

Применение бесконтактных способов оценки деформации при испытаниях на выдавливание алюминиевой листовой заготовки по Эриксену

М.А. Петров¹, Д.А. Ромашов¹, В.В. Исаков²

¹ ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», кафедра «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», ул. Автозаводская, д. 16, Москва, 115280, Российская Федерация

² ГНЦ ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», ул. Авиамоторная, д. 2, Москва, 111116, Российская Федерация

Аннотация

В настоящем исследовании рассматриваются бесконтактные методики оценки деформации листового образца из алюминиевого сплава АМг2, подвергнутого выдавливанию по Эриксену. Показано, что при численном моделировании возможно получение достоверной информации, однако для случая, когда известны коэффициенты уравнений текучести и разрывания материала. Это обстоятельство требует применения подтверждающей техники, основанной на результатах реальных экспериментов, например, при помощи оптического 3D-сканирования. Для реализации методов требуется соблюдение особенностей работы с ними в части подготовки образцов. Совмещённая техника спекл-интерферометрии и корреляции цифровых изображений позволяет оценить деформации на наружных прямолинейных поверхностях, однако не даёт представление о деформациях изделий с криволинейными поверхностями и внутри тела образца, для чего требуется дополнительное определение деформаций при помощи численного моделирования.

Ключевые слова

АМг2, МКЭ, КЦИ, спекл-интерферометрия, QForm, 3D-сканирование.

Application of Contactless Methods for Deformation Assessment During Erichsen Cupping Test of Aluminium Sheet Samples

M.A. Petrov¹, D.A. Romashov¹, V.V. Isakov²

¹ FSAEI HE «Moscow Polytechnic University», Department «Material Forming and Additive Technologies», Avtozavodskaya St. 16, Moscow, 115280, Russian Federation

² Central Institute of Aviation Motors, Aviamotornaya St. 2, Moscow, 111116, Russian Federation

Abstract

In the present study, non-contact techniques for estimating the deformation of a sheet specimen of aluminium alloy AA5051 (AMg2) subjected to Erichsen cupping test are considered. It is shown that it is possible to get reliable information by numerical simulation, however, for the case when the coefficients of the yield and fracture equations of the material are well-known and validated. This requires the application of confirmatory techniques based on the results of real experiments, for example, through optical 3D-scanning. The realization of the techniques requires the observance of the peculiarities of working with them in terms of specimen preparation. The combined technique of speckle interferometry and digital image correlation allows estimating deformations on the outer linear surfaces, but does not indicate deformations of products with curved surfaces and inside the

ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

EMAIL: petrovma_mospolytech@mail.ru (М.А. Петров); dimaromashov393@gmail.com (Д.А. Ромашов); vvisakov@ciam.ru (В.В. Исаков)

ORCID: 0000-0002-2324-5057 (М.А. Петров); 0009-0006-3210-464X (Д.А. Ромашов); 0009-0001-4955-4835 (В.В. Исаков)



© 2023 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

specimen, which requires an additional determination of deformation fields by numerical simulation.

Keywords

AA5051, FEM, DIC, speckle interferometry, QForm, 3D-scanning.

1. Введение

В практике обработки материалов давлением применяют следующие методы оценки истинной или логарифмической деформации при вытяжке листовых заготовок: при помощи муаровых полос, делительных сеток и тензометрии, поляризованно-оптический и за счёт измерения твёрдости. Под логарифмической деформацией понимается натуральный логарифм отношения конечного размера к начальному, уравнение (1), и, согласно закону о равенстве объёма тела до и после деформации, сумма деформаций по трём направлениям равно нулю, уравнение (2) [1]. Таким образом, если знать значение деформации по одному из трёх направлений, то значение деформаций во втором и третьем направлениях можно определить по теоретической зависимости, например, по уравнению (3), для случая осесимметричной вытяжки стаканчика.

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{\text{dim}}{\text{dim}_0}\right), \quad (1)$$

$$\sigma_\rho + \sigma_\theta + \sigma_z = 0, \quad (2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_\rho + \sigma_\theta + \sigma_z = 0 \\ \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} = \frac{\varepsilon_\rho - \varepsilon_z}{\varepsilon_\theta - \varepsilon_z} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} = -\frac{\varepsilon_\theta + 2\varepsilon_z}{\varepsilon_\theta - \varepsilon_z} = \left(\begin{array}{l}] \\ \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} = a \end{array} \right) \Rightarrow \varepsilon_z = -\frac{1+a}{2-a}\varepsilon_\theta, \quad (3)$$

где dim_0 и dim – исходный и конечный размер объекта; $\sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_z$ – напряжения в радиальном, азимутальном и высотном направлениях, соответственно; $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ – деформации в радиальном, азимутальном и высотном направлениях, соответственно.

Измерение деформаций в ходе процесса листовой обработки, например, вытяжки, в каждой точке деформируемого материала, является сложным процессом. С появлением компьютерных методов моделирования процессов обработки давлением листовых материалов проводить оценку деформации стало намного проще. Применение компьютерных программ вместо теоретических расчётов обусловлено многообразием совмещённых задач, каждая из которых требует большой набор теоретических формул. Программы, основанные на методе конечного элемента (МКЭ), лишены этого и решают задачу на основании данных о, например, перемещениях и скоростях в узловых точках конечно-элементной сетки, которой дискретизируется исследуемый объект.

