.

#### Выбор и обоснование метода получения диаграммы предельных деформаций

С. Келер (Stuart P. Keeler) впервые предложил эмпирический критерий разрушения, базирующийся на измерении двух главных деформаций в плоскости листа в момент, предшествующий разрушению [5]. Келер построил кривую предельных деформаций для ряда углеродистых сталей при обеих положительных деформациях. Под началом разрушения в данном случае понимается потеря устойчивости листа при растяжении, или, иными словами, момент начала видимого шейкообразования. Позднее Г. Гудвин (Gorton M. Goodwin) получил аналогичную кривую для случая, когда одна из деформаций отрицательна [6]. В настоящее время различают диаграммы предельных деформаций для вариантов, когда деформации измеряются в начале шейкообразования и когда измерение осуществляется при нарушении сплошности материала [2].

Существует достаточно много способов получения диаграмм предельных деформаций. Все они сводятся к тому, чтобы достичь разрушения листового материала при различных предсказуемых или измеримых деформированных состояниях. Наиболее распространены методы Наказимы (K. Nakazima, Nakazima Test) [7], Марсиниака (Z. Marciniak, Marciniak Test) [8] и известный с начала прошлого века тест гидростатического выдавливания защемленной заготовки жидкостью (Hydraulic Bulge Test). Методы Наказимы и Марсиниака практически различаются только формой пуансона — полусферической для первого варианта и плоской с радиусами закругления для второго, и в настоящее время их часто называют методом Наказимы — Марсиниака (Nakazima — Marciniak Test) (рис. 1, а, б).

Метод Наказимы — Марсиниака заключается в том, что с помощью пуансона разрушаются образцы из листового материала различной формы. Для решения проблемы искажения результатов за счет трения в тесте Наказимы между образцом и пуансоном помещают антифрикционную прокладку. При реализации метода Марсиниака между пуансоном и образцом располагают транспортный спутник образца, имеющий вырез в середине, чтобы обеспечить создание двухосного растяжения. Иногда для этого делают цилиндрическую проточку в центре плоской части пуансона.

Вид деформированного состояния (соотношение главных деформаций в плоскости листа  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ ) определяется формой и размерами боковых вырезов на образце. Боковые вырезы могут быть различной формы, но чаще всего в виде сегмента круга. Образец без боковых вырезов позволяет получить точку на кривой *FLD*, которая соответствует двустороннему растяжению:  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ . Образец с максимальными вырезами позволяет получить точку, которая приблизительно соответствует одноосному растяжению, т. е.  $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2$ .

Регистрируется деформированное состояние с помощью измерения сетки или узора, нанесенного на поверхность образца. Измерение размеров сетки после начала шейкообразования или нарушения сплошности может осуществляться на микроскопе, однако в последнее время часто используют измерения при помощи нескольких камер. Но такой способ, кроме

