

# Оценка деформации листового материала с применением бесконтактных способов на примере испытания выдавливания алюминиевой заготовки по методу Эриксона

М.А. Петров<sup>1,А</sup>, Д.А. Ромашов<sup>2,А</sup>, В.В. Исаков<sup>3,В</sup>

<sup>А</sup> ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»

<sup>В</sup> ГНЦ ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-2324-5057, [petrovma\\_mospolytech@mail.ru](mailto:petrovma_mospolytech@mail.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0009-0006-3210-464X, [dimaromashov393@gmail.com](mailto:dimaromashov393@gmail.com)

<sup>3</sup> ORCID: 0009-0001-4955-4835, [vvisakov@ciam.ru](mailto:vvisakov@ciam.ru)

## 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 разрушения 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, листовая штамповка, ИИ, МКЭ, КЦИ, QForm, 3D-сканирование.

## 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, поляризационно-оптический и за счёт измерения твёрдости. Эти методы разделяются на две большие группы: контактные, т.е. такие методы, в которых деформация вычисляется либо измерением перемещения точки с помощью мерительных инструментов, либо требует специальных датчиков (например, тензорезисторов), и на бесконтактные, т.е. такие методы, в которых деформация вычисляется на основе полученной оптической информации.

Измерение деформаций в ходе процесса листовой обработки, например, вытяжки, в каждой точке деформируемого материала, является сложным процессом. Металлический лист подвергается не только деформации в плоскости листа, но и по толщине, в результате утонения и утолщения. На рис. 1 показаны серийно изготавливаемые листовые детали-представители.

С появлением компьютерных методов моделирования процессов обработки давлением листовых материалов проводить оценку их 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. На основании получаемых результатов выполняется построение формообразующей поверхности инструмента, который на сегодняшний день может проектироваться как традиционными подходами, так и за счёт решения задачи по оптимизации неформообразующей поверхности, например, алгоритмами топологической оптимизации, которые помогают снизить массу инструмента с сохранением его жёсткости [4-8].

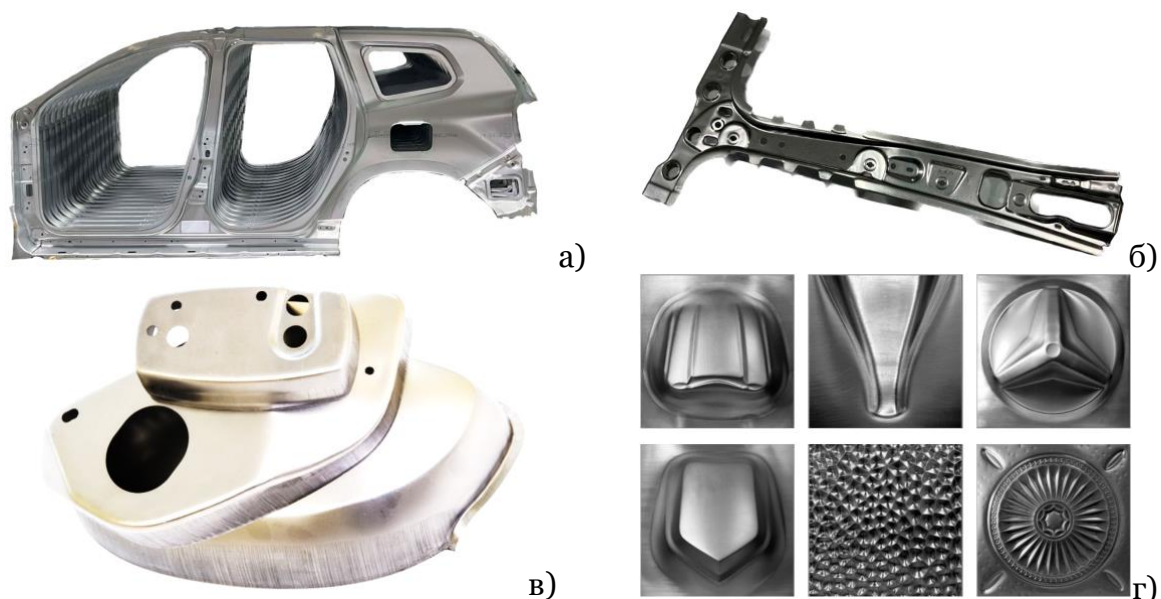


Рис. 1. Примеры металлических листовых деталей: боковина автомобильного кузова (а) и боковая стойка автомобиля (б) [1], корпусная деталь (в) [2] и детали специального назначения (г) [3]

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. В работах можно встретить применение бесконтактных систем оценки деформации: для сбора данных о поведении материала для последующего точного компьютерного моделирования разрушения листового материала при разных условиях нагружения (одноосное растяжение, испытание на выпучивание по стандарту ISO 16808:2022) [9]; для определения деформации сэндвич-структуры на основе стального листа и стекловолокна [10]; для измерения деформации образцов из углепластика по ГОСТ Р 56799–2015 [11]; для уточнения макроскопической локализации неравномерного пластического течения в результате действия эффекта Портевена-Ле Шателье алюминиевых образцов при разных НДС [12, 13]; для получения информации о кривой предельного формоизменения по методу Марчиньяка, согласно стандарту ISO-12004-2-2021 [14]; для определения критических значений деформации при одноосном растяжении стальных образцов, имеющих концентраторы напряжений [15], для определения поля деформаций при испытании композиционных материалов на основе стеклотекстолита и углепластика по схеме одноосного растяжения [16]. Основываясь на алгоритмах бесконтактной оценки деформации может быть разработана система для определения микро- и макроархитектоники поверхности на основе фотографий поверхности сварного образца из нержавеющей стали, подвергнутого усталостным

испытаниям [17]. Применение бесконтактных систем скрывает ряд особенностей, например, в том случае, если геометрия изделия сложна, а материал образца неоднороден, материал представляет собой сэндвич структуру, т.е. сочетание металлического листа и полимерного клеевого соединения, например, кожух вентилятора двигателя [18]. При деформировании такого материала может появиться ошибка измерений вследствие неоднородности распределения температур по толщине материала из-за различных теплофизических значений свойств материалов, а предельная деформация слоёв и их последующая деламация могут остаться незамеченными.