Существует достаточно большое количество российских и зарубежных работ, в которых проводится оценка деформации материалов бесконтактным способом, в ходе проведения механических испытаний, с дальнейшим построением кривых сопротивления деформации, предельного формоизменения и т.д. [2]–[11].

2. Экспериментальные данные

Для изучения оценки деформации бесконтактным способом рассмотрим получение экспериментальных данных в ходе деформации листовой заготовки, толщиной 1,2 мм, из алюминиевого сплава АМг2, по схеме выдавливания по Эриксену. Согласно ГОСТ 10510-80 и

ISO 20482 при проведении данного испытания материал деформируется до разрушения за счёт перемещения пуансона снизу-вверх. Форма пуансона и инструментов выбирается исходя из марки материала и его размеров. По результатам данного испытания определяется величина перемещения пуансона, при которой произошло разрушение образца. В данном исследовании применяется инструмент по типу исполнения 1 (согласно ГОСТ 10510-80), показанный на рисунке 1.

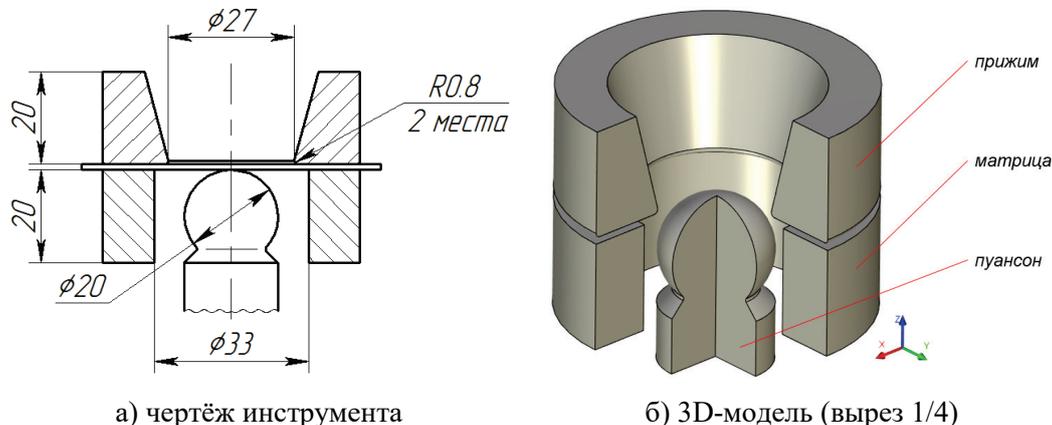


Рисунок 1 – Чертёж инструмента с заготовкой (а) и его трёхмерная модель без заготовки (б)

В ходе экспериментов было установлено, что разрушение образца наступает при перемещении пуансона на 11 мм, силе деформирования 590 кг или 0,0059 МН, а также макс. утонении в месте разрушения материала $\delta = 0,4$ мм. Эти исходные данные являются референтными и используются в дальнейшем для валидации результатов численного моделирования и оптических экспериментальных методов оценки деформации.

На рисунке 2 представлено поэтапное формирование полусферы и итоговый образец с диаметральным сечением.

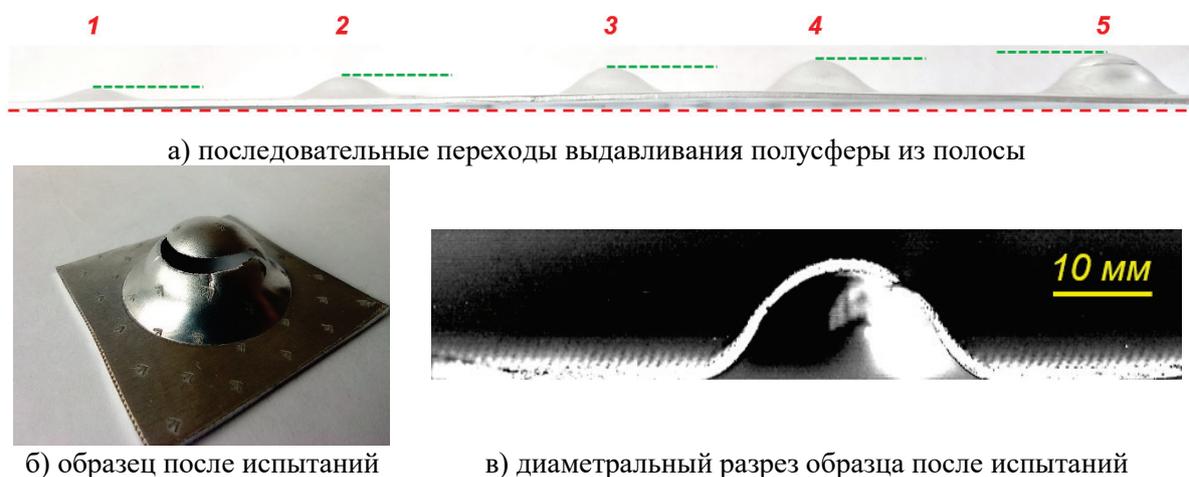


Рисунок 2 – Образцы после испытаний

3. Оценка деформации по результатам численного моделирования

Компьютерное моделирование (симуляция) процесса выдавливания по Эриксену реализовано в программе QForm. В таблице 1 показаны задаваемые параметры процесса. Задача моделировалась в трёхмерной постановке. В таблице 2 показаны задаваемые свойства материала.