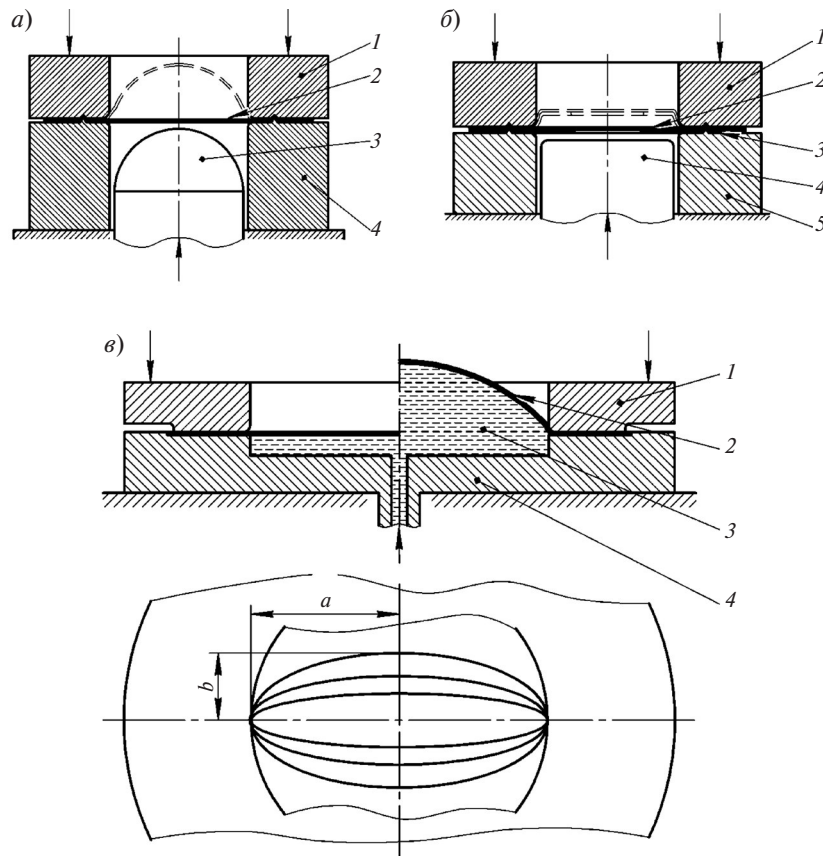


Рис. 1. Схемы испытания материала:

- а* — схема Наказимы (*1* — верхняя матрица, *2* — образец, *3* — полусферический пуансон, *4* — нижняя матрица);  
*б* — схема Марсиниака (*1* — верхняя матрица, *2* — образец, *3* — транспортный спутник образца, *4* — плоский цилиндрический пуансон, *5* — нижняя матрица);  
*в* — тест гидростатического выдавливания (*1* — матрица, *2* — образец, *3* — жидкость, *4* — камера)

сложности нанесения качественного сеточного покрытия на поверхность заготовки, имеет ряд недостатков. Во-первых, необходимо определить начало пластической неустойчивости, поскольку именно этот момент является по определению разрушением материала. Такой момент при визуальном наблюдении определить тяжело, поэтому многие исследователи доводили образцы до разрушения, а затем измеряли деформацию, которая в этом случае включает также деформацию шейкиобразования. Получаемая при этом ошибка тем меньше, чем больше диаметр кружка на поверхности образца. Приемлемым считается диаметр кружка 8–10 мм. Во-вторых, при ручном расчете деформации возникает следующая ошибка: измеренные и рассчитанные таким образом деформации — это деформации на поверхности образца, а не нейтральной

поверхности, что было бы более корректно. В-третьих, сетка, нанесенная лазерным, химическим или другим способом, особенно царапанием, может быть источником концентрации напряжений и исказить результаты испытаний для тонколистовых и особо тонколистовых материалов.

Кроме того, механика квазистатического деформирования и разрушения заготовки при использовании метода Наказимы — Марсиниака значительно отличается от той, что имеет место при листовой штамповке подвижными средами. С этой точки зрения более предпочтительным представляется Hydraulic Bulge Test (рис. 1, *в*). Деформирование тонколистового образца *2* осуществляется за счет давления жидкости (обычно масла) *3*, подающейся в камеру *4*. На матрице *1* выполняются закругления, чтобы

разрушение не происходило на кромке. Вид деформированного состояния определяется размерами эллиптической матрицы. При  $a = b$  имеет место двухосное растяжение и деформации равны ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ ), а в случае  $a \gg b$  напряженное состояние приближается к плоской деформации и можно приблизиться к уровню  $\varepsilon_2 \cong 0$ .

По сути, можно получить правую положительную часть *FLD*. В условиях формовки листового материала подвижными средами для оценки разрушения заготовки в большинстве случаев правой части *FLD* вполне достаточно. Однако все недостатки с точки зрения измерения деформаций в данном методе присутствуют, как и в методе Наказимы — Марсиниака. Поэтому в нашей работе предлагается более простой в практической реализации метод по типу Hydraulic Bulge Test — экспериментально-аналитический метод получения точек диаграмм *FLD*, позволяющий максимально приблизить измерения к зоне шейкообразования.

#### Экспериментально-аналитический способ получения точек диаграмм *FLD*

Исходными данными служат характеристики кривой деформационного упрочнения материала заготовки, аппроксимированные степенной зависимостью

$$\sigma_s = B\varepsilon_i^m,$$

где  $\sigma_s$  — напряжение текучести материала;  $\varepsilon_i$  — интенсивность тензора логарифмических деформаций;  $B$  и  $m$  — параметры аппроксимации. Экс-

перименты проводились для стали 12Х18Н10Т толщиной  $h_0 = 0,55$  мм. После аппроксимации опытной кривой деформационного упрочнения получены данные:  $B = 1250$  МПа,  $m = 0,287$ . Экспериментальная оснастка для нагружения образца показана на рис. 2, *a*.