## 2. Теоретическое определение деформации

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 равна нулю, уравнение (2) [19]. 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.

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

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

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho + \sigma_\theta + \sigma_z &= 0 \\ \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} &= \frac{\varepsilon_\rho - \varepsilon_z}{\varepsilon_\theta - \varepsilon_z} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} =$$

$$= -\frac{\varepsilon_\theta + 2\varepsilon_z}{\varepsilon_\theta - \varepsilon_z} = \left( \begin{array}{l} \sigma_\rho \\ \sigma_\theta \end{array} = a \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \varepsilon_z = -\frac{1+a}{2-a} \varepsilon_\theta, \quad (3)$$

где  $\dim_o$  и  $\dim$  – исходный и конечный размеры 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.

## 3. Применение искусственного интеллекта в разработке технологического процесса

Учитывая сложившиеся мировые тенденции проведения механических испытаний и техники измерения всё больше работ направлено на бесконтактные способы оценки деформации и подключение алгоритмов искусственного интеллекта. При этом различают несколько уровней: нейронные сети (НС), глубокое обучение (ГО), машинное обучение (МО) и искусственный интеллект (ИИ), в узком и широком смысле. Согласно современной терминологии каждый уровень включает в себя предыдущий, причём самым высоким уровнем является искусственный интеллект, а самым низким или базовым – нейронная сеть [20]. На этапе ГО происходит обучение машины за счёт поиска наилучшего алгоритма, без помощи человека. На этапе МО машина активно использует всевозможные существующие базы данных (БД), а на этапе ИИ решение создаётся в полной мере без участия человека, самой машиной.

Вполне возможно предположить, что применение ИИ в проектировании технологических процессов возможно и ожидаемо, так как накоплен большой практический опыт, который может использоваться в МО, разработаны алгоритмы НС, среди которых свёрточная НС (convolutional NN), глубокая сеть доверия (deep trust NN), генеративно-сопоставительная сеть (generative adversarial NN), рекуррентная НС (recurrent NN), машина Больцмана или стохастическая НС (Boltzmann machine или stochastic recurrent NN) и другие.

Алгоритм имплементации блока ИИ может выглядеть следующим образом (Рис. 2). Сначала осуществляется ввод данных оператором (ВДО), релевантный для технологического процесса набор данных, образующий группу данных. Сюда входят данные, описывающие физические, механические и эксплуатационные свойства обрабатываемых материалов, данные технологического оборудования, исходная CAD-геометрия объекта обработки и т.д. На основании этих данных независимо, параллельно проводится КЭ-моделирование и эксперимент до момента получения вариантов результатов. В случае КЭ-моделирования вариантов может быть несколько. В случае экспериментов вариантов результатов тоже может быть несколько, но в отличие от КЭ-моделирования это обусловлено чистотой проведения экспериментов, а не набором данных. После этого проводится сравнение решений (шаг валидации) и сопоставление с числом ( $\Delta$ ), характеризующим адекватность компьютерной модели или точность решения при помощи компьютерного моделирования.

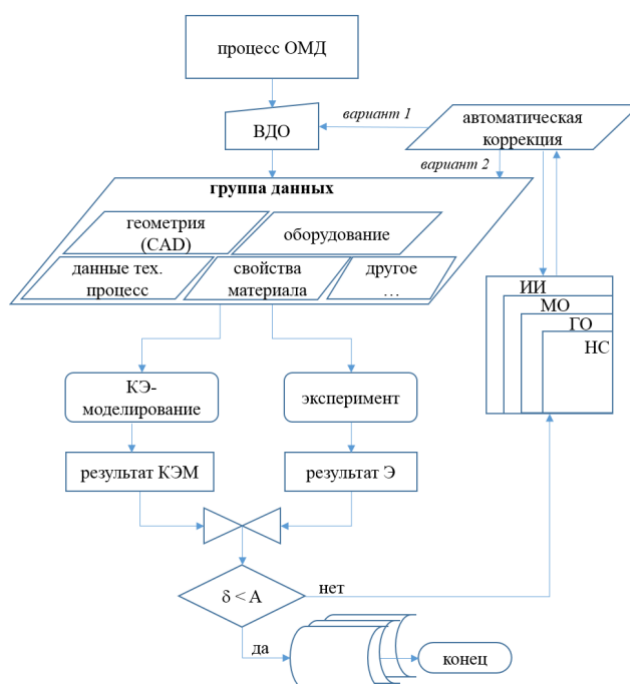


Рис. 2. Алгоритм разработки цифрового двойника технологического процесса

В случае существенного отклонения решения от результатов натурного эксперимента подключается алгоритм ИИ, который делает попытку выяснить причину несоответствия и предлагает варианты ручной (вариант 1) или автоматической (вариант 2) коррекции значений в группе данных, как для экспериментов, так и для компьютерного моделирования. Процедура продолжается до тех пор, пока не получится решение, соответствующее выбранному критерию адекватности. Реализация подобного алгоритма невозможна без своевременного сбора и обработки информации на разных производственных этапах. В работе [21] показано, что технологии оптического 3D-сканирования болтов возможно внедрить в производственную линию, однако скорость подготовки и анализа 3D-модели ставит под сомнение процедуру

полного контроля продукции, так как современное оборудование обладает более высоким темпом штамповки.

Существующий бесконтактный экспериментальный метод оценки деформации или метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) позволяет в реальном времени распознавать изменение положения точек деформируемого образца. На этапе расчёта деформаций согласно этому методу применяют один из четырёх алгоритмов: функция формы подмножества (subset shape function, вычисление деформаций из функции формы подмножества и деформированной формы подмножества, при этом размер виртуального тензорезистора (virtual strain gauge или VSG) соответствует размеру подмножества; функция конечно-элементной формы (finite-element shape function, вычисляет деформацию на основе триангуляции, для которой узлами конечно-элементной сетки являются характерные тёмные или светлые области паттерна, нанесённого на образец); функция деформации формы (strain shape function, локальная подгонка полиномиальной или сплайн функции деформации формы к перемещениям с целью получения аналитического уравнения поля перемещений, после чего вычисляются деформации на основе пространственных производных получившегося аналитического уравнения); аппроксимация сплайном (spline fit, глобальная подгонка сплайном поля перемещений) [22].