Для описания характера течения материала использовалась кривая текучести или сопротивления деформации, отражающая упрочнение материала при пластической деформации, описываемое уравнением (4), которое совпадает с четырёх коэффициентной формой уравнения Хензеля-Шпиттеля при $m_1 = m_3 = m_4 = 0$, уравнение (5).

Таблица 1 – Параметры для расчёта процесса

Параметр	Ед. изм.	Значение
Материал заготовки	-	АМг2
Скорость перемещения пуансона	мм/с	2
Макс. сила деформирования	МН	0,1
Сила прижима	МН	0,02
Трение на контактной поверхности	-	по з. трения Леванова ($m = 0,5$)
Макс. перемещение пуансона	мм	12

Таблица 2 – Физико-механические свойства

Параметр	Ед. изм.	Значение
Плотность	кг/м ³	2 690
Теплопроводность	Вт/м К	159
Теплоёмкость	Дж/кг К	963
Модуль Юнга	ГПа	71
Коэф. Пуассона	-	0,33
Темп. коэф. линейного расширения	1/°С	2,4e-5

$$\sigma = k\varepsilon^n, \quad (4)$$

$$\sigma = ke^{-m_1 T} \varepsilon^{m_2} e^{-m_4 \varepsilon} \varepsilon^{m_3}, \quad (5)$$

где σ – напряжение сопротивления деформации; ε – логарифмическая деформация; k – коэффициент упрочнения (напряжение течения, при котором $\varepsilon = 1$); n – показатель деформационного упрочнения; m_i – коэффициенты уравнения, отражающие влияние температуры, скорости деформирования и степени деформации.

В качестве условий пластичности выбирались условия изотропного упрочнения (по Мизесу) и анизотропного упрочнения для листовых материалов (по Хиллу-Мизесу). Модель исчерпания ресурса пластичности задавалась через диаграмму предельного формоизменения, а также через модифицированную модель Кокрофта-Лэфема-О (Cockroft-Latham-Oh) [12]. В таблице 3 показаны значения коэффициентов уравнений моделей, использованных в расчётах.

Таблица 3 – Значения коэффициентов моделей

Параметр	Ед. изм.	Значение
<i>условие пластичности</i>		
$\Gamma_0; \Gamma_{45}; \Gamma_{90}$	-	0,1403; 0,1825; 0,2077
<i>кривая текучести</i>		
$k; n = m_2$	МПа; -	194,09; 0,07351
<i>диаграмма предельного формоизменения (FLD)</i>		
$R_m; \delta_{\max.}$	-; мм	0,178; 0,4
<i>модифицированная модель Кокрофта-Лэфема-О</i>		
$\alpha; \varepsilon_{\max.}$	-; -	0,5; 0,05

По результатам моделирования получена технологическая информация. График силы деформирования от перемещения пуансона показывает момент падения нагрузки, что обусловлено избыточным утонением материала и его последующим разрушением (рисунок 3).

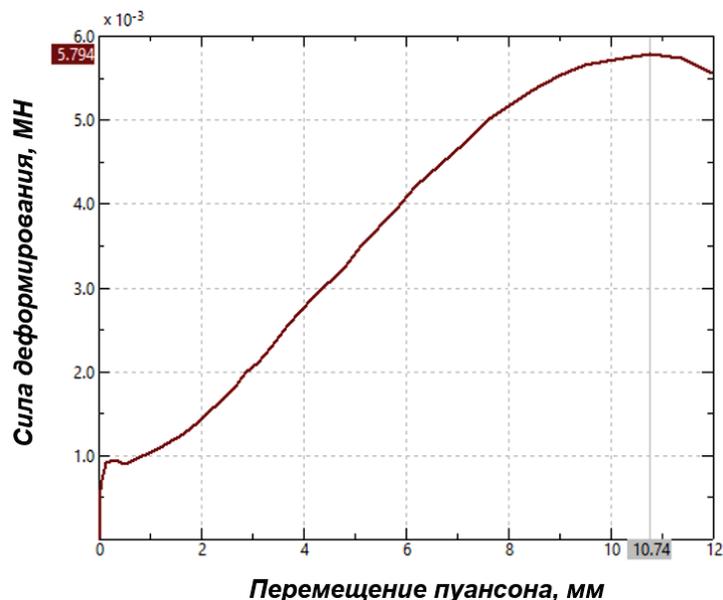
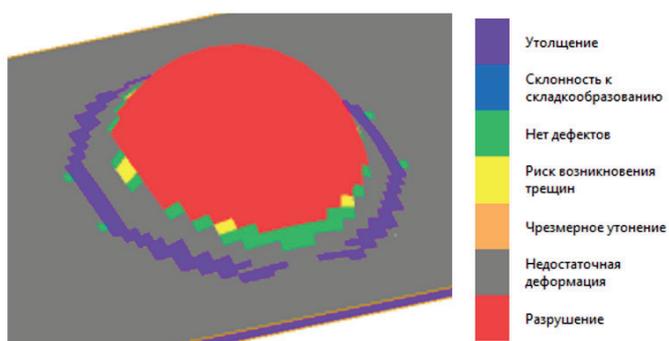
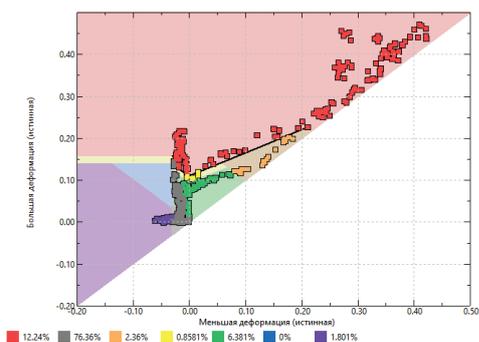