Нагружение листового образца 5 осуществляется давлением нагружающей подвижной среды 4, заключенной в контейнер 3, при перемещении плунжера 2 под действием на него усилия гидравлического пресса, между плитами 1, 7 которого расположено экспериментальная оснастка. Под действием давления полиуретана образец деформируется в матрицу 6. Испытания проводились на гидравлическом прессе ПСУ-100.

В качестве материала нагружающей подвижной среды использовался полиуретан. Твердость составляла 55–60 единиц по Шору, что примерно соответствовало характеристикам полиуретана марки СКУ-6Л. Для данной марки полиуретана коэффициент кулоновского трения в условиях деформирования заготовки не превышает  $\mu \leq 0,01–0,05$  [9]. Поэтому отпадает необходимость в антифрикционной прокладке между листовым образцом и нагружающим элементом (средой). Также за счет давления полиуретана осуществляется прижим фланцевой части листового образца 5 к поверхности матрицы 6.

Радиус круглого отверстия и длина большой полуоси для матриц с отверстием в виде эллипса были  $b = 50$  мм. Диаметр контейнера был  $D = 150$  мм. Образец из листового металла вырезался круглым с диаметром на 0,5 мм меньше

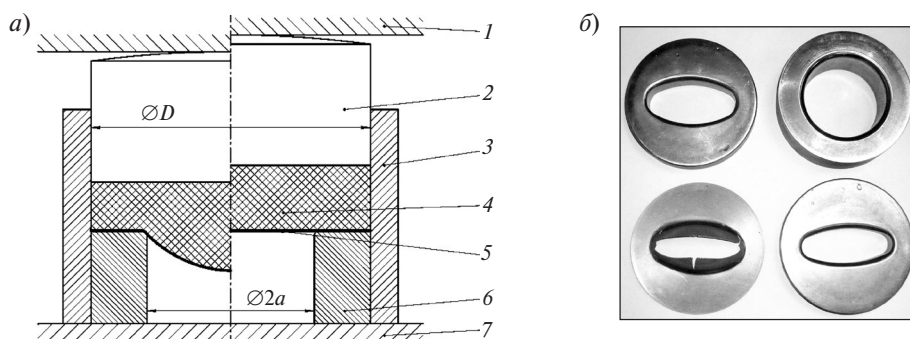


Рис. 2. Технологическая оснастка для испытаний:

*a* — оснастка для нагружения образца (1, 7 — плиты гидравлического пресса, 2 — плунжер, 3 — контейнер, 4 — полиуретан, 5 — образец, 6 — матрица);

*б* — матрицы с круглым отверстием (диаметром 100 мм) и овальными (38×100 мм и 50×100 мм), а также пример разрушенного образца на матрице 50×100 мм



диаметра контейнера. Такое соотношение размеров позволило исключить процесс вытяжки в чистом виде и обеспечить процесс вытяжки-формовки, когда деформирование происходило за счет утонения центральной части заготовки. В процессе испытаний были использованы две овальные матрицы с размерами  $a = 50$  мм,  $b = 19$  мм и  $a = 50$  мм,  $b = 25$  мм, а также круглая матрица с радиусом 50 мм. Кромка матрицы закруглялась радиусом 6 мм. При испытаниях с овальными матрицами направление проката было расположено вдоль полуоси эллипса длиной  $a$ .

В процессе нагружения заготовка доводилась до разрушения. Выбранные условия деформирования и разрушения листовых образцов позволили получать достаточно устойчивую картину их разрушения (рис. 2, б). На разрушенной заготовке визуально определялась граница шейкикообразования. На максимально близком расстоянии к этой границе скобой с индикатором часового типа измерялась толщина заготовки  $h$  в 5–10 местах. Затем вычислялась средняя толщинная деформация

$$\varepsilon_h = \varepsilon_3 = \ln(h_0/h).$$

Для круглого в плане отверстия имеет место осесимметричное деформированное состояние ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ ). Для этой точки по величине третьей деформации из условия равенства нулю первого инварианта тензора деформаций определяются другие компоненты тензора логарифмических деформаций:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3/2.$$

Для получения других точек  $FLD$  по величине толщинной деформации необходимо знать соотношение двух главных деформаций в плоскости листа. Такое соотношение можно получить, сделав компьютерный расчет деформирования заготовки, например при помощи КЭ комплекса *LS-DYNA*, аналогично тому, как это делалось в работе [10].