В работе [23] показано, что КЦИ может быть применена к рассматриваемому в статье эксперименту на выдавливание по методу Эриксона. Однако, следует подчеркнуть тот факт, что оценка проводится по наружной поверхности образца, что не даёт представление о поведении материала внутри. С этой целью применяется компьютерное моделирование (симуляция), которое даёт полную картину технологического процесса. Однако, опираясь на теоретические зависимости описания деформации, например, определение деформации по Грину-Лагранжу, уравнение (4), можно прийти к уравнению (5), которое связывает деформацию и толщину материала, подробно рассмотрено в работах [24] и [25].

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\lambda^2 - 1), \quad (4)$$

$$t_f = t_i \left( \frac{1}{\sqrt{(1 + 2\varepsilon_1)(1 + 2\varepsilon_2)}} \right), \quad (5)$$

где  $\lambda$  – отношение конечной длины образца к начальной;  $t_f$  и  $t_i$  – конечная и начальная толщина заготовки, соответственно;  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – максимальное и минимальное главные напряжения, соответственно.

В технике КЦИ применяют алгоритмы глубокого обучения и нейронных сетей. В статье [26] рассмотрено применение свёртываемой НС. Показано, что обучение НС должно проводиться на более качественных наборах спекл-шаблонов.

Ещё одним современным бесконтактным методом оценки деформации является 4D-томография. Сущность метода заключается в непрерывном процессе томографирования образца, подвергнутого пластической деформации. В работе [27] изучалось влияние включений в виде стронция на характер разрушения листовых горячекатаных образцов из алюминиевого сплава при одноосном растяжении, определялись графики сопротивления деформации. В большинстве случаев было установлено вязкое разрушение образцов, свидетельствующее о высоких пластических свойствах изучаемого материала. В работе [28] результаты, полученные 4D-томографией, были подтверждены при помощи методики КЦИ.

## 4. Цели и задачи исследования

Целью данного исследования является объективная оценка возможностей доступных в лаборатории университета современных бесконтактных инструментов

контроля деформации и их адекватность. Задачей исследования является оценка деформации алюминиевой листовой заготовки при её выдавливании по методу Эриксона, при этом используются следующие методики:

- экспериментальная оценка выдавливания на специализированном оборудовании;
- компьютерное моделирование процесса выдавливания с применением нескольких моделей исчерпания запаса пластичности;
- сопоставление изображений или корреляция цифровых изображений;
- оптическое трёхмерное сканирование на основе инфракрасного или оптического структурированного подсвета.

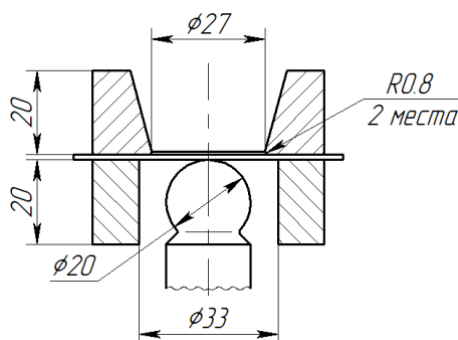
Применение нескольких методик оценки обусловлено тем, что при обработке материалов давлением деформация может относиться как к внешней и внутренней поверхности объекта, так и к внутренней области. Дело в том, что пластическое формоизменение листовой заготовки приводит к появлению разнотолщинности материала, что является результатом анизотропии свойств в материале, вызванной включениями, фазовым составом, дефектами, типа микропор и микротрещин, а также упрочнением в процессе деформирования. В силу этих обстоятельств оценка деформации носила бы только декларативный характер, если из рассмотрения было исключено компьютерное моделирование.

Применение комплекса исследований является более бюджетной альтернативой наиболее дорогостоящей 4D-томографии, так как помимо оборудования для её реализации требуется мощная рабочая станция со специализированным программным обеспечением.

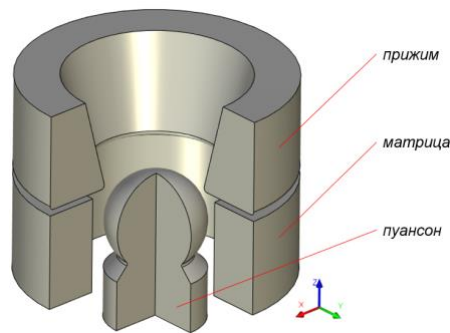
Применение КЦИ совместно с компьютерным моделированием позволит повысить точность определения деформации на криволинейных участках поверхности. Дополнение такой методики элементами искусственного интеллекта (рис. 2) позволит ускорить поиск наилучшего сочетания параметров. Реализуя данный подход фактически реализуется третий этап разработки цифрового двойника [29], на котором происходит выстраивание двухсторонних связей между реальным и виртуальным объектом, в роли которого выступает не готовое изделие, а технологический процесс.

## 5. Экспериментальные исследования

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 Эриксону. 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 рис. 3.







б) 3D-модель, вырез 1/4

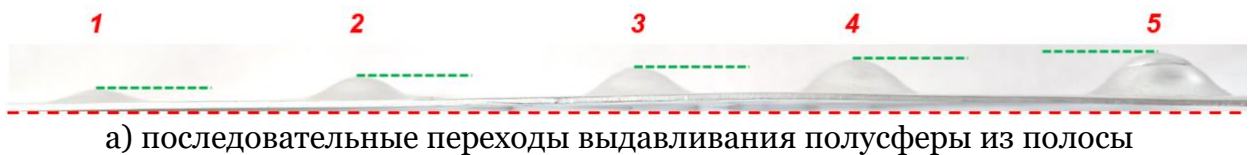
Рис. 3. Чертёж инструмента с заготовкой (а) и его трёхмерная модель без заготовки (б)

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 методов оценки деформации.