Рисунок 3 – Машинная диаграмма процесса выдавливания по Эриксену

Поля значений эффективных деформаций и области разрушения показаны на рисунке 4. Оценка мест разрушений осуществлялась по моделям исчерпания ресурса пластичности. По модели, описываемой диаграммой предельного формоизменения, видно, что разрушение наступает в купольной части, при этом указать чётко выраженного места-инициатора разрушения нельзя. При перемещении пуансона, равному 11 мм, разрушение распространяется по всей купольной области. По модели Кокрофта-Лэфема-О можно выделить кольцеобразный участок, располагающийся ниже гребня купола, в котором развиваются максимальные напряжения. Уровень триаксальности, определяемый по уравнению (6) и отражающий отношение гидростатического давления к эквивалентному напряжению (является функцией первого и второго инвариантов), и параметр Лоде, определяемый по уравнению (7) и являющийся функцией второго и третьего инвариантов, указывают на соответствие схемы двухосному растяжению.



а) области разрушения



б) диаграмма FLD

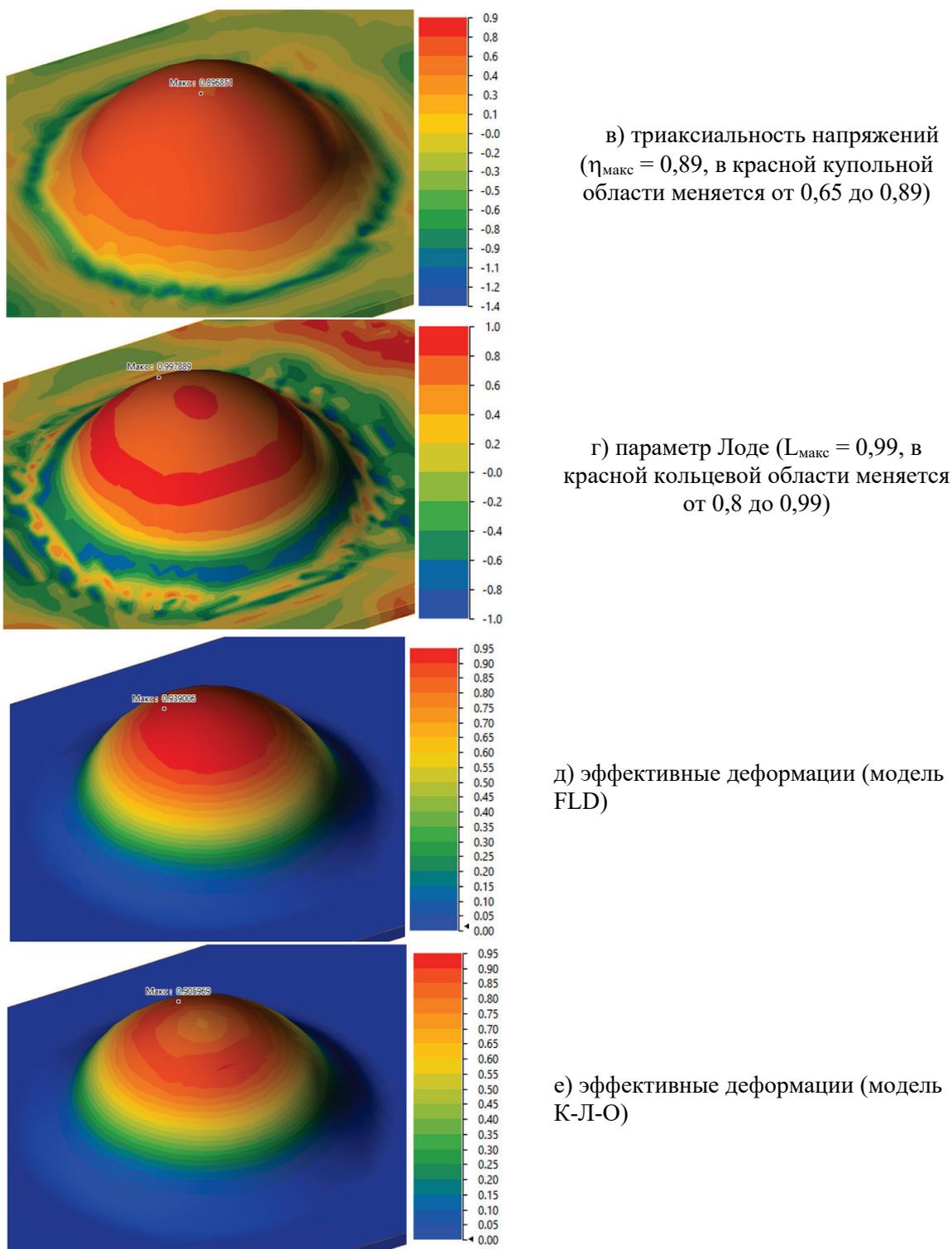


Рисунок 4 – Результаты численного моделирования разрушения материала

На рисунке 5 представлена диаграмма связи параметра Лоде (через углы Лоде) и триаксиальность напряжения в зависимости от напряжённо-деформированного состояния материала (НДС).