Компьютерный расчет осуществлялся с использованием универсального конечно-элементного комплекса *LS-DYNA 971*. При расчетах материал заготовки считался изотропным; задавались следующие основные параметры: упругие константы —  $E = 202$  ГПа (модуль Юнга),  $\nu = 0,31$  (коэффициент Пуассона); параметры степенного закона упрочнения —  $B$  и  $m$ ; плотность материала  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Была принята модель материала *MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY*.

Материал матрицы задавался моделью *RIGID*. Предполагалось кулоновское трение материала образца по материалу матрицы со значениями коэффициента трения  $\mu = 0,2$  при покое и  $\mu = 0,15$  при движении. При нагружении образца полагалось, что давление линейно возрастает до максимального значения при времени 200 мс. При заданных размерах матрицы и образца это обеспечивало квазистатичность нагружения [10].

Результаты компьютерных расчетов представлены на рис. 3.

На рисунках показаны пути деформирования четырех центральных точек листового образца (рис. 3, б, г). На этих же рисунках представлены расчетные зависимости  $FLD$ . Верхняя кривая расчетной  $FLD$  соответствует разрушению образца. Нижняя кривая  $FLD$  лежит примерно на 20 % ниже верхней кривой и обеспечивает некоторый расчетный запас. Путь нагружения выбран в срединной поверхности листа. Точка пересечения путей деформирования с верхней кривой  $FLD$  определяет соотношение компонент первой и второй главных деформаций. Определив их соотношение ( $\alpha = \varepsilon_2/\varepsilon_1$ ), по величине толщинной деформации определяем сами деформации  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , которые задают соответствующую точку на кривой  $FLD$ :  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3/(1 + \alpha)$ ,  $\varepsilon_2 = \alpha\varepsilon_1$ .

Полученные значения точек  $FLD$  представлены в таблице. Разброс при измерении толщины составляет примерно 10–15 %.

Следует отметить, что полученные точки лежат ниже расчетной кривой  $FLD$ . Это связано с тем, что в данном методе испытания, по сути, реализуется высокоскоростное разрушение листового металла [3], при котором такое снижение критических деформаций возможно [4]. Варьируя соотношение сторон эллипса  $a$  и  $b$  для изготовления соответствующих матриц, можно получить всю диаграмму предельных деформаций для  $\varepsilon_2 > 0$ .

### Заключение

Разработана расчетно-экспериментальная методика получения диаграммы предельных деформаций тонколистового металла для процессов формовки подвижными средами, в которой механика разрушения материала образца близка к механике соответствующего технологического процесса: нагружение и разрушение листовых образцов осуществляется при помощи