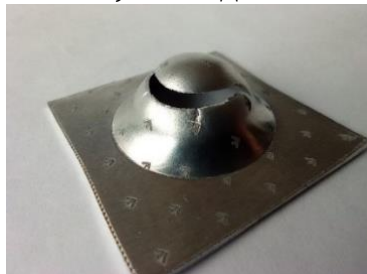
На рис. 4 представлено поэтапное формирование полусферы и итоговый образец с диаметральным сечением.

## 6. Оценка деформации по результатам численного моделирования

Компьютерное моделирование (симуляция) процесса выдавливания по Эриксену реализовано в программе QForm. В табл. 1 показаны задаваемые параметры процесса.



а) последовательные переходы выдавливания полусферы из полосы



б) образец после испытаний



в) диаметральный разрез образца после испытаний

Рис. 4. Образцы после испытаний

Задача моделировалась в трёхмерной постановке. В табл. 2 показаны задаваемые свойства материала.

Табл. 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

Табл. 2. Физико-механические свойства

Параметр	Ед. изм.	Значение
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	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

Для описания характера течения материала использовалась кривая текучести или сопротивления деформации, отражающая упрочнение материала на этапе пластической деформации, описываемое уравнением (6), которое совпадает с четырёх коэффициентной формой уравнения Хензеля-Шпиттеля при  $m_1 = m_3 = m_4 = 0$ , уравнение (7).

$$\sigma = k \varepsilon^n, \quad (6)$$

$$\sigma = k e^{-m_1 T} \varepsilon^{m_2} e^{-m_4 \dot{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}^{m_3}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – напряжение сопротивления деформации;  $\varepsilon$  – 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) [30]. В табл. 3 показаны значения коэффициентов уравнений моделей, использованных в расчётах.

Табл. 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 (рис. 5).

На рис. 6 показаны диаграмма предельного формоизменения и области разрушения материала при использовании модели FLD.



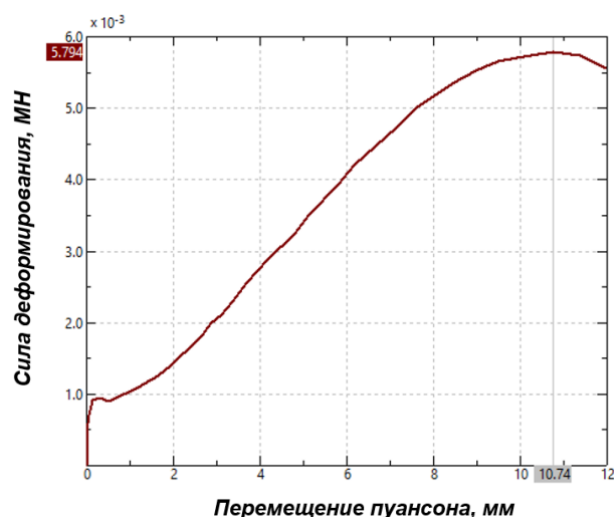
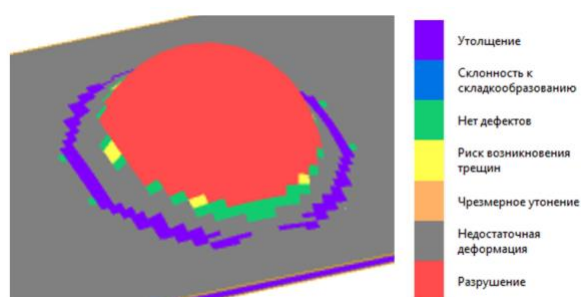
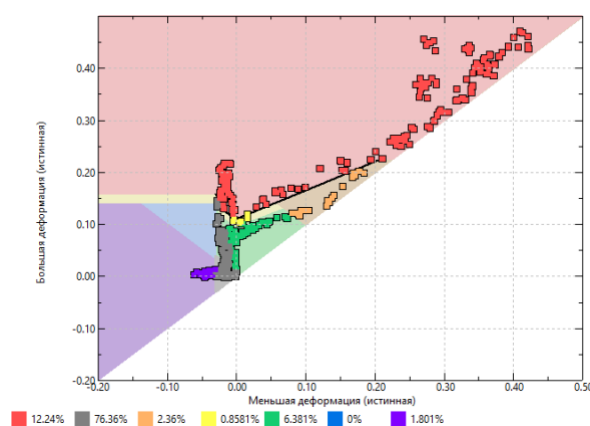


Рис. 5. Машинная диаграмма процесса выдавливания по Эриксену



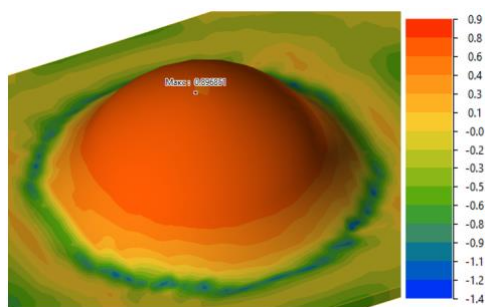
а) области разрушения



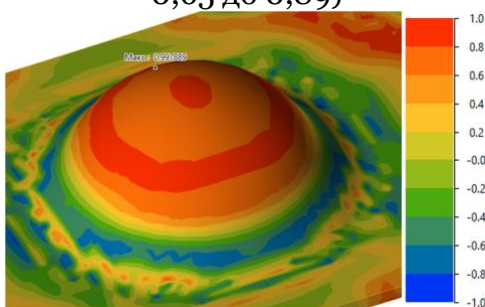
б) диаграмма FLD

Рис. 6. Результаты численного моделирования разрушения материала

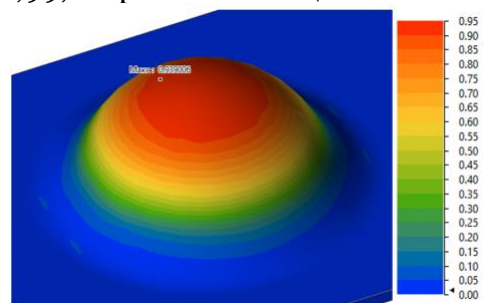
Поля значений эффективных деформаций и области разрушения показаны на рис. 7. По модели, описываемой диаграммой предельного формоизменения, видно, что разрушение наступает в купольной части, при этом указать чётко выраженного места-инициатора разрушения нельзя. При перемещении пуансона, равному 11 мм, разрушение распространяется по всей купольной области. По модели Кокрофта-Лэфема-О можно выделить кольцообразный участок, располагающийся ниже гребня купола, в котором развиваются максимальные напряжения.