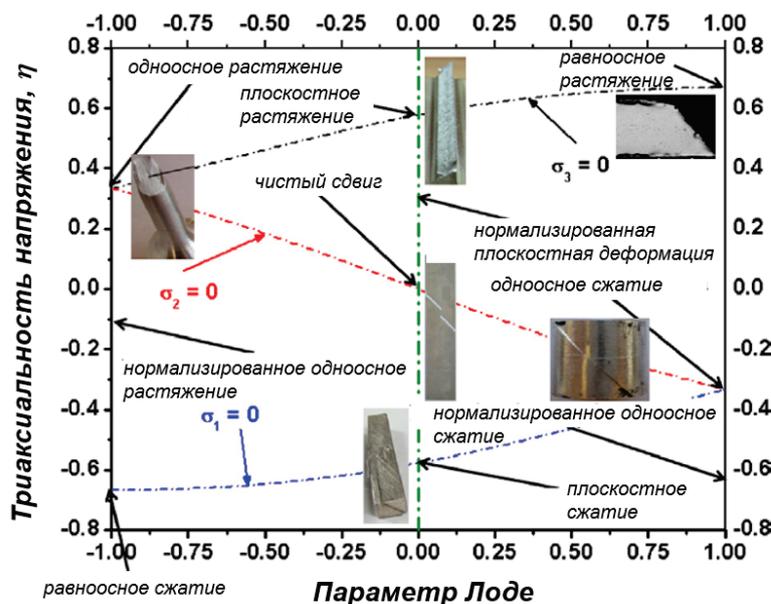


Рисунок 5 – Взаимосвязь параметра Лодде и триаксальности [13]

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\bar{\sigma}}, \quad (6)$$

$$L = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \sqrt{3} \operatorname{tg} \theta, \quad (7)$$

где $\bar{\sigma}$ – эффективное напряжение по Мизесу; σ_m – гидростатическое давление; θ – угол Лодде.

4. Оценка деформации по фотографиям

Обработка изображений может осуществляться при помощи программ, написанных на языках программирования C++, MathLab, Java или Python. Алгоритмы машинного зрения существенно продвинулись вперёд, появилось большое количество открытых (open source) кодов, например, DIC engine [14], позволяющих обрабатывать растровую информацию и определять значения деформации объекта во время проведения эксперимента. Наиболее известными системами, включающими оборудование и программное обеспечение, являются Aramis и Argus от компании GOM (подразделение компании Carl Zeiss), StrainMaster от компании LaVision, laserXtens от компании Zwick-Roell, а также AutoGrid от компании ViALUX.

При определении деформации важным моментом является возможность точного определения местоположения реперных точек, принадлежащих деформируемому материалу. Известны два метода, позволяющие оценить взаимное расположение точек в пространстве: спекл-интерферометрия (англ. speckle interferometry) и корреляция цифровых изображений (КЦИ или англ. DIC). При помощи спекл-интерферометрии можно определить сдвиг точечных объектов, образующих некое изображение. При помощи КЦИ возможно сопоставить изменения на некотором изображении, не обязательно точечном. В обоих случаях, требуется наблюдение за объектами на протяжении времени с фиксацией изображений через определённый временной интервал. Методы могут применяться совместно, т.е. оценку изменения положения точечных объектов можно выполнять в том числе и алгоритмами КЦИ.

Для реализации такого совмещённого метода требуется подготовка поверхности образца и нанесение на неё специального рисунка. Например, для реализации метода делительных сеток требуется нанесение на образец рисунка в виде сетки, образованной пересекающимися параллельными линиями, с известными параметрами ячеек. В методе же спекл-интерферометрии требуется создать точечный рисунок с уникальным, неповторяющимся

характером распределения. Основными требованиями к рисунку являются следующие: небликующая поверхность, точки разного диаметра и хаотичное распределение точек. На рисунке 6 показаны варианты подготовки образцов. Для реализации КЦИ достаточно создать некий шаблон или паттерн, т.е. рисунок с повторяющимися элементами.

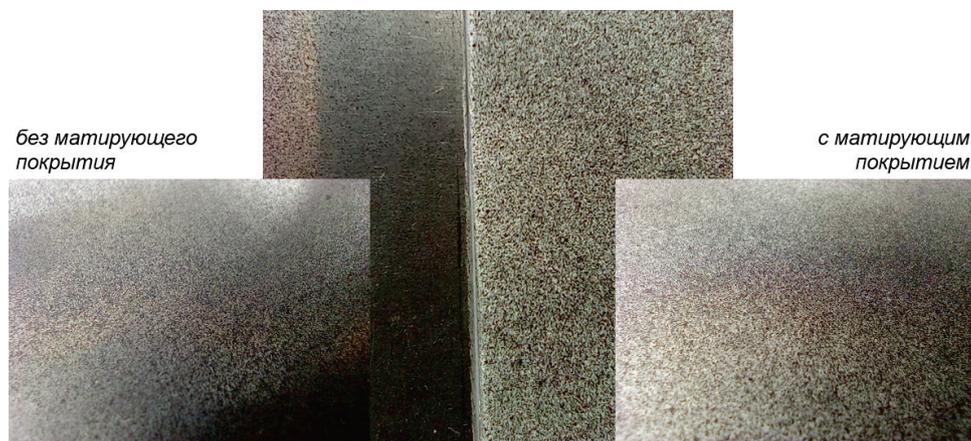


Рисунок 6 – Рисунок на поверхности образцов, полученный нанесением аэрозольной краски

Необходимые шаблоны и в том, и в другом случаях могут быть созданы как ручным способом, так и при помощи гравировальных методов, в том числе и при помощи бесконтактной лазерной гравировки. На рисунке 7 в верхнем ряду показаны некоторые образцы получаемого на компьютере шаблона или паттерна, а в нижнем ряду – экспериментальные образцы с нанесённым паттерном.