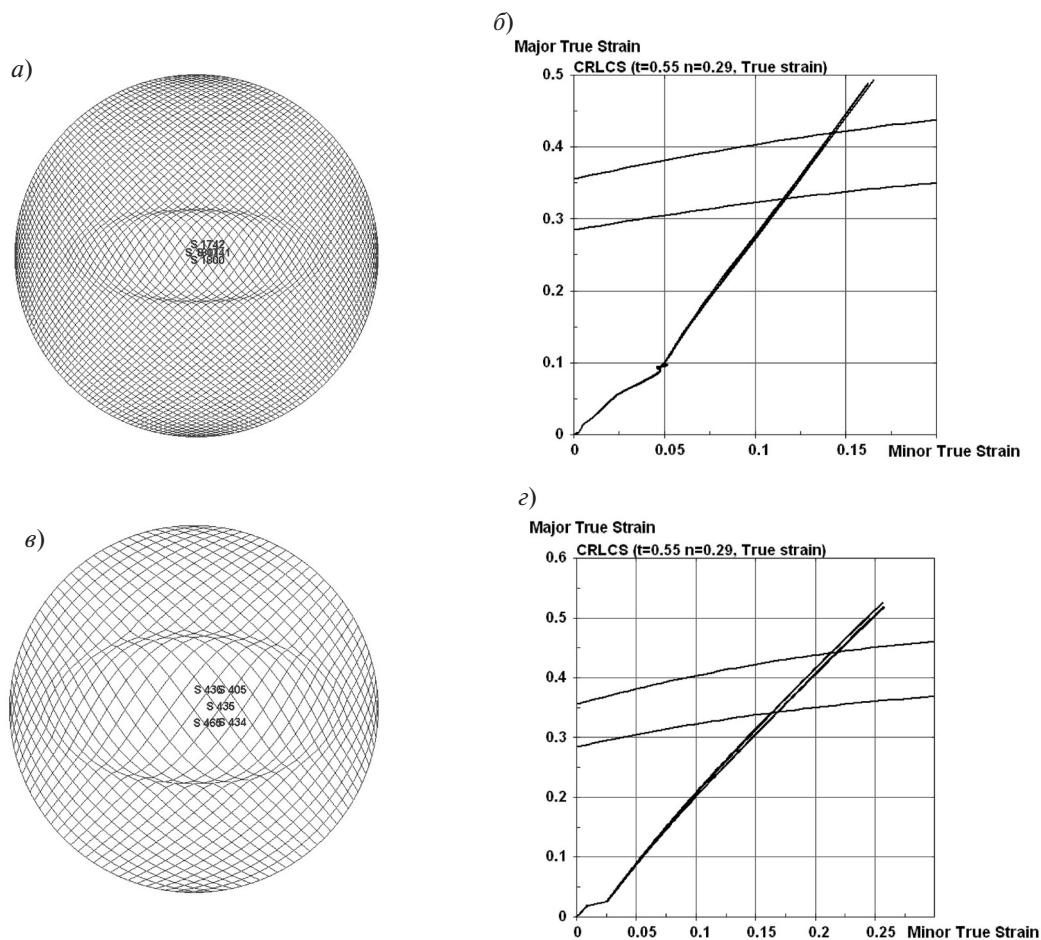


Рис. 3. Пути деформирования для отмеченных точек заготовки при разрушении в овальной матрице с размерами 38×100 мм (а, б) и 50×100 мм (в, з) (по вертикальной оси — первая главная логарифмическая деформация, по горизонтальной оси — вторая главная логарифмическая деформация)

**Компоненты тензора деформаций для трех форм матрицы**

Форма матрицы	$h$	$-\varepsilon_3$	$\alpha = \varepsilon_2/\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_1$
Круглая с радиусом 50 мм	0,25±0,02	0,79	1	0,395	0,395
Овальная 50×100 мм	0,35±0,03	0,45	0,48	0,146	0,304
Овальная 38×100 мм	0,38±0,03	0,37	0,35	0,096	0,274

полиуретана. Варьируя соотношение сторон эллипса  $a$  и  $b$  для изготовления соответствующих матриц, можно получить положительную часть диаграммы предельных деформаций для  $\varepsilon_2 > 0$ , что достаточно для расчетов процессов листовой формовки подвижными средами. Измеряются толщинные деформации непосредственно вблизи зоны разрушения или шейкиобразования. Две другие главные деформации в срединной поверхности листа определяются конечно-эле-