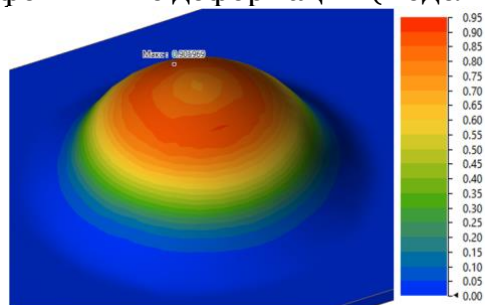
а) триаксиальность напряжений ( $\eta_{\text{макс}} = 0,89$ , в красной купольной области меняется от 0,65 до 0,89)



б) параметр Лоде ( $L_{\text{макс}} = 0,99$ , в красной кольцевой области меняется от 0,8 до 0,99)



в) эффективные деформации (модель FLD)



г) эффективные деформации (модель К-Л-О)

Рис. 7. Результаты численного моделирования разрушения материала

Уровень триаксиальности напряжений, определяемый по уравнению (8) и отражающий отношение гидростатического давления к эквивалентному напряжению (является функцией первого и второго инвариантов), и параметр Лоде, определяемый по уравнению (9) и являющийся функцией второго и третьего инвариантов, указывают на соответствие схемы двухосному растяжению.

На рис. 8 представлена диаграмма связи параметра Лоде (через углы Лоде) и триаксиальность напряжения в зависимости от напряжённо-деформированного состояния материала (НДС).

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\bar{\sigma}}, \quad (8)$$

$$L = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \sqrt{3} \operatorname{tg} \theta, \quad (9)$$

где  $\bar{\sigma}$  – эффективное напряжение по Мизесу;  $\sigma_m$  – среднее или гидростатическое напряжение;  $\theta$  – угол Лоде.

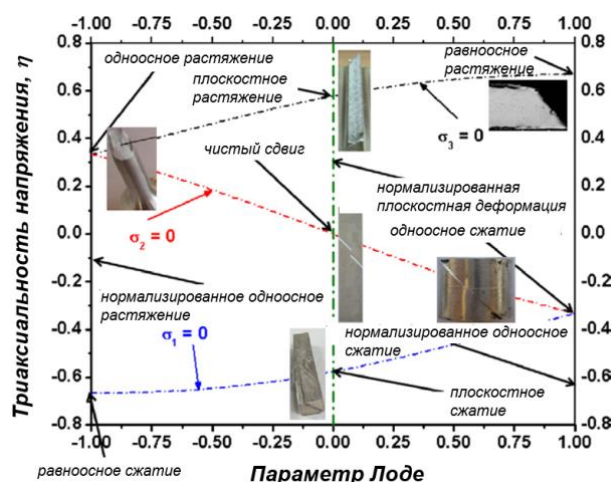


Рис. 8. Взаимосвязь параметра Лоде и триаксиальности [31]

## 7. 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 [32], позволяющих обрабатывать растровую информацию и определять значения деформации объекта во времени. 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 аспектом 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 рис. 9 показаны варианты подготовки образцов, имеющие бликующую (слева) и небликующую (справа) поверхности. Для реализации КЦИ

достаточно создать некий шаблон или паттерн, т.е. рисунок с повторяющимися элементами.



Рис. 9. Рисунки на поверхности образцов, полученные нанесением чёрной 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 рис. 10 в верхнем ряду показаны некоторые образцы подготовленного на компьютере шаблона или паттерна, а в нижнем ряду – образцы с нанесённым паттерном.

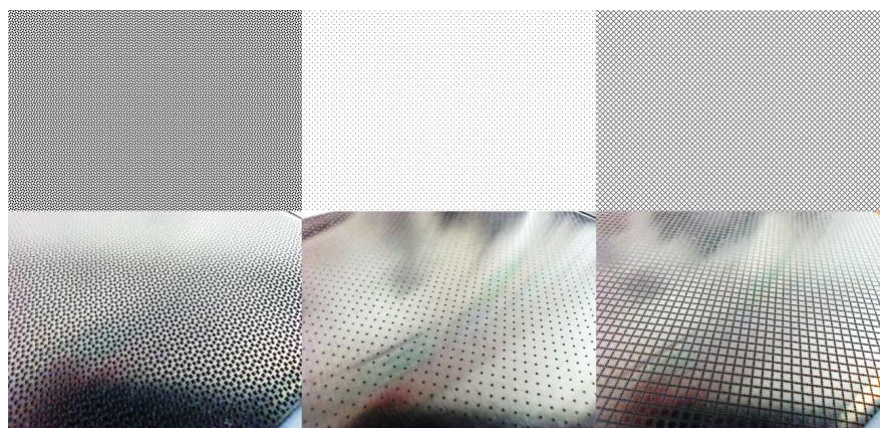
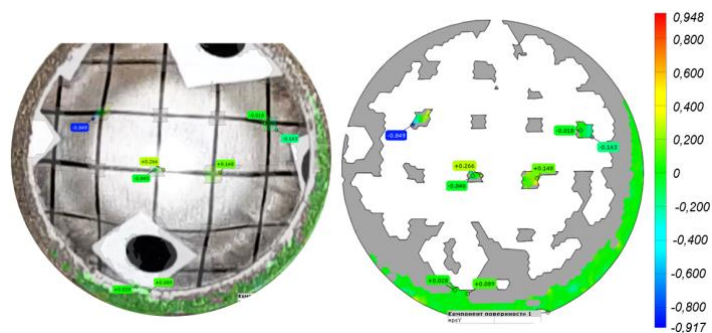