При проведении испытаний проводится непрерывная видеосъёмка в режиме FullHD (разрешение 1980 x 1080 и выше). После получения видеозаписи осуществляется её раскадровка, с сохранения каждого, например, десятого кадра. Далее в программе GOM Correlate полученный набор кадров загружается на шкалу кадров и проводится распознавание перемещений точек с оценкой деформаций по всем картинкам-кадрам в автоматическом режиме. Используется бикубическая интерполяция субпикселей. В случае недостаточного количества информации программа показывает смещение лишь отдельных точек (рисунок 8а).

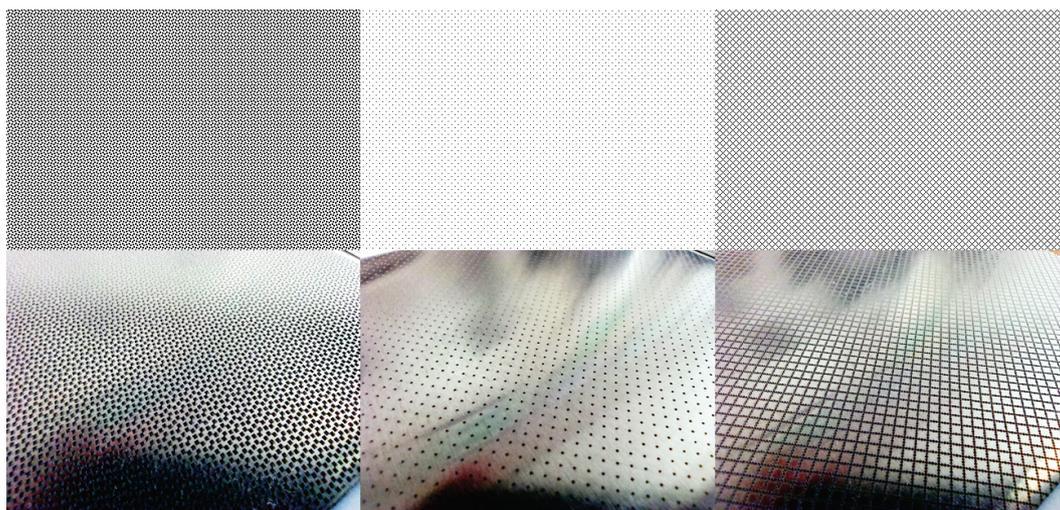


Рисунок 7 – Паттерны на заготовках, полученные лазерной гравировкой

Также возможно дополнительно проводить сопоставление точек поверхности, вводить реперные точки для совмещения, исключать избыточные точки из области анализа изображения (рисунок 8б). В случае успешного распознавания, на поверхность интересующей области картинки наносится цветовая схема или цветовая карта смещений/деформаций отдельных точек (рисунок 8в).