ментным расчетом на основе известной кривой деформационного упрочнения материала. Достоинствами предлагаемой методики являются относительная простота оснастки для нагружения образца, простота измерений, отсутствие сетки на поверхности образца и получение критических деформаций для срединной поверхности листового образца. Получены точки диаграммы предельных деформаций тонколистовой стали 12X18H10T толщиной 0,55 мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hallquist J.O.** LS-DYNA theoretical manual / Livermore Software Technology Corporation. Livermore, CA, 2006. 498 p.
2. **Dorel Banabic.** Sheet Metal Forming Processes. Constitutive Modelling and Numerical Simulation. London-New York: Springer Heidelberg Dordrecht, 2010. 301 p.
3. **Аксенов Л.Б., Мамутов В.С., Мамутов А.В.** Построение диаграмм предельных деформаций для прогнозирования разрушения тонколистовой заготовки при высокоскоростной вытяжке-формовке // КШП. 2002. №4, С. 9–12.
4. **Persy J.N.** The effect of strain rate on the forming limit diagram for sheet metal // *Annals of CIPP*. 1980. Vol. 29, №1. P. 131–132.
5. **Keeler S.P.** Rating the Formability of Sheet Metal // *Metal Progress*. 1966. Vol. 90 P. 148–153.
6. **Goodwin G.M.** Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop // Presented at SAE Automotive Engineering Congress. Detroit. January 1968. Paper 680093. 8 p.
7. **Nakazima K., Kikuma T.** Forming limits under biaxial stretching of sheet metals. *Testu-to Hagane* 53:455–458 (in Japanese), 1967.
8. **Marciniak Z., Kuczynski K.** Limit strain in the process of stretch forming sheet metal, *International Journal of Mechanical Science*. 1967. Vol. 9. P. 609–620.
9. **Комаров А.Д.** Штамповка листовых и трубчатых деталей полиуретаном. Л.: Изд-во ЛДНТП, 1975. 36 с.
10. **Мамутов А.В., Мамутов В.С.** Расчеты процессов штамповки подвижными средами при помощи комплекса LS-DYNA // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. №2(147). Т. 1. С. 127–131.

## REFERENCES

1. **Hallquist J.O.** LS-DYNA theoretical manual / Livermore Software Technology Corporation. Livermore, SA. 2006. 498 p.
2. **Dorel Banabic.** Sheet Metal Forming Processes. Constitutive Modelling and Numerical Simulation. London-New York: Springer Heidelberg Dordrecht. 2010. 301 p.
3. **Aksenov L.B., Mamutov V.S., Mamutov A.V.** Postroyeniye diagramm predelnykh deformatsiy dlya prognozirovaniya razrusheniya tonkolistovoy zagotovki pri vysokoskorostnoy vytyazhke-formovke [Forming Limit Diagram for predicting failure of thin sheet part at high speed metal forming]. *Forging-Stamping Production*. 2002. №4. S. 9–12. (rus.)
4. **Persy J.N.** The effect of strain rate on the forming limit diagram for sheet metal. *Annals of CIPP*. 1980. Vol. 29, №1. P. 131–132.
5. **Keeler S.P.** Rating the Formability of Sheet Metal. *Metal Progress*. 1966. Vol. 90 P. 148–153.
6. **Goodwin G.M.** Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop. *Presented at SAE Automotive Engineering Congress*. Detroit. January 1968. Paper 680093. 8 p.
7. **Nakazima K., Kikuma T.** Forming limits under biaxial stretching of sheet metals // *Testu-to Hagane* 53:455–458 (in Japanese). 1967.
8. **Marciniak Z., Kuczynski K.** Limit strain in the process of stretch forming sheet metal, *International Journal of Mechanical Science*. 1967. Vol. 9. P. 609–620.
9. **Komarov A.D.** Shtampovka listovykh i trubchatykh detaley poliuretanom. [Metal forming of sheets parts and pipes parts by polyurethane]. Leningrad: Izd-vo LDNTP, 1975. 36 s. (rus.)
10. **Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Raschety protsessov shtampovki podvizhnymi sredami pri pomoshchi kompleksa LS-DYNA [Computer simulation of metal-forming by movable media using Ls-Dyna code] / *St. Petersburg State Polytechnical University Journal : Science and education*. 2012. № 2(147). Т. 1. S. 127–131. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**АРСЕНТЬЕВА Ксения Сергеевна** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: fartran@li.ru

**КУНКИН Сергей Николаевич** — кандидат технических наук доцент, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: ksn54@mail.ru

**МАМУТОВ Александр Вячеславович** — кандидат технических наук доцент приглашенный ученый Оклендского университета (Мичиган, США. 2200 N Squirrel Rd. Rochester, Michigan 48309. E-mail: A.Mamutov@yahoo.com

**МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: mamutov\_vs@spbstu.ru

#### **AUTHORS**

**ARSENTYEVA Ksenia S.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: fartran@li.ru

**KUNKIN Sergei N.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: ksn54@mail.ru

**MAMUTOV Alexander V.** — Oakland University. 2200 N Squirrel Rd. Rochester, Michigan 48309. E-mail: A.Mamutov@yahoo.com

**MAMUTOV Viacheslav S.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: mamutov\_vs@spbstu.ru