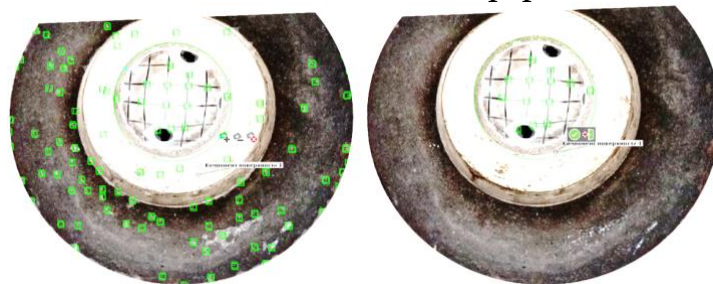
Рис. 10. Паттерны на заготовках, полученные лазерной гравировкой

При проведении испытаний проводится непрерывная видеосъёмка в режиме FullHD (разрешение 1980 x 1080 и выше). После получения видеозаписи осуществляется её раскадровка с сохранением, например, каждого 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 (рис. 11). Используется бикубическая интерполяция субпикселей. В случае недостаточного количества информации программа показывает смещение лишь отдельных точек (рис. 11а). Также возможно дополнительно проводить сопоставление точек поверхности, вводить реперные точки для совмещения, исключать избыточные точки из области анализа изображения (рис. 11б).

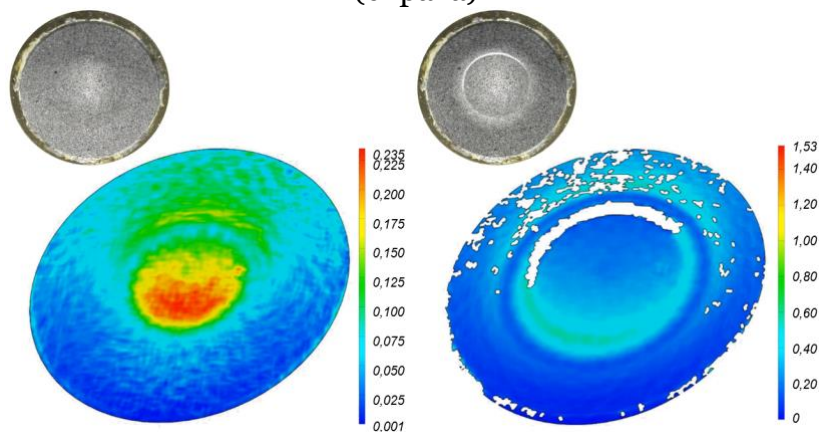




а) поле эквивалентных деформаций



б) сопоставление точек поверхности (слева) и исключение точек из поля исследования (справа)



в) поле эквивалентных деформаций (слева – в середине процесса; справа – в конце процесса, после образования трещины) и вид образцов в момент съёмки

Рис. 11. Подготовка и распознавание поверхности по совмещённому методу КЦИ и спекл-интерферометрии

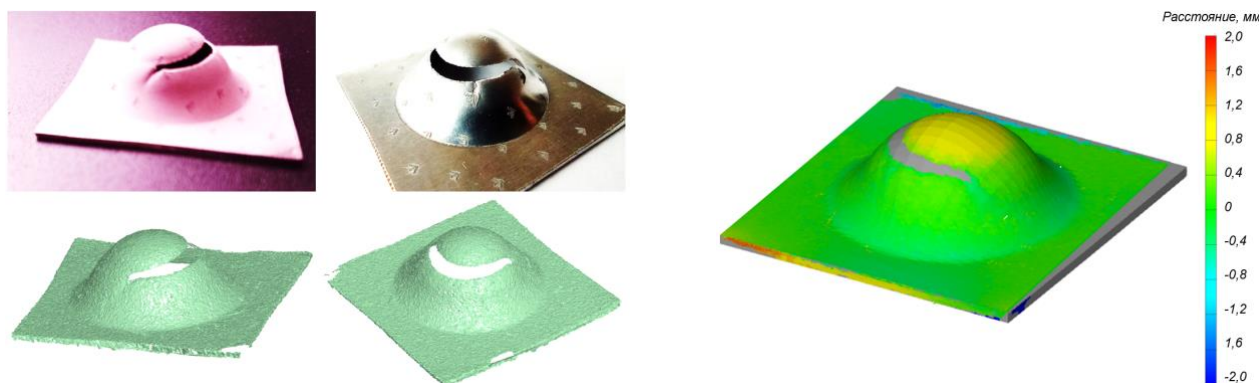
В случае успешного распознавания, на поверхность интересующей области картинки наносится цветовая схема или цветовая карта смещений/деформаций отдельных точек (рис. 11в).

## 8. 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 проведением 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  $30^\circ$ , что позволяет создать 12 сканов, на основании которых реконструируется

полигональная stl-модель. Среднее значение ошибки на этапе сшивки сканов составило 51 мкм.

На рис. 12а 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 (рис. 12б). В связи с этим можно внести корректировку перемещения пуансона, при котором производилась выгрузка результатов, т.е.  $10,74 \text{ мм} + 0,85 \text{ мм} = 11,59 \text{ мм}$  (согласно рис. 5).



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

б) поле отклонений размеров двух полигональных моделей

Рис. 12. Результаты сравнения полигональных моделей

С другой стороны, возможно прийти к этой величине и через численное моделирование, т.е. снизить величину отклонения ( $\Delta$ ) 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.

## 9. Заключение

Применение экспериментальных бесконтактных способов оценки деформации значительно упростит саму процедуру оценки величины деформации при изготовлении сложных листовых деталей методами обработки давлением. На сегодняшний день подобные способы 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 в процессе реализации технологического процесса крайне затруднительно.

На сегодняшний день 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 успешно 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. Обобщённые результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования могут быть использованы для создания ИИ, направленного на разработку цифрового двойника технологического процесса.