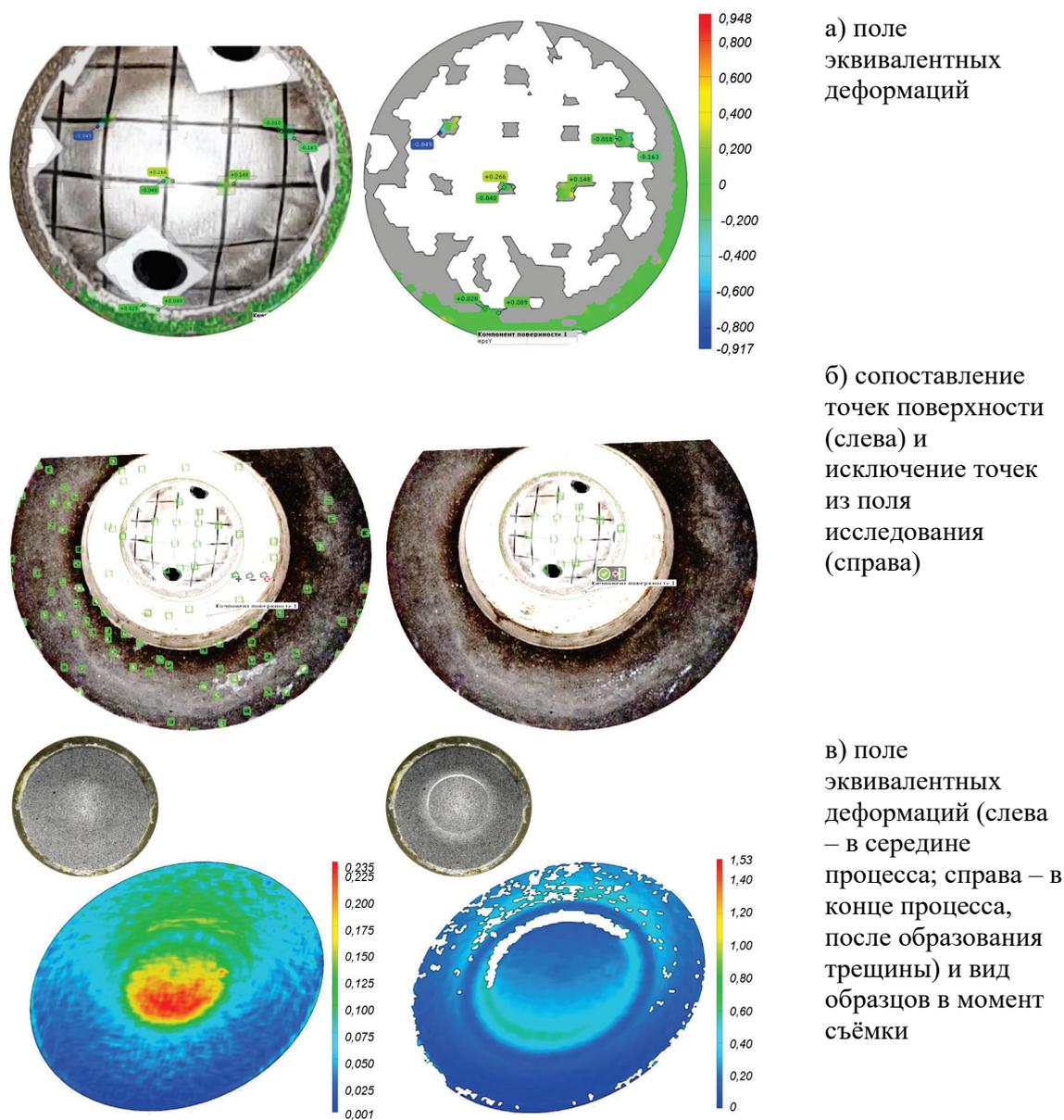


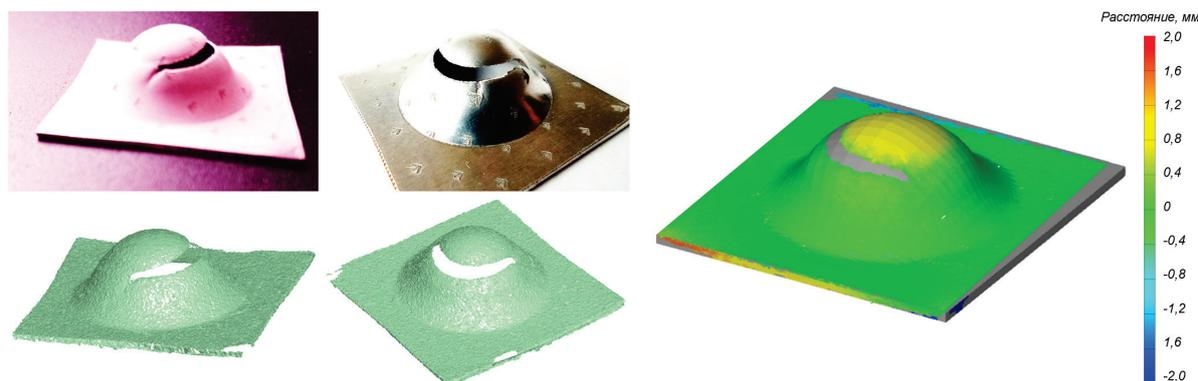
Рисунок 8 – Подготовка и распознавание поверхности по совмещённому методу КЦИ и спекл-интерферометрии

5. Оценка деформации по результатам 3D-сканирования

После проведения экспериментов образцы подвергались оптическому 3D-сканированию при помощи 3D-сканера RangeVision Neopoint, работающего по принципу инфракрасного (ИК) структурированного подсвета, реализуемого на лазерных диодах, гарантирующего точность измерений до 50 мкм. Перед проведение сканирования на образцы наносится матирующий спрей, позволяющий создать равномерный коэффициент отражения по всей поверхности объекта. Сканирование проводилось в режиме сканирования на поворотном столе с шагом угла поворота 30°, что позволило создать 12 сканов, на основании которых была подготовлена полигональная stl-модель. Среднее значение ошибки на этапе сшивки сканов составило 51 мкм.

На рисунке 9а показана stl-модель одного из образцов, представленная с разных ракурсов. Сравнивая модели после численного моделирования и 3D-сканирования в программе GOM-Correlate можно отметить, что максимальное отклонение наблюдается в купольной части образца и составляет $\Delta = +0,85$ мм (рисунок 9б). В связи с этим можно внести корректировку

перемещения пуансона, при котором производилась выгрузка результатов моделирования, т.е. $10,74 \text{ мм} + 0,85 \text{ мм} = 11,59 \text{ мм}$ (согласно рисунку 3).