## Список литературы

- [1] <https://aat.moscow/avtomobilnaja-promyshlennost/> (дата обращения 17.10.2023).
- [2] <http://www.stamping.by/industry/shtampovannye-izdeliya-iz-metalla> (дата обращения 20.10.2023).
- [3] <https://3dprintingcenter.net/desktop-metal-introduces-figur-g15-a-new-technology-for-digital-sheet-metal-forming-which-has-nothing-to-do-with-3d-printing/> (дата обращения 20.10.2023).
- [4] Xu, D., Chen, J., Tang, Y., & Cao, J. (2012). Topology optimization of die weight reduction for high-strength sheet metal stamping. *International Journal of Mechanical Sciences*, 59(1), 73–82. doi:10.1016/j.ijmecsci.2012.03.006
- [5] <https://www.youtube.com/watch?v=J-SPyER7tFs> (дата обращения 20.10.2023).
- [6] Azamirad, G., & Arezoo, B. (2016). Topology optimization of stamping die components using evolutionary structural optimization method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(4), 690–698. doi:10.1177/0954405415597630
- [7] Su, T. C., He, T., Yang, R., & Li, M. (2021). Topology optimization and lightweight design of stamping dies for forming automobile panels. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-791304/v1>
- [8] Петров М.А., Уржумов П.Н., Компьютерное моделирование процесса горячей объёмной штамповки поковки «крышка» и топологическая оптимизация штампа, *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*, 2022, Том 9, №2, стр. 3–9.
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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.
- [13] 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

[14] 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

[15] 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.

[16] 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

[17] 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

[18] Numerical and Experimental Investigation of Deep Drawing of Sandwich Panels / S. Tipalin, M. Petrov, B. Saprikin, N. Kosatchyov, N. Shpunkin, P. Petrov // Key Engineering Materials. 2014. Vols. 611-612, С. 1627–1636. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1627

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

[20] Книга по ИИ

[21] Петров М.А., Эльдиб И.С.А., Разработка алгоритма летучего контроля геометрических и технологических параметров на примере холодной объёмной штамповки заготовки болта, Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, №4, 2020, стр. 39 – 48

[22] [https://idics.org/guide/DICGoodPracticesGuide\\_ElectronicVersion-V5g-181022.pdf](https://idics.org/guide/DICGoodPracticesGuide_ElectronicVersion-V5g-181022.pdf) (дата обращения 20.10.2023).

[23] M. Aydin, X. Wub, K. Cetinkaya, M. Yasar, I. Kadi, Application of Digital Image Correlation technique to Erichsen Cupping Test, Engineering Science and Technology, an International Journal, 2018, Vol. 21, С. 760–768.

[24] Van Mieghem, B., Ivens, J., & Van Bael, A. (2016). Consistency of Strain Fields and Thickness Distributions in Thermoforming Experiments Through Stereo DIC. Experimental Techniques, 40(5), 1409–1420. doi:10.1007/s40799-016-0143-4

[25] Gonzalez, M. M., Lutes, N. A., Fischer, J. D., Woodside, M. R., Bristow, D. A., & Landers, R. G. (2019). Analysis of geometric accuracy and thickness reduction in multistage incremental sheet forming using digital image correlation. Procedia Manufacturing, 34, 950–960. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.105>

[26] Boukhtache, S., Abdelouahab, K., Berry, F., Blaysat, B., Grédiac, M., & Sur, F. (2021). When Deep Learning Meets Digital Image Correlation. Optics and Lasers in Engineering, 136, 106308. doi:10.1016/j.optlaseng.2020.106308

[27] Samei, J., Sadeghi, A., Mortezaipoor, H., Salavati, S., Amirmaleki, M., Pekguleryuz, M., & Wilkinson, D. S. (2020). 4D X-ray tomography characterization of void nucleation and growth during deformation of strontium-added AZ31 alloys. Materials Science and Engineering: A, 797, 140081. doi:10.1016/j.msea.2020.140081

[28] Nazari-Onlaghi, S., Sadeghi, A., Karimpour, M., & Pekguleryuz, M. (2021). Fracture micro-mechanisms in hot-rolled AZ31 and AZ31-Sr magnesium alloys. Materials Science and Engineering: A, 812, 141107. doi:10.1016/j.msea.2021.141107

[29] Kitain L. The New Age of Manufacturing: Digital Twin Technology & IIoT, The New Age of Manufacturing, 2018, <http://www.innovation4.cn/library/r46394> (дата обращения 20.10.2023).

[30] 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

[31] 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

[32] <https://www.sandia.gov/ccr/software/digital-image-correlation-engine-dice/> (дата обращения 20.10.2023).

# Estimation of Sheet Deformation of Aluminium Blank using Non-Contact Methods on the Example of Erichsen Cupping Test

M.A. Petrov<sup>1,A</sup>, D.A. Romashov<sup>2,A</sup>, V.V. Isakov<sup>3,B</sup>

<sup>A</sup> FSAEI HE «Moscow Polytechnic University»

<sup>B</sup> Central Institute of Aviation Motors

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-2324-5057, [petrovma\\_mospolytech@mail.ru](mailto:petrovma_mospolytech@mail.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0009-0006-3210-464X, [dimaromashov393@gmail.com](mailto:dimaromashov393@gmail.com)

<sup>3</sup> ORCID: 0009-0001-4955-4835, [vvisakov@ciam.ru](mailto:vvisakov@ciam.ru)

## **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 preparing the blank prior the experimental stage. 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 specimen, which requires performing an additional numerical simulation.

**Keywords:** AA5051, sheet forming, AI, FEM, DIC, QForm, 3D-scanning.

## **References**

- [1] <https://aat.moscow/avtomobilnaja-promyshlennost/> (date of last access 17.10.2023).
- [2] <http://www.stamping.by/industry/shtampovannye-izdeliya-iz-metalla> (date of last access 20.10.2023).
- [3] <https://3dprintingcenter.net/desktop-metal-introduces-figur-g15-a-new-technology-for-digital-sheet-metal-forming-which-has-nothing-to-do-with-3d-printing/> (date of last access 20.10.2023).
- [4] Xu, D., Chen, J., Tang, Y., & Cao, J. (2012). Topology optimization of die weight reduction for high-strength sheet metal stamping. *International Journal of Mechanical Sciences*, 59(1), 73–82. doi:10.1016/j.ijmecsci.2012.03.006
- [5] <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=J-SPyER7tFs> (date of last access 20.10.2023).
- [6] Azamirad, G., & Arezoo, B. (2016). Topology optimization of stamping die components using evolutionary structural optimization method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(4), 690–698. doi:10.1177/0954405415597630
- [7] Su, T. C., He, T., Yang, R., & Li, M. (2021). Topology optimization and lightweight design of stamping dies for forming automobile panels. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-791304/v1>
- [8] Petrov M.A., Urzhumov P.N., Numerical Simulation of the Hot Bulk Forming Process of the “CAP” Like Forming with Topology Optimization of the Tool Set, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2022, Vol. 9(2), pp. 3–9.

- [9] 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. C. 157–169. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.446.157
- [10] Kraft- und Deformationscharakteristika beim Umformen eines Stahlblech-Verbundwerkstoffs / M. Petrov, S. Guk, J. Bast, P. Petrov // *Lightweight Design*. 2012. №5. C. 50–57. DOI: 10.1365/s35725-012-0023-5
- [11] Definition of area of the maximum shear deformations for CFRP samples on Iosipescu method, with use of optical system of measurements / A.V. Ilichev, A.M. Gubin, A.R. Akmeev, N.V. Ivanov // *Trudy «VIAM»*. 2018. №6. pp. 99–109. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-99-109
- [12] Tretyakova T.V. Ocenka vlijanija slozhnogo naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija na pojavlenie jeffekta Portevena-Le Shatel'e v Al-Mg splave // *Ajerokosmicheskaja tehnika, vysokie tehnologii i innovacii*. 2021. Vol. 2. pp. 206–209.
- [13] Besnard G., Hild F., Roux S. “Finite-element” displacement fields analysis from digital images: Application to Portevin-Le Châtelier // *Experimental Mechanics*. 2006. №46(6), C. 789–803. DOI: 10.1007/s11340-006-9824-8
- [14] 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> (date of last access 03.08.2023). DOI: 10.47953/SAE-PP-00322
- [15] In situ opredelenie nepreryvnoj jevoljucii v prostranstve i vo vremeni deformacionnyh polej na stal'noj plastine s koncentratorom naprjazhenij / V.A. Vlasov, A.S. Plyaskin, A.A. Klopotov [etc.] // *Modern construction materials and technologies: Conference Proceedings of the III International Conference, Kaliningrad, 26–29 May 2020* / M.A. Dmitrieva, eds., Vol. 3, Kaliningrad: Immanuel Kant Baltic Federal University, 2021. pp. 164–172.
- [16] Strungar E.M., Lobanov D.S. Development of the digital image correlation (DIC) method for mechanical testing at elevated temperatures. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2022, no. 3, pp. 147–159. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.15
- [17] Kibitkin V.V., Solodushkin A.I. Uvelichenie ploshhadi kontrolja pri izmerenii deformacii tverdogo tela metodom korrelyacii cifrovych izobrazhenij // *Izvestija vuzov. Fizika*. 2021. № 64. pp. 32–37. DOI: 10.17223/00213411/64/4/32
- [18] Numerical and Experimental Investigation of Deep Drawing of Sandwich Panels / S. Tipalin, M. Petrov, B. Saprikin, N. Kosatchyov, N. Shpunkin, P. Petrov // *Key Engineering Materials*. 2014. Vols. 611–612, C. 1627–1636. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1627
- [19] Popov E.A. *Osnovy teorii listovoj shtampovki*. M.: Mashinostroenie, 1977. 278 p.
- [20] Russel S.J., Norvig P., *Artificial Intelligence. A modern Approach*, 2<sup>nd</sup> edition, 2003, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, p. 1080.
- [21] Petrov M.A., El-Deeb I.S.A., To the development of the algorithm for the inline inspection of the geometric and technological parameters on the example of cold bulk forging of a bolt blank, *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, №4, 2020, pp. 39–48
- [22] [https://idics.org/guide/DICGoodPracticesGuide\\_ElectronicVersion-V5g-181022.pdf](https://idics.org/guide/DICGoodPracticesGuide_ElectronicVersion-V5g-181022.pdf) (date of last access 20.10.2023).
- [23] M. Aydin, X. Wub, K. Cetinkaya, M. Yasar, I. Kadi, Application of Digital Image Correlation technique to Erichsen Cupping Test, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2018, Vol. 21, C. 760–768.
- [24] Van Mieghem, B., Ivens, J., & Van Bael, A. (2016). Consistency of Strain Fields and Thickness Distributions in Thermoforming Experiments Through Stereo DIC. *Experimental Techniques*, 40(5), 1409–1420. doi:10.1007/s40799-016-0143-4

- [25] Gonzalez, M. M., Lutes, N. A., Fischer, J. D., Woodside, M. R., Bristow, D. A., & Landers, R. G. (2019). Analysis of geometric accuracy and thickness reduction in multistage incremental sheet forming using digital image correlation. *Procedia Manufacturing*, 34, 950–960. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.105>
- [26] Boukhtache, S., Abdelouahab, K., Berry, F., Blaysat, B., Grédiac, M., & Sur, F. (2021). When Deep Learning Meets Digital Image Correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 136, 106308. doi:10.1016/j.optlaseng.2020.106308
- [27] Samei, J., Sadeghi, A., Morteza pour, H., Salavati, S., Amirmaleki, M., Pekguleryuz, M., & Wilkinson, D. S. (2020). 4D X-ray tomography characterization of void nucleation and growth during deformation of strontium-added AZ31 alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 797, 140081. doi:10.1016/j.msea.2020.140081
- [28] Nazari-Onlaghi, S., Sadeghi, A., Karimpour, M., & Pekguleryuz, M. (2021). Fracture micro-mechanisms in hot-rolled AZ31 and AZ31-Sr magnesium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 812, 141107. doi:10.1016/j.msea.2021.141107
- [29] Kitain L. The New Age of Manufacturing: Digital Twin Technology & IIoT, The New Age of Manufacturing, 2018, <http://www.innovation4.cn/library/r46394> (date of last access 20.10.2023).
- [30] Stebunov S., Vlasov A., Biba N. Prediction of the fracture in cold forging with modified Cockcroft-Latham criterion // *Procedia Manufacturing*. 2018. № 15. C. 519–526. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.264
- [31] 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. C. 56–80. DOI: 10.1016/j.ijplas.2013.08.006
- [32] <https://www.sandia.gov/ccr/software/digital-image-correlation-engine-dice/> (date of last access 20.10.2023).