а) сравнение образца после испытаний (верхний ряд) с его виртуальной геометрической копией (нижний ряд)

б) поле отклонений размеров двух полигональных моделей

Рисунок 9 – Результаты сравнения полигональных моделей

С другой стороны, возможно прийти к этой величине и через численное моделирование, т.е. снизить величину отклонения (Δ) за счёт определения постоянного шага по времени, что увеличит время расчётов, но помимо получения более точного значения высоты ещё и более точно позволит определить само значение предельной деформации. Серым цветом показаны области, которые частично исключены из рассмотрения. Они показывают, что размеры исходной заготовки, использованной для численного моделирования, были несколько больше, чем размеры экспериментального образца. Это было обусловлено необходимостью получения дополнительной информации о НДС под прижимом. В эксперименте прижим контактировал не всегда по всей площади контактной поверхности, что приводило к утягиванию части заготовки в область пластической деформации.

6. Заключение

Применение бесконтактных способов значительно упростит оценку величины деформации при изготовлении сложных деталей методами обработки давлением. На сегодняшний день они являются результатами апробации новой технологии и методики, согласно которым их можно применять для случаев лабораторного исследования механических свойств, так как требуется подготовка поверхности образца, наличие откалиброванной системы и специализированное программное обеспечение. Применять их для контроля деформации сложных листовых деталей крайне затруднительно.

Наиболее разумным является совместное использование инструментов компьютерного моделирования и последующего проведения механических испытаний с применением, например, КЦИ.

Поставленные в исследовании задачи по проведению испытаний по Эриксену для листовой заготовки из алюминиевого сплава АМг2, с последующим численным моделированием процесса и спекл-КЦИ метода оценки деформации по результатам видеофиксации протекания эксперимента, были выполнены и показали, что для численного моделирования требуется информация о коэффициентах, входящих в расчётные модели течения и разрушения материала, а для спекл-КЦИ требуется подготовка образцов. Дополнительное применение оптического 3D-сканирования позволит ввести контрольную информацию о результирующей геометрии образца после проведения испытаний.

7. СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.

- [2] Effect of ductile damage evolution in sheet metal forming: experimental and numerical investigations / F. Abbassi, O. Pantale, S. Mistou, A. Zghal, R. Rakotomalala // *Key Engineering Materials*. 2010. № 446. С. 157–169. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.446.157.
- [3] Kraft- und Deformationscharakteristika beim Umformen eines Stahlblech-Verbundwerkstoffs / M. Petrov, S. Guk, J. Bast, P. Petrov // *Lightweight Design*. 2012. №5. С. 50–57. DOI: 10.1365/s35725-012-0023-5.
- [4] Определение области максимальных сдвиговых деформаций для образцов углепластика по методу Иосипеску, с использованием оптической системы измерений / А.В. Ильичев, А.М. Губин, А.Р. Акмеев, Н.В. Иванов // *Труды «ВИАМ»*. 2018. №6. С. 99–109. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-99-109.
- [5] Струнгарь Е.М., Лобанов Д.С. Развитие метода корреляции цифровых изображений применительно к механическим испытаниям при повышенных температурах // *Вестник ПНИПУ*. 2022. №3. С. 147–159. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.15.
- [6] Третьякова Т.В. Оценка влияния сложного напряженно-деформированного состояния на проявление эффекта Портевена-Ле Шателье в Al-Mg сплаве // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. 2021. Т. 2.С. 206–209.
- [7] Numerical and Experimental Investigation of Deep Drawing of Sandwich Panels / S. Tipalin, M. Petrov, B. Saprikin [и др.] // *Key Engineering Materials*. 2014. Vols. 611-612, С. 1627–1636. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1627.
- [8] Agha A., Abu-Farha F. A Method for Measuring In-Plane Forming Limit Curves (FLC) using 2D Digital Image Correlation // *SAE MobilityRxiv™ Preprint*. 2023. URL: <https://mobilityrxiv.sae.org/preprint/a-method-for-measuring-in-plane-forming-limit-curves-flc-using-2d-digital-image-correlation--sae-pp-00322> (дата обращения 03.08.2023). DOI: 10.47953/SAE-PP-00322.
- [9] Besnard G., Hild F., Roux S. “Finite-element” displacement fields analysis from digital images: Application to Portevin-Le Châtelier // *Experimental Mechanics*. 2006. №46(6), С. 789–803. DOI: 10.1007/s11340-006-9824-8.
- [10] In situ определение непрерывной эволюции в пространстве и во времени деформационных полей на стальной пластине с концентратором напряжений / В.А. Власов, А.С. Пляскин, А.А. Клопотов [и др.] // *Современные строительные материалы и технологии : Сборник научных статей III Международной конференции, Калининград, 26–29 мая 2020 года / Под редакцией М.А. Дмитриевой. Том Выпуск 3. – Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2021. – С. 164-172.*
- [11] Кибиткин В.В., Солодушкин А.И. Увеличение площади контроля при измерении деформации твердого тела методом корреляции цифровых изображений // *Известия вузов. Физика*. 2021. № 64. С. 32–37. DOI: 10.17223/00213411/64/4/32.
- [12] Stebunov S., Vlasov A., Biba N. Prediction of the fracture in cold forging with modified Cockcroft-Latham criterion // *Procedia Manufacturing*. 2018. № 15. С. 519–526. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.264.
- [13] Lou Y., Yoon J.W., Huh H. Modeling of shear ductile fracture considering a changeable cut-off value for stress triaxiality // *International Journal of Plasticity*. 2014. № 54. С. 56–80. DOI: 10.1016/j.ijplas.2013.08.006.
- [14] URL: <https://www.sandia.gov/ccr/software/digital-image-correlation-engine-dice/> (дата обращения 03.08.2